FRIEDRICH-TABELLENBÜCHER

ELEKTROTECHNIK



VEB FACHBUCHVERLAG
LEIPZIG

FRIEDRICH-TABELLENBÜCHER

ELEKTROTECHNIK

FRIEDRICH-TABELLENBÜCHER

ELEKTROTECHNIK

19., neubearbeitete Auflage

Mit etwa 1900 Bildern

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Auf Grund der raschen Weiterentwicklung der Technik ist es notwendig, bei Benutzung des Tabellenbuches sich über den jeweils neuesten Stand aller Vorschriften zu informieren.

Herausgegeben von Oberingenieur ADOLF TEML

Bearbeitet von einem Autorenkollektiv,
bestehend aus

Dr. rer. nat. Dipl.-Ing. FRITZ TORNAU, Leipzig
(Federführender)
Dipl.-Ing. LOTHAR BARTH, Leipzig
Ing. JOACHIM GROLLMISCH, Borsdorf
Ing. NIKOLAUS HOCKER, Berlin
Ing. HEINZ HÖTH, Berlin
Dr. rer. nat. HEINER KÖHLER, Dresden
Dr. rer. nat. HERBERT KÜSTNER, Markkleeberg
Ing. KURT LAMPE, Leipzig
Ing. GÜNTER MEISSNER, Leipzig
Dipl.-Ing. RUDOLF SCHAAL, Berlin
Dr. rer. nat. HERBERT SCHULZ, Leipzig

Diese Ausgabe des FRIEDRICH darf weder direkt noch indirekt in die Bundesrepublik Deutschland und Berlin (West) geliefert werden.

© VEB Fachbuchverlag Leipzig
19. Auflage (685.—724. Tsd.)
Lizenznummer: 114-210/64/81
LSV 3507
Verlagslektor: Walter Gruhle
Gestaltung: Egon Hunger, Leipzig
Printed in GDR
Satz: VEB Druckhaus „Maxim Gorki", 7400 Altenburg
Fotomechanischer Nachdruck: (52) Nationales Druckhaus, Betrieb der VOB National, Berlin
Redaktionsschluß: 31. 5. 1980
Bestellnummer: 545 160 6
DDR 8,50 M

Vorwort

Mit der vorliegenden neubearbeiteten Auflage des Friedrich-Tabellenbuches ELEKTROTECHNIK kommen Verlag und Autoren dem Bedürfnis des Leserkreises nach einem modernen Wissensspeicher Elektrotechnik und Elektronik mit kurzer Zugriffszeit nach.

Entsprechend der Bedeutung in der Praxis wurde der Abschnitt über elektronische und leistungselektronische Bauelemente bedeutend erweitert. Wissensgebiete wie analoge und digitale Schaltkreise, Optoelektronik, Schwingkreise und Filter, Thyristoren, Leiterplatten und Zuverlässigkeit von Bauelementen wurden auf Kosten veralteter Technik (Elektronen- und Ionenröhren) neu aufgenommen.

Der Abschnitt Automatisierungstechnik wurde im Zusammenhang mit dem Abschnitt Meßtechnik grundlegend neu gestaltet und erweitert.

Auch der Abschnitt Informationsanlagen erfuhr eine Überarbeitung, wobei die Grundlagen des Schwarz-Weiß-Fernsehens und die des Farbfernsehens mit den verschiedenen Systemen ebenso behandelt werden wie die Grundlagen des Fernschreibens mittels elektromechanischer und elektronischer Fernschreiber. Der Abschnitt zur elektronischen Datenverarbeitung wurde durch Grundlagen der Prozeßrechentechnik ergänzt.

Die Abschnitte Grundlagen und Elektrotechnische Anlagen wurden dem neuesten Stand der Technik angepaßt. Das gesamte Tabellenbuch ist konsequent auf SI-Einheiten umgestellt worden.

Ein umfangreiches Sachwortverzeichnis soll trotz des größeren Wissensumfangs die Zugriffszeit zum gesuchten Sachverhalt weiterhin verkürzen.

Alle Autoren waren bemüht, in der vorliegenden Ausgabe anwendungsbereites Wissen zu vermitteln. Besonderer Dank gebührt Herrn Obering. *Helmut Bremser* für seine vielen wertvollen Ratschläge.

Hinweise zur weiteren Verbesserung des vorliegenden Tabellenbuches werden gern entgegengenommen.

Federführender Bearbeiter und Verlag

Inhaltsverzeichnis

1. **AG Allgemeine Grundlagen** 11

1.1. *Aus der Mathematik* 11
1.1.1. Zeichen und Symbole 11
1.1.2. Algebra 12
1.1.2.1. Die vier Grundrechenarten 12
1.1.2.2. Bruchrechnung 12
1.1.2.3. Proportionen 13
1.1.2.4. Prozentrechnung 13
1.1.2.5. Potenzieren 13
1.1.2.6. Radizieren (Wurzelziehen) 14
1.1.2.7. Gleichungen ersten Grades mit einer Unbekannten 14
1.1.2.8. Gleichungen ersten Grades mit zwei Unbekannten 14
1.1.2.9. Gleichungen zweiten Grades (quadratische Gleichungen) 15
1.1.2.10. Logarithmen 15
1.1.2.11. Rechenstab 16
1.1.2.12. Fehlerfortpflanzung (Größtfehler) 18
1.1.3. Geometrie 18
1.1.3.1. Formeln für Flächenberechnung (Planimetrie) 18
1.1.3.2. Formeln für Volumenberechnung (Stereometrie) 19
1.1.3.3. Winkelfunktionen (Goniometrie) 20
1.1.3.4. Berechnungen an Dreiecken (Trigonometrie) 22
1.1.3.5. Geometrische Grundkonstruktionen 22
1.1.3.6. Aus der analytischen Geometrie 23
1.1.4. Dualsystem 24
1.1.4.1. Bedeutung 24
1.1.4.2. Zahlendarstellung 25
1.1.4.3. Umwandlung (Konvertierung) von Dezimalzahlen in Dualzahlen 25
1.1.4.4. Grundrechenoperationen 25
1.1.4.5. Logische Verknüpfungen 26
1.1.5. Zahlentabellen 27

1.2. *Aus der Chemie* 47
1.2.1. Die chemischen Elemente 47
1.2.1.1. Periodensystem 47
1.2.1.2. Relative Atommassen 49
1.2.2. Trivialname und chemische Benennung technisch wichtiger Stoffe 49
1.2.3. Elektrochemische Äquivalente 50
1.2.4. Physikalische Konstanten 50

1.3. *Aus der Physik* 51
1.3.1. Einheiten 51
1.3.1.1. Internationales Einheitensystem (SI) 51
1.3.1.2. Beziehungen und Umrechnungen 56
1.3.2. Aus der Mechanik 58
1.3.2.1. Einfache Maschinen 58
1.3.2.2. Arbeit und Leistung 59
1.3.2.3. Reibung 59
1.3.2.4. Dichte 60
1.3.3. Aus Baustatik und Festigkeitslehre 61
1.3.3.1. Grundbegriffe 61
1.3.3.2. Tabellen 62
1.3.3.3. Beispiele 64
1.3.4. Aus der Thermodynamik 65
1.3.4.1. Wärmeausdehnungskoeffizient 65
1.3.4.2. Spezifische Wärmekapazität 66
1.3.4.3. Schmelzwärme und Verdampfungswärme 66
1.3.4.4. Wärmeleitfähigkeit 67

1.4. *Standardisierung* 68
1.4.1. Allgemeines 68
1.4.2. Grundsätze, Ziele und Aufgaben 68
1.4.3. Zur Anwendung von Standards 68
1.4.4. Wichtige Standards der Elektrotechnik 69

1.5. *Technisches Zeichnen* 70
1.5.1. Papierformate 70
1.5.2. Blattgrößen 71
1.5.3. Schrift für Zeichnungen 71
1.5.4. Maßstäbe 72
1.5.5. Schraffuren 72
1.5.6. Linienarten, Linienbreiten 72
1.5.7. Oberflächenrauheit 73
1.5.8. Grundsätzliches zur Darstellung 73
1.5.8.1. Ansichten 74
1.5.8.2. Schnitte 74
1.5.9. Maßeintragung 75
1.5.9.1. Allgemeines 75
1.5.9.2. Maßlinien, Maßhilfslinien 75
1.5.9.3. Maßpfeile 76
1.5.9.4. Maßzahlen 76
1.5.9.5. Halbmesser 76
1.5.9.6. Durchmesserzeichen 76
1.5.9.7. Quadratzeichen, Diagonalkreuz 77
1.5.9.8. Kugel 77
1.5.9.9. Kegel, Verjüngung, Neigung 77
1.5.9.10. Nuten 77
1.5.9.11. Anordnung und Auswahl der Maße 77
1.5.9.12. Loch- und Kreisteilungen 78
1.5.9.13. Bogenmaße 78
1.5.9.14. Gewinde 78
1.5.9.15. Toleranzen und Passungen 79
1.5.9.16. Laufende Nummern der Teile 80
1.5.10. ISA-Passungen und Grundtoleranzen 80

1.6. *Werkstoffe, Halbzeuge, Schrauben und Zubehör* 83
1.6.1. Vorkommen und Eigenschaften einiger Metalle 83
1.6.2. Leiterwerkstoffe 83
1.6.2.1. Aluminium 83
1.6.2.2. Kupfer 83
1.6.2.3. Messing 85
1.6.3. Lote 85
1.6.4. Plaste und Isolierstoffe 86
1.6.4.1. Plaste 86
1.6.4.2. Isolierstoffe 89
1.6.5. Stahl 91
1.6.5.1. Allgemeine Baustähle 93
1.6.5.2. Werkzeugstähle und Hartmetalle 93
1.6.6. Nichteisenmetalle 93
1.6.7. Halbzeuge 94
1.6.7.1. Dynamoblech 94
1.6.7.2. Stahlblech 94
1.6.7.3. Flachstahl und Stahlprofile 94
1.6.7.4. Rohre 101
1.6.7.5. Streckmetall 102
1.6.8. Schrauben, Muttern und Zubehör 103
1.6.8.1. Schrauben 104
1.6.8.2. Muttern 106
1.6.8.3. Federringe 107
1.6.8.4. Scheiben 107
1.6.8.5. Federnde Zahnscheiben 107

1.7. *Schaltzeichen* 108
1.7.1. Standardübersicht 108
1.7.2. Begriffe 109
1.7.3. Schaltzeichen, Schaltkurzzeichen 110

1.8. *Schaltpläne* 120
1.8.1. Standardübersicht 120
1.8.2. Bezeichnung 120
1.8.3. Ausführungen 122
1.8.3.1. Stromlaufplan 122
1.8.3.2. Geräteschaltplan 122
1.8.3.3. Gruppenverbindungsplan 123
1.8.3.4. Übersichtsschaltplan 123
1.8.3.5. Funktionsschaltplan 123
1.8.3.6. Schutzrelaisplan 123
1.8.3.7. Installationsplan 123
1.8.3.8. Bauschaltplan 125
1.8.3.9. Anschlußplan 125
1.8.3.10. Belegungsplan 125
1.8.3.11. Formkabelplan 125
1.8.3.12. Wirkungsplan 125

1.9. *Elektrotechnische Grundlagen.* 130
1.9.1. Elektrizität 130
1.9.1.1. Elektrochemische Spannung 130
1.9.1.2. Thermospannung . 131
1.9.1.3. Piezoelektrizität 132
1.9.2. Elektrischer Widerstand . 132
1.9.2.1. Leiter . . 132
1.9.2.2. Halbleiter. . . . 134
1.9.3. OHMsches Gesetz. . . . 135
1.9.4. KIRCHHOFFsche Regeln 135
1.9.5. Reihen- und Parallelschaltung 135
1.9.5.1. Reihenschaltung von Spannungsquellen 135
1.9.5.2. Reihenschaltung ohmscher Widerstände 135
1.9.5.3. Reihenschaltung von Kondensatoren . 135
1.9.5.4. Reihenschaltung von Spulen 136
1.9.5.5. Parallelschaltung von Spannungsquellen 136
1.9.5.6. Parallelschaltung ohmscher Widerstände 136
1.9.5.7. Parallelschaltung von Kondensatoren. 136
1.9.5.8. Parallelschaltung von Spulen . . 136
1.9.5.9. Kondensator im Gleichstromkreis 136
1.9.5.10. Spule im Gleichstromkreis . . 137
1.9.6. Elektrische Leistung, Arbeit. . . . 137
1.9.7. Wechselspannung und Wechselstrom . 138
1.9.7.1. Erzeugung . 138
1.9.7.2. Darstellung . 138
1.9.7.3. Messung 138
1.9.7.4. Widerstand im Wechselstromkreis . 139
1.9.7.5. Spule im Wechselstromkreis. . . . 139
1.9.7.6. Kondensator im Wechselstromkreis 139
1.9.7.7. Kondensator parallel zur Spule im Wechselstromkreis (Blindleistungskompensation) 140
1.9.8. Drehstrom 140
1.9.9. Arbeitspunkt von Starkstrom- und Informationsstromkreisen 141
1.9.10. Nennspannungen, Nennfrequenzen, Nennströme 142
1.9.10.1. Nennspannungen bis 380 kV 142
1.9.10.2. Nennfrequenzen bis 10 000 Hz . 142
1.9.10.3. Nennströme. . . 143
1.9.11. Magnetisches Feld . . . 143
1.9.11.1. Magnetische Feldstärke. 143
1.9.11.2. Durchflutung . . . 143
1.9.11.3. Magnetischer Fluß . . . 143
1.9.11.4. Magnetische Flußdichte. 143
1.9.11.5. Hysteresekurve 143
1.9.11.6. Magnetkreis mit Luftspalt . 144
1.9.11.7. Kraftwirkung im Magnetfeld 144

EB Elektrotechnische Bauelemente . . 146

2.1. *Dioden* . . 146
2.1.1. Grundlagen . . . 146
2.1.2. Diodenübersicht . . 147
2.1.3. Gleichrichterdioden 150
2.1.3.1. Grundlagen 150
2.1.3.2. Stromrichterschaltungen 150
2.1.3.3. Reihen-, Parallelschaltung von Dioden 155
2.1.3.4. Spannungsvervielfachung . . . 155
2.1.3.5. Siebung von Gleichspannungen . . . 155
2.1.3.6. Kühlung von Leistungsgleichrichtern 156
2.1.4. Z-Dioden . . 156
2.1.4.1. Grundlagen 156
2.1.4.2. Stabilisierungsschaltungen 157
2.1.4.3. Temperaturverhalten. 158

2.2. *Thyristoren* 158
2.2.1. Grundlagen 158
2.2.2. Statische Eigenschaften, dynamisches Verhalten, Kennlinien 158
2.2.3. Schaltungsbeispiele. . 161

2.3. *Transistoren* 161
2.3.1. Bipolare Transistoren 161
2.3.1.1. Grundlagen . 161
2.3.1.2. Theorie. 161
2.3.1.3. Schaltungstechnik 165
2.3.1.4. Kühlung von Transistoren 167
2.3.2. Unipolare Transistoren . 168
2.3.2.1. Grundlagen . . . 168
2.3.2.2. Schaltungstechnik . 170

2.4. *Elektronen- und Ionenröhren* 171
2.4.1. Stromleitung in Gasen und im Vakuum. 171
2.4.2. Elektronenröhren (Empfängerröhren) 171
2.4.2.1. Grundlagen 171
2.4.2.2. Kennlinien, Ersatzschaltbilder, Kenngrößen. 172
2.4.2.3. Schaltungstechnik 172
2.4.3. Elektronenröhren (Spezialröhren) 173
2.4.3.1. Bildwiedergaberöhren 173
2.4.3.2. Mikrowellenröhren 174
2.4.4. Ionenröhren (Gasentladungsröhren) 175
2.4.4.1. Grundlagen . 175
2.4.4.2. Glimmröhren 176
2.4.4.3. Stromrichter 176

2.5. *Analoge integrierte Schaltkreise* . 178
2.5.1. Schaltzeichen, Grundbegriffe 178
2.5.2. Schaltungstechnik . . . 179
2.5.3. Grundschaltungen . 180
2.5.4. Standardtypen 183

2.6. *Digitale integrierte Schaltkreise* . . . 183
2.6.1. Grundsätzliches und Klassifizierung . 183
2.6.2. Monolithische Schaltkreise . . 185

2.7. *Optoelektronik* 186
2.7.1. Optoelektronische Grundgesetze und Überblick 186
2.7.2. Lichtsender . . 186
2.7.2.1. Laser. 186
2.7.2.2. Lumineszenzdioden . 187
2.7.2.3. Lumineszenzelemente 187
2.7.3. Lichtempfänger 187
2.7.3.1. Fotozelle und Fotovervielfacher 187
2.7.3.2. Fotowiderstand und Halbleitersperrschichtelemente 187
2.7.4. Optische Koppler . 187
2.7.4.1. Faseroptik 187
2.7.4.2. Optoelektronische Koppler . 188

2.8. *Widerstände* . . . 189
2.8.1. Lineare Widerstände . . 189
2.8.1.1. Widerstandsnomogramm 189
2.8.1.2. Festwiderstände 190
2.8.1.3. Veränderliche Widerstände 192
2.8.2. Nichtlineare Widerstände . 194
2.8.2.1. Varistoren . 194
2.8.2.2. Thermistoren 195

2.9. *Kondensatoren* 197
2.9.1. Allgemeines . . . 197
2.9.2. Festkondensatoren 198
2.9.3. Veränderbare Kondensatoren 204

2.10. *Induktivitäten* 204
2.10.1. Nieder- und Hochfrequenzinduktivitäten 204
2.10.2. Induktivitäten der Starkstromtechnik 208
2.10.3. Gedruckte Induktivitäten. 209

2.11. *Schwingkreise, Filter* 210
2.11.1. Reihen- und Parallelschwingkreis 210
2.11.2. Bandfilter 212
2.11.3. *LC*-Filter (Siebschaltungen) . 212
2.11.4. *RC*-Filter 215
2.11.5. Mechanische Filter . . . 217
2.11.5.1. Elektromechanische Filter 217
2.11.5.2. Magnetomechanische Filter . 217

2.12. *Gedruckte Schaltungen* . . . 218
2.12.1. Allgemeines, Begriffe, Arten 218
2.12.2. Konstruktion, Unterlagensatz . 221
2.12.3. Bestücken, Löten 222

2.13. *Einbauhinweise und Lötvorschriften für Bauteile der Elektronik* . 222
2.13.1. Allgemeines . . . 222
2.13.2. Halbleiterdioden. 223
2.13.3. Transistoren . 225
2.13.4. Kondensatoren. 225
2.13.5. Leiterplatten 226

2.14. *Zuverlässigkeit.* 226
2.14.1. Allgemeines . 226
2.14.2. Bauelemente 226
2.14.3. Baugruppen 227

2.15. *Elektrochemische Spannungsquellen* . 227
2.15.1. Allgemeines . . 227
2.15.2. Primärelemente 227
2.15.3. Sekundärelemente (Akkumulatoren) 228
2.15.4. Akkumulatorenanlagen . 231

3. **AT Automatisierungstechnik** 232

3.1. *Grundlagen* 232

3.2. *Signalfluß der Steuerung, Regelung* . 233
3.2.1. Signalaufnahme . . 233
3.2.2. Signalverarbeitung 236
3.2.3. Signalausgabe . 240

3.3. *Kenngrößen der Regelung* 241

3.4. *Automatisierungssysteme (URS)* 242

4. **EM Elektrotechnische Geräte und Maschinen** 243

4.1. *Elektrische Meßgeräte* 243
4.1.1. Allgemeines 243
4.1.2. Wirkungsweise elektrischer Meßgeräte 245
4.1.2.1. Drehspul-Meßgerät 245
4.1.2.2. Kreuzspul-Meßgerät 245
4.1.2.3. Dreheisen- (Weicheisen-) Meßgerät . 245
4.1.2.4. Frequenzmesser 245
4.1.2.5. Thermoumformer-Meßgerät . 246
4.1.2.6. Kompensatoren . . . 246
4.1.2.7. Schreibende Meßgeräte . 246
4.1.2.8. Gleichstromzähler . 246
4.1.2.9. Wechselstromzähler . . . 246
4.1.2.10. Katodenstrahl-Oszillograph . 247
4.1.2.11. Meßbereichserweiterung 247
4.1.2.12. Impedanzmessungen 247
4.1.3. Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen 249
4.1.3.1. Aktive Geber 249
4.1.3.2. Passive Geber . 250

4.2. *Relais und Schaltgeräte* 252
4.2.1. Relais, Auslöser 252
4.2.2. Sicherungen, Leitungsschutzschalter . 256
4.2.3. Niederspannungsschaltgeräte 257
4.2.4. Hochspannungsschaltgeräte 260
4.2.5. Einsatz der Geräte in elektrotechnischen Anlagen. . 262

4.3. *Rotierende elektrische Maschinen, Linearmotoren* 263
4.3.1. Allgemeines über rotierende elektrische Maschinen 263
4.3.1.1. Einteilung nach der Arbeitsweise . 263
4.3.1.2. Einteilung nach Maschinengattungen 264
4.3.1.3. Grundsätzliches zum Betrieb 264
4.3.1.4. Nennbetriebsarten . 264
4.3.1.5. Kühlungsarten 266
4.3.1.6. Kennzeichen und Angaben auf dem Leistungsschild 266
4.3.1.7. Anschlußbezeichnungen. 267
4.3.1.8. Aufbau von elektrischen Maschinen 268
4.3.1.9. Bauformen . 268
4.3.1.10. Schutzgrade 270
4.3.1.11. Nennspannungen und Nennleistungen 271
4.3.1.12. Achshöhen, Wellenenden und andere konstruktive Angaben . . . 271
4.3.1.13. Maßbezeichnungen 273
4.3.1.14. Kohlebürsten und Bürstenhalter 275
4.3.1.15. Übertragung 277
4.3.1.16. Dynamo- und Trafobleche 278
4.3.1.17. Wicklungen . . 279
4.3.2. Generatoren 281
4.3.2.1. Gleichstromgeneratoren . . 281
4.3.2.2. Wechselstromgeneratoren . . 284
4.3.3. Elektromotoren . . 287
4.3.3.1. Gleichstrommotoren . 287
4.3.3.2. Wechselstrommotoren 288
4.3.3.3. Linearmotoren 293
4.3.3.4. Anschluß von Drehstrommotoren . 294
4.3.4. Anlasser und Steller 297
4.3.5. Antriebe 297
4.3.6. Umformer, Umrichter, Frequenzwandler 299
4.3.6.1. Rotierende Umformer . . 299
4.3.6.2. Statische Umformer 299

4.4. *Umspanner, Wandler, Übertrager* 302
4.4.1. Wirkprinzip 302
4.4.2. Umspanner (Transformator) . 302
4.4.2.1. Wirkungsweise der Umspanner 302
4.4.2.2. Aufbau von Umspannern 303
4.4.2.3. Parallelschalten von Umspannern 303
4.4.2.4. Bezeichnungen 304
4.4.2.5. Nennleistungen für Drehstromumspanner (50 Hz) . . . 304
4.4.2.6. Anzapfungen 304
4.4.2.7. Angaben auf dem Leistungsschild 304
4.4.2.8. Transformatorarten 304
4.4.2.9. Trocken- und Öltransformatoren. 305
4.4.2.10. Transformatorenschutz 306
4.4.2.11. Lüftung von Transformatorenräumen 307
4.4.3. Wandler . 308
4.4.3.1. Allgemeines . 308
4.4.3.2. Stromwandler . . 308
4.4.3.3. Spannungswandler . 310
4.4.4. Übertrager . 310
4.4.4.1. Arten 310
4.4.4.2. Kernabmessungen 310
4.4.4.3. Bemessung 310

5. **EA Elektrotechnische Anlagen** 312

5.1. *Allgemeine Begriffe.* 312

5.2. *Leitungen, Kabel, Freileitungen, Armaturen* . 316
5.2.1. Starkstromleitungen 316
5.2.1.1. Auswahl der Leitungen . . 316
5.2.1.2. Leitermindestquerschnitte . . . 316
5.2.1.3. Schutz gegen zu hohe Erwärmung . 316
5.2.1.4. Strombelastbarkeitsfaktoren. 319
5.2.1.5. Leitungsberechnungen 320
5.2.1.6. Überstrom-Schutzeinrichtungen 325
5.2.1.7. Kennzeichnung von Leitungen. 326
5.2.1.8. Legung von Leitungen 326
5.2.2. Starkstromkabel . 327
5.2.2.1. Auswahl der Kabel. . 327
5.2.2.2. Bemessung der Kabel 328
5.2.2.3. Schutz der Kabel 335
5.2.2.4. Kennzeichnung von Kabeln . 336
5.2.2.5. Legung von Kabeln 336
5.2.2.6. Leiterverbindungen . . 337
5.2.3. Starkstromfreileitungen 337
5.2.3.1. Schutz gegen zufälliges Berühren 337
5.2.3.2. Leiter 338
5.2.3.3. Leiterbefestigungen, Armaturen 340
5.2.3.4. Isolatorenketten, Isolatoren . 340
5.2.3.5. Maste 342
5.2.3.6. Erdung und Blitzschutz 342
5.2.3.7. Fahrdrähte für elektrische Bahnen . 346
5.2.4. Fernmeldeleitungen 346
5.2.4.1. Fernmeldeleitungen für feste Legung 346
5.2.4.2. Fernmeldeleitungen für ortsveränderliche Betriebsmittel . . 351
5.2.5. Fernmeldekabel 353
5.2.5.1. Niederfrequenzkabel (NF-Kabel) 353
5.2.5.2. Trägerfrequenzkabel (TF-Kabel) 355
5.2.5.3. Kombinierte Fernmeldekabel 356

5.3. *Schaltanlagen* 356
5.3.1. Hochspannungsschaltanlagen 356
5.3.1.1. Luftisolierte Schaltzellen . . 356
5.3.1.2. Feststoffisolierte Schaltzellen 356
5.3.1.3. Gasisolierte Schaltzellen 357
5.3.2. Umspannstationen, Typenreihe UK 357
5.3.3. Ortsnetz-Transformatorenstationen. 359
5.3.4. Schalt- und Verteilungsanlagen bis 1000 V, Schaltfelder, Schützfelder . . 360
5.3.5. Bemessung von Schaltanlagen . . . 365
5.3.6. Allgemeine Errichtungsvorschriften 372
5.3.6.1. Allgemeine technische Forderungen 372
5.3.6.2. Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Ws oder bis 1,5 kV Gs 373
5.3.6.3. Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV Ws oder über 1,5 kV Gs 374
5.3.6.4. Kennzeichnen von Gefahrenstellen, Anbringen von Aushängen 379
5.3.6.5. Anschluß von Starkstrom-Abnehmeranlagen an die Energieversorgungsanlage, Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V . 380

5.3.7. Schutzmaßnahmen in elektrotechnischen Anlagen . . 381
5.3.7.1. Begriffe 381
5.3.7.2. Schutz gegen Berühren betriebsmäßig unter Spannung stehender Teile 382
5.3.7.3. Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen in Anlagen bis 1 000 V Ws oder 1,5 kV Gs und Betriebsfrequenzen bis 10 kHz 383
5.3.8. Erdung in elektrotechnischen Anlagen 390
5.3.8.1. Grundforderungen, Bemessung, Ausführung . 390
5.3.8.2. Starkstromanlagen 392
5.3.9. Betreiben elektrotechnischer Anlagen 395
5.3.9.1. Sicherheitstechnische Forderungen für Starkstromanlagen 395
5.3.9.2. Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen mit Nennspannungen bis 1 000 V Ws oder 1,5 kV Gs 397
5.3.10. Prüfung elektrotechnischer Anlagen . 398

5.4. Installationstechnik 398
5.4.1. Allgemeines . . . 398
5.4.2. Installationsarten . . 398
5.4.2.1. Unterputz-Installation 399
5.4.2.2. Imputz-Installation 399
5.4.2.3. Aufputz-Installation . 400
5.4.2.4. Unterflur-Installation 400
5.4.2.5. Vouten-Installation . . . 402
5.4.2.6. Zwischendecken-Installation. . . . 403
5.4.2.7. Wandkanal- und Schachtinstallation . 403
5.4.2.8. Kanal- und Tragbügel-Installation . 403
5.4.2.9. Spanndraht-Installation 403
5.4.2.10. Pritschen-Installation . 406
5.4.2.11. Rohrtrassen-Installation 406
5.4.2.12. Fußleisten- und Wandkanal-Installation . 406
5.4.2.13. Installation mit selbsttragenden Leitungen 407
5.4.2.14. Erdkabel-Installation. . 407
5.4.2.15. Kabelkanal-Installation 407
5.4.3. Montage von Leitungen. . . . 408
5.4.3.1. Aderleitungen und Schaltdrähte . 408
5.4.3.2. Stegleitungen . 408
5.4.3.3. Mantelleitungen . . 409
5.4.4. Montage von Rohren 410
5.4.4.1. Plastrohre und Plastpanzerrohre 410
5.4.4.2. Stahlpanzerrohre 411

5.5. Lichttechnische Anlagen 412
5.5.1. Fotometrische Größen und Einheiten. 412
5.5.2. Physiologische Optik . . 413
5.5.3. Lichterzeugungstechnik 413
5.5.3.1. Glühlampen. 413
5.5.3.2. Gasentladung und Lumineszenz 415
5.5.3.3. Kondensatorlampen 418
5.5.4. Beleuchtungstechnik . 418
5.5.4.1. Beleuchtungsstärke 419
5.5.4.2. Allgemeine Forderungen an die Beleuchtung . 419
5.5.4.3. Beleuchtung geschlossener Räume mit reflektierenden Decken und Wänden . 421

5.6. Elektrowärmeanlagen . 421
5.6.1. Heizarten. 422
5.6.2. Berechnungsbeispiel und Heizleiter 422
5.6.3. Raumheizung . 425

5.7. Elektroschweißen . . . 426
5.7.1. Lichtbogenschweißen. . . 426
5.7.2. Widerstandspreßschweißen 429

5.8. Blitzschutzanlagen 429
5.8.1. Allgemeines 429
5.8.2. Errichtung von Blitzschutzanlagen. 429
5.8.3. Prüfen der Blitzschutzeinrichtungen 432

5.9. Elektrotechnische Anlagen für Kraftfahrzeuge . 432
5.9.1. Allgemeines 432
5.9.2. Lichtmaschinen 433
5.9.3. Anlasser 434
5.9.4. Leistungsbedarf der wichtigsten elektrotechnischen Einrichtungen 434
5.9.5. Beleuchtungsanlage 434
5.9.6. Batterieschutz durch Rückstrom-Schutzdiode . 437
5.9.7. Zündkerzen, Hochleistungszündspulen 437
5.9.8. Spezialzündanlagen 438
5.9.9. Steckverbinder 441

6. IA Informationsanlagen 442

6.1. Rundfunktechnik 442
6.1.1. Grundlagen der Rundfunktechnik 442
6.1.2. Hör-Rundfunk 442
6.1.2.1. Grundlagen 442
6.1.2.2. Empfängertechnik (Super) 446
6.1.3. Fernseh-Rundfunk . 453
6.1.3.1. Grundlagen 453
6.1.3.2. Schwarz-Weiß-Fernsehen 459
6.1.3.3. Farbfernsehen 460
6.1.4. Bedienungskomfort für elektronische Heimgeräte 466
6.1.5. Einsatz integrierter Schaltkreise . 467

6.2. Fernsprechtechnik . 469
6.2.1. Allgemeines 469
6.2.2. Grundschaltungen und Betriebsarten . 469
6.2.2.1. Direkte Schaltung . 469
6.2.2.2. Indirekte Schaltung 469
6.2.2.3. Ortsbatterie-System . 469
6.2.2.4. Zentralbatterie-System . . . 469
6.2.2.5. Rückhördämpfungsschaltung 469
6.2.3. Fernsprechapparate 470
6.2.3.1. Ortsbatterie-Fernsprechapparate. . 470
6.2.3.2. Fernsprechapparate für Wählbetrieb . 470
6.2.3.3. Hörverstärker . . 470
6.2.3.4. Münzfernsprecher 470
6.2.3.5. Nummernschalter . . . 470
6.2.3.6. Sprech- und Hörkapseln 470
6.2.4. Fernsprechvermittlungs-Einrichtungen 474
6.2.4.1. Fernsprechorts- und -fernverkehr 474
6.2.4.2. Handvermittlungen 474
6.2.4.3. Automatische Wählvermittlungen 474
6.2.4.4. Bauteile der Vermittlungstechnik 474

6.3. Fernschreibanlagen . 479
6.3.1. Grundlagen . 479
6.3.1.1. Telegrafie. 479
6.3.1.2. Telegrafenalphabet 479
6.3.1.3. Begriffe 480
6.3.1.4. Start-Stop-Prinzip . 480
6.3.2. Fernschreibgeräte 481
6.3.2.1. Blattschreiber . 481
6.3.2.2. Streifenschreiber. . . 481
6.3.2.3. Lochstreifengeräte 481
6.3.2.4. Sendevorgang . . 481
6.3.2.5. Empfangsvorgang 481
6.3.2.6. Elektronisches Senden und Empfangen von Fernschreibzeichen. 481
6.3.3. Fernschreib-Vermittlungstechnik. . 482
6.3.3.1. Fernschaltgerät . . 482
6.3.3.2. Anschlußschaltung 483
6.3.4. Fernschreib-Übertragungstechnik . 484
6.3.5. Fernschreibnetze 484
6.3.5.1. Telex-Netz 484
6.3.5.2. TGX-Netz 484
6.3.5.3. Datenübertragung in Fernschreibnetzen 485
6.3.5.4. Fehlerkorrekturgerät . 485

6.4. Elektrische Uhrenanlagen 485
6.4.1. Allgemeines . 485
6.4.2. Hauptuhr . . . 485
6.4.3. Impulsverstärker 486
6.4.4. Uhrenzentralen 486
6.4.5. Nebenuhren. . . 487
6.4.6. Uhrenleitungsnetz . 487

7. EDV Elektronische Datenverarbeitung 488

7.1. Bedeutung der elektronischen Datenverarbeitung. 488

7.2. Grundlagen der Datenverarbeitung. 488
7.2.1. Informationsdarstellung . 488
7.2.2. Arithmetische Operationen 488
7.2.3. Logische Operationen 489

7.3. Datenerfassung und Datenaufbereitung. 489
7.3.1. Datenbereitstellung 489

7.3.2. Datenerfassung . 489
7.3.3. Datenträger 490
7.3.4. Verschlüsselung (Codierung) . 490

7.4. Aufbau und Arbeitsweise von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen 492
7.4.1. Anforderungen und Grundfunktionen 492
7.4.2. Aufbau einer EDVA . 493
7.4.3. EDVA ES 1040 493
7.4.4. Einheitliches System der elektronischen Rechentechnik (ESER) . 493

7.5. Vorbereitung von Datenverarbeitungsaufgaben 495
7.5.1. Flußtechnik 496
7.5.2. Elemente der Programmierung 497
7.5.3. Systemunterlagen 497

7.6. Aufgaben, Eigenschaften und Merkmale von Prozeßrechenanlagen . . 497
7.6.1. Merkmale und Aufgaben 497
7.6.2. Aufbau und Arbeitsweise von Prozeßrechnern . 498
7.6.3. Prozeßein- und -ausgabe . 499

7.7. Betriebsarten und Einsatz von Prozeßrechenanlagen . . 499
7.7.1. Betriebsarten . . 499
7.7.2. Einsatzkomplexe 499

Sachwortverzeichnis . 503

1. Allgemeine Grundlagen

1.1. Aus der Mathematik

1.1.1. Zeichen und Symbole

In den Tabellen 1.1 bis 1.5 sind die wichtigsten mathematischen Zeichen, die römischen Zahlzeichen sowie das deutsche, griechische und russische Alphabet zusammengestellt.

Tabelle 1.1: Mathematische Zeichen (nach TGL 0-1302)

Zeichen	Bedeutung
+	plus
−	minus
· oder ×	mal
: oder / oder −	durch, geteilt durch, zu
...	und so weiter bis
$^0/_0$	Prozent (vom Hundert)
$^0/_{00}$	Promille (vom Tausend)
=	gleich
≠	nicht gleich, ungleich
≡	identisch gleich
≈	nahezu gleich, etwa
≙	entspricht
<	kleiner als
>	größer als
≦	kleiner oder gleich
≧	größer oder gleich
≪	klein gegen
≫	groß gegen
∞	unendlich
∥	parallel
∦	nicht parallel
⇅	gegensinnig parallel
▲▲	gleichsinnig parallel
⊥	rechtwinklig zu, senkrecht auf
≅	kongruent
~	proportional, ähnlich, äquivalent (Mengenlehre)
∢	Winkel
$\sum$	Summe
$\sqrt{\ }$	Quadratwurzel aus
$\overline{AB}$	Strecke AB
$\overset{\frown}{AB}$	Bogen AB
d	Differentialzeichen
π	LUDOLFsche Zahl, Pi, π = 3,141592...
e	Basis der natürlichen Logarithmen e = 2,718828...
$\log_a$	Logarithmus zur Basis a
lg	Zehnerlogarithmus (Basis 10; BRIGGSscher oder gewöhnlicher Logarithmus)
ln	natürlicher Logarithmus (Basis e)
lb	Zweierlogarithmus (Basis 2)
M_a	Modul des Logarithmensystems zur Basis a
sin	Sinus
cos	Kosinus
tan	Tangens
cot	Kotangens
', ''	Grad, Minute, Sekunde
gon	Gon (früher ^{g} für Neugrad)
a, b, c	Vektor a, b, c
A, B, C	Vektor A, B, C
∈	Element aus
∉	nicht Element aus
∋	enthalten in
⊇	echt enthalten in
∪	vereinigt mit
∩	geschnitten mit

Tabelle 1.2: Römische Zahlzeichen)*

I = 1	XX = 20	C = 200	M = 1000
II = 2	XXX = 30	CCC = 300	MCC = 1200
III = 3	XL = 40	CD = 400	MCD = 1400
IV = 4	L = 50	D = 500	MDCC = 1700
V = 5	LX = 60	DC = 600	MCM = 1900
VI = 6	LXX = 70	DCC = 700	MCMXC = 1990
VII = 7	LXXX = 80	DCCC = 800	MCMXCIX = 1999
VIII = 8	XC = 90	CM = 900	MM = 2000
IX = 9	XCIX = 99	CMXC = 990	
X = 10	C = 100	CMXCIX = 999	

*) I, X oder C werden nur den beiden nächsthöheren Zahlzeichen vorangestellt.

Beispiele: 253 = CCLIII; 1980 = MCMLXXX.

Tabelle 1.3: Deutsches Alphabet

Antiqua	Fraktur Druckschrift	Fraktur Schreibschrift	Antiqua	Fraktur Druckschrift	Fraktur Schreibschrift
A, a	𝔄, 𝔞	*𝔄 𝔞*	N, n	𝔑, 𝔫	*𝔑 𝔫*
B, b	𝔅, 𝔟	*𝔅 𝔟*	O, o	𝔒, 𝔬	*𝔒 𝔬*
C, c	ℭ, 𝔠	*ℭ 𝔠*	P, p	𝔓, 𝔭	*𝔓 𝔭*
D, d	𝔇, 𝔡	*𝔇 𝔡*	Q, q	𝔔, 𝔮	*𝔔 𝔮*
E, e	𝔈, 𝔢	*𝔈 𝔢*	R, r	ℜ, 𝔯	*ℜ 𝔯*
F, f	𝔉, 𝔣	*𝔉 𝔣*	S, s	𝔖, 𝔰	*𝔖 𝔰*
G, g	𝔊, 𝔤	*𝔊 𝔤*	ß		*ß*
H, h	ℌ, 𝔥	*ℌ 𝔥*	T, t	𝔗, 𝔱	*𝔗 𝔱*
I, i	ℑ, 𝔦	*ℑ 𝔦*	U, u	𝔘, 𝔲	*𝔘 𝔲*
J, j	𝔍, 𝔧	*𝔍 𝔧*	V, v	𝔙, 𝔳	*𝔙 𝔳*
K, k	𝔎, 𝔨	*𝔎 𝔨*	W, w	𝔚, 𝔴	*𝔚 𝔴*
L, l	𝔏, 𝔩	*𝔏 𝔩*	X, x	𝔛, 𝔵	*𝔛 𝔵*
M, m	𝔐, 𝔪	*𝔐 𝔪*	Y, y	𝔜, 𝔶	*𝔜 𝔶*
			Z, z	ℨ, 𝔷	*ℨ 𝔷*

Tabelle 1.4: Griechisches Alphabet

A, α Alpha	*B, β* Beta	*Γ, γ* Gamma	*Δ, δ* Delta	*E, ε* Epsilon	*Z, ζ* Zeta	*H, η* Eta	*Θ, ϑ* Theta
I, ι Iota	*K, κ* Kappa	*Λ, λ* Lambda	*M, μ* My	*N, ν* Ny	*Ξ, ξ* Xi	*O, o* Omikron	*Π, π* Pi
P, ϱ Rho	*Σ, σ* Sigma	*T, τ* Tau	*Y, υ* Ypsilon	*Φ, φ* Phi	*X, χ* Chi	*Ψ, ψ* Psi	*Ω, ω* Omega

Tabelle 1.5: Russisches Alphabet

Druckschrift	Umschreibung	Name	Druckschrift	Umschreibung	Name
А, а	a	a	Р, р	r	er
Б, б	b	be	С с	s	eß
В, в	v	we	Т, т	t	te
Г, г	g(h)	ge	У, у	u	u
Д, д	d	de	Ф, ф	f	ef
Е, е	e	je	Х, х	ch	cha
Ё, ё	jo	e (ou)	Ц, ц	z	ze
Ж, ж	sh wie j	sche (weich)	Ч, ч	tsch	tsche
			Ш, ш	sch	scha
З, з	wie s in Rose	se	Щ, щ	schtsch	schtscha
			Ъ, ъ	hartes Zeichen	
И, и	i	i	Ы, ы	y	jerrü
Й, й	i	kurzes i	Ь, ь	weiches Zeichen	
К, к	k	ka			
Л, л	l (hart)	el	Э, э	ae	e
М, м	m	em	Ю, ю	ju	ju
Н, н	n	en	Я, я	ja	ja
О, о	o	o			
П, п	p	pe			

1.1.2. Algebra

Die Algebra lehrt die Anwendung der arithmetischen Rechnung auf allgemeine, durch Buchstaben ausgedrückte Größen. Die Buchstaben können jede beliebige Zahl bedeuten. In derselben Rechnung hat jedoch ein bestimmter Buchstabe immer nur denselben Wert.

1.1.2.1. Die vier Grundrechenarten

Addieren

Das Rechenzeichen ist »+« (gelesen »plus«). In $a + b = c$ sind a und b die *Summanden*, c ist die *Summe*. Die Reihenfolge der Summanden ist beliebig. Der besseren Übersicht halber ordnet man sie alphabetisch.

Beispiel: $a + c + b + d = a + b + c + d$.

Regel: Gleichbenannte Summanden addiert man, indem man ihre Beizahlen addiert.

Beispiele: $4x + 5y + 3x + 4y = 7x + 9y$;
$a + a + a = 3a$;
$3a + b + 2c - a + b + c = 2a + 2b + 3c$.

Subtrahieren

Das Rechenzeichen ist »−« (gelesen »minus«).
In $a - b = c$ ist a der *Minuend*, b der *Subtrahend* und c die *Differenz*. Nur gleichbenannte Größen lassen sich subtrahieren.

Regel: Gleichbenannte Größen subtrahiert man, indem man ihre Beizahlen subtrahiert.

Beispiele: $10a - 6a = 4a$;
$5a - 3a - 2b = 2a - 2b$;
$9a + 9b - 7a + 3c - 6b - c = 2a + 3b + 2c$.

Ausdrücke der Gestalt $2a + 3b - c$ bezeichnet man als algebraische Summen. Soll mit einer algebraischen Summe eine Rechnung ausgeführt werden, so schließt man sie in runde bzw. eckige *Klammern*. Beim ersten Glied der Klammer läßt man das Vorzeichen weg, wenn es positiv ist; $3a$ hat also den Wert $+3a$.

Regel: Eine Klammer, vor der das Rechenzeichen »+« steht, kann man beim Addieren ohne Einfluß auf das Resultat fortlassen. Steht vor einer Klammer das Rechenzeichen »−«, so löst man sie auf, indem man die Vorzeichen aller Glieder der Klammer umkehrt.

Beispiele: $a + (b + c) = a + b + c$;
$a + (b - c) = a + b - c$;
$(3a + 5b + 6c) + 7a = 3a + 7a + 5b + 6$
$= 10a + 5b + 6c$;
$a - (b + c) = a - b - c$;
$a - (b - c) = a - b + c$;
$a - (-b - c) = a + b + c$;
$9a - 7b + 3 - [(14a - 19b - 8) - (23a - 15b + 6)]$
$= 9a - 7b + 3 - (14a - 19b - 8) + (23a - 15b + 6)$
$= 3 + 9a - 7b - 14a + 19b + 8 + 23a - 15b + 6$
$= 3 + 8 + 6 + 9a + 23a - 14a + 19b - 7b - 15b$
$= 17 + 18a - 3b$.

Multiplizieren

Das Rechenzeichen ist »·« (gelesen »mal«). Der Multiplikationspunkt ist bei der Buchstabenrechnung möglichst wenig zu verwenden.
In $ab = c$ sind a und b die *Faktoren*, und c ist das *Produkt*. Die Faktoren darf man vertauschen. Es ist z. B.
$abc = acb = bac = bca = cab$.

Regel: Multipliziert man zwei Zahlen, die gleiches Vorzeichen haben, so ist das Produkt positiv. Das Produkt aus zwei Zahlen mit verschiedenen Vorzeichen ist negativ.

Beispiele: $(+a)(+b) = +(ab)$; $(-a)(-b) = +(ab)$;
$(+a)(-b) = -(ab)$; $(-a)(+b) = -(ab)$.

Regel: Man multipliziert algebraische Summen, indem man jedes Glied der einen Summe mit jedem Glied der anderen Summe multipliziert.

Beispiele: $(a + b)c = ac + bc$; $(a + b)(-c) = -ac - bc$;
$(a + b)(c + d) = ac + bc + ad + bd$.

Merke: Man kann zwei Produkte erst dann addieren oder subtrahieren, wenn innerhalb der Produkte die Multiplikation ausgeführt ist.

Beispiel: $(a + b + c)d + a(b + d)$
$= ad + bd + cd + ab + ad$
$= ab + ad + ad + bd + cd$
$= ab + 2ad + bd + cd$.

Regel: Produkte werden miteinander multipliziert, indem man die Faktoren in beliebiger Reihenfolge multipliziert.

Beispiele: $(3a)(4b) = 3 \cdot 4ab = 12ab$;
$4a(5b - 3c) + 2a(3b + 8c)$
$= 5 \cdot 4ab - 3 \cdot 4ac + 2 \cdot 3ab + 2 \cdot 8ac$
$= 20ab - 12ac + 6ab + 16ac = 26ab + 4ac$.

Dividieren

Das Rechenzeichen ist der Doppelpunkt »:« (gelesen »geteilt durch«). Das Dividieren ist die Umkehrung des Multiplizierens:
$3 \cdot 4 = 12$; $12 : 4 = 3$; $12 : 3 = 4$.

In der Gleichung $a : b = c$ ist a der *Dividend*, b der *Divisor* und c der *Quotient*.

Regel: Dividiert man zwei Zahlen, die gleiches Vorzeichen haben, so ist der Quotient positiv. Der Quotient aus zwei Zahlen mit verschiedenen Vorzeichen dagegen ist negativ.

Beispiele: $(+a) : (+b) = +(a : b)$; $(-a) : (-b) = +(a : b)$;
$(-a) : (+b) = -(a : b)$; $(+a) : (-b) = -(a : b)$.

Regel: Eine algebraische Summe wird durch eine Zahl geteilt, indem man jedes einzelne Glied der Summe durch diese Zahl dividiert.

Beispiele: $(a + b) : c = a : c + b : c$;
$(a - b) : c = a : c - b : c$;
$(32ac + 16bc + 24cd) : 2b$
$= 32ac : 2b + 16bc : 2b + 24cd : 2b = 16\frac{ac}{b} + 8c + 12\frac{cd}{b}$.

Hat man zwei algebraische Summen zu dividieren, so werden zunächst beide auf gleiche Weise geordnet. Dann teilt man das erste Glied des Dividenden durch das erste Glied des Divisors. Mit dem so erhaltenen Quotienten multipliziert man den gesamten Divisor. Dieses Produkt ist vom Dividenden abzuziehen. Bleibt ein Rest, so verfährt man mit ihm ebenso.

Beispiel:

$$
\begin{array}{l|l}
 & (2ab + b \cdot b + a + a \cdot a + b) : (a + b) \\
- & (a \cdot a + a + 2ab + b + b \cdot b) : (a + b) = a + 1 + b \\
\hline
 & a \cdot a \quad + ab \\
\hline
 & \quad + a + ab + b + b \cdot b \\
- & \quad + a \quad\quad + b \\
\hline
 & \quad\quad + ab \quad\quad + b \cdot b \\
- & \quad\quad + ab \quad\quad + b \cdot b \\
\hline
 & \quad\quad\quad 0 \quad\quad\quad 0
\end{array}
$$

1.1.2.2. Bruchrechnung

Allgemeines

$\frac{a}{b}$ ist ein *gemeiner Bruch*; über dem Bruchstrich steht der *Zähler* a, darunter der *Nenner* b.
Man unterscheidet:

$a = 1$ Stammbrüche, z. B. $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}$;

$a < b$ echte Brüche, z. B. $\frac{1}{3}, \frac{5}{7}, \frac{11}{15}$;

$a \geqq b$ unechte Brüche, z. B. $\frac{3}{2}, \frac{4}{4}, \frac{11}{9}$;

gleichnamige Brüche, z. B. $\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ und $\frac{5}{3}$

ungleichnamige Brüche, z. B. $\frac{3}{4}$ und $\frac{2}{5}$.

Erweitern und Kürzen

Regel: Wenn man Zähler und Nenner eines Bruches mit derselben Zahl multipliziert (erweitert) oder durch dieselbe Zahl dividiert (kürzt), ändert sich der Wert des Bruches nicht.

Beispiele: $\frac{a}{b} = \frac{ac}{bc}$; $\frac{a}{b} = \frac{a:c}{b:c}$

$\frac{2}{3} = \frac{2\cdot 5}{3\cdot 5} = \frac{10}{15}$; $\frac{14}{4} = \frac{14:2}{4:2} = \frac{7}{2} = 3\frac{1}{2}$.

Addieren und Subtrahieren

Regel: Gleichnamige Brüche werden addiert (subtrahiert), indem man ihre Zähler addiert (subtrahiert) und die Summe (Differenz) durch den gemeinsamen Nenner dividiert.

Beispiele: $\frac{a}{c} + \frac{b}{c} = \frac{a+b}{c}$; $\frac{a}{c} - \frac{b}{c} = \frac{a-b}{c}$;

$\frac{1}{5} + \frac{2}{5} + \frac{3}{5} = \frac{6}{5} = 1\frac{1}{5}$; $\frac{7}{8} - \frac{3}{8} - \frac{1}{8} + \frac{2}{8} = \frac{5}{8}$.

Will man ungleichnamige Brüche addieren (subtrahieren), so muß man sie durch Erweitern gleichnamig machen.

Beispiele:

$\frac{a}{4d} + \frac{b}{6c} = \frac{a\cdot 3c}{4d\cdot 3c} + \frac{b\cdot 2d}{6c\cdot 2d} = \frac{3ac + 2bd}{12cd}$; Hauptnenner $12cd$;

$\frac{2}{3} + \frac{1}{4} = \frac{8}{12} + \frac{3}{12} = \frac{11}{12}$; Hauptnenner 12.

Multiplizieren

Regel: Brüche werden multipliziert, indem man Zähler mit Zähler und Nenner mit Nenner multipliziert.

Beispiele: $\frac{a}{b}\cdot c = \frac{ac}{b}$; $\frac{a}{b}\cdot\frac{c}{d} = \frac{ac}{bd}$;

$\frac{5}{6}\cdot 3 = \frac{5}{6}\cdot\frac{3}{1} = \frac{5\cdot 3}{6\cdot 1} = \frac{15}{6} = 2\frac{3}{6} = 2\frac{1}{2}$;

$\frac{2}{3}\cdot\frac{4}{11} = \frac{2\cdot 4}{3\cdot 11} = \frac{8}{33}$.

Dividieren

Regel: Durch einen Bruch wird dividiert, indem man mit dem umgekehrten (reziproken) Wert multipliziert.

Beispiele: $\frac{a}{b} : \frac{c}{d} = \frac{a}{b}\cdot\frac{d}{c} = \frac{ad}{bc}$;

$\frac{a}{b} : c = \frac{a}{b} : \frac{c}{1} = \frac{a}{b}\cdot\frac{1}{c} = \frac{a}{bc}$;

$\frac{3}{8} : \frac{3}{4} = \frac{3}{8}\cdot\frac{4}{3} = \frac{3\cdot 4}{8\cdot 3} = \frac{12}{24} = \frac{1}{2}$;

$\frac{8}{9} : 4 = \frac{8}{9}\cdot\frac{1}{4} = \frac{8\cdot 1}{9\cdot 4} = \frac{2}{9}$.

Verwandeln

Unechter Bruch: $\frac{3}{2} = \frac{2}{2} + \frac{1}{2} = 1 + \frac{1}{2} = 1\frac{1}{2}$;

$\frac{15}{3} = \frac{15}{3} + \frac{2}{3} = 5\frac{2}{3}$; $3\frac{1}{8} = 3 + \frac{1}{8} = \frac{24}{8} + \frac{1}{8} = \frac{25}{8}$.

Dezimalbruch: $\frac{3}{5} = 3:5 = 6:10 = 0{,}6$;

$\frac{5}{40} = 5:40 = 0{,}125$; $\frac{9}{11} = 9:11 = 0{,}818181\ldots$

$0{,}5 = \frac{5}{10} = \frac{1}{2}$; $0{,}35 = \frac{35}{100} = \frac{7}{20}$;

$0{,}875 = \frac{875}{1000} = \frac{7\cdot 125}{8\cdot 125} = \frac{7}{8}$.

1.1.2.3. Proportionen

Will man das Verhältnis zweier Zahlen zueinander, z. B. von 15 und 3, bestimmen, so kann man sagen: 15 ist fünfmal so groß wie 3; $15:3 = 5$. Dieses Verhältnis nennt man *geometrisches Verhältnis*.

Eine *geometrische Proportion* ist eine Gleichung zwischen zwei geometrischen Verhältnissen:

$15:3 = 20:4$; $a:b = c:d$.

Ein geometrisches Verhältnis läßt sich auch als Bruch auffassen; man kann es erweitern oder kürzen:

$\frac{a}{b} = \frac{ac}{bc}$; $\frac{a}{b} = \frac{a:d}{b:d}$.

Regel: In jeder geometrischen Proportion ist das Produkt der äußeren Glieder gleich dem Produkt der inneren Glieder.

Beispiele:

$\underbrace{a:b = c:d}$ $\quad a\cdot d = b\cdot c$.

$3:6 = 4:8 \quad 3\cdot 8 = 6\cdot 4 = 24$.

Aus drei Gliedern einer Proportion läßt sich das vierte berechnen. Das unbekannte Glied bezeichnet man in der Regel mit x.

Beispiel: $a:b = c:x$; $\frac{a}{b} = \frac{c}{x}$; $ax = bc$; $x = \frac{bc}{a}$.

Aufgabe: Die Anzahl der Zähne zweier Zahnräder soll sich verhalten wie 3 : 4.
Wieviel Zähne muß das zweite Rad haben, wenn das erste 27 Zähne hat?

$z_1 : z_2 = 3:4$; $z_1 = 27$, mithin $27 : z_2 = 3:4$.

$3z_2 = 27\cdot 4$; $z_2 = (27\cdot 4):3 = 36$.

Umgekehrt läßt sich jede Produktengleichung in Proportionen umwandeln. Die Faktoren des einen Produkts werden äußere Glieder, die Faktoren des anderen innere Glieder genannt oder umgekehrt.

1.1.2.4. Prozentrechnung

Prozent, vom Hundert (v. H.), Zeichen %; 10% von 500 ist 50; hierin sind 500 der *Grundwert*, 50 der *Prozentwert*, 10 der *Prozentsatz*.

Regel: Prozentwert : Grundwert = Prozentsatz : 100.

Beispiel: 3% von 1240 M?

$x : 1240 = 3:100$;

$100x = 3\cdot 1240 = 3720$,

$x = 37{,}20$ M.

Merke auch:

1%	≙ Grundwert : 100;	1%	von 3408 =	34,08.
2%	≙ Grundwert : 50;	2%	von 3408 =	68,16.
2,5%	≙ Grundwert : 40;	2,5%	von 3408 =	85,20.
$3\frac{1}{3}$%	≙ Grundwert : 30;	$3\frac{1}{3}$%	von 3408 =	113,60.
4%	≙ Grundwert : 25;	4%	von 3408 =	136,32.
5%	≙ Grundwert : 20;	5%	von 3408 =	170,40.

Promille, vom Tausend (v. T.), Zeichen ‰
1‰ von 5000 ist 5.

Regel: Prozentwert : Grundwert = Prozentsatz : 1000.

Beispiel:
$1\frac{1}{2}$‰ von 45000 M?
$x : 45000 = 1{,}5 : 1000$,
$1000x = 45000\cdot 1{,}5 = 67500$,
$x = 67{,}50$ M.

1.1.2.5. Potenzieren

Ein Produkt mit gleichen Faktoren schreibt man:

$a = a^1$,
$a\cdot a = a^2$,
$a\cdot a\cdot a = a^3$,

$a\cdot a\ldots(m\text{-mal}) = a^m$ (»a hoch m« oder »a zur m-ten Potenz«).
In $a^m = c$ sind a die *Grundzahl* oder *Basis*, m die *Hochzahl* oder der *Exponent* und c die *Potenz*.

Regel: Potenzen kann man nur dann addieren oder subtrahieren, wenn sie gleiche Basen und gleiche Exponenten haben.

Beispiele: $2a^4 + 3a^4 = 5a^4$; $4a^2 + 3a = 4a^2 + 3a$.

Ist m eine beliebige natürliche Zahl, so ist $2m$ stets eine gerade, $2m + 1$ stets eine ungerade Zahl.

Für das Vorzeichen der Potenz gilt, je nachdem, ob der Exponent gerade ($2m$) oder ungerade ($2m + 1$) ist:

$(+a)^{2m} = +a^{2m}$ $\quad (+3)^4 = +81,$
$(-a)^{2m} = +a^{2m}$ $\quad (-3)^4 = +81,$
$(+a)^{2m+1} = +a^{2m+1}$ $\quad (+3)^3 = +27,$
$(-a)^{2m+1} = -a^{2m+1}$ $\quad (-3)^3 = -27.$

Regeln für das Potenzrechnen:

$a^m \cdot a^n = a^{m+n}, \quad 3^5 \cdot 3^2 = 3^7,$
$a^m : a^n = a^{m-n}, \quad 3^5 : 3^2 = 3^3,$
$a^m \cdot b^m = (ab)^m, \quad 3^5 \cdot 4^5 = (3 \cdot 4)^5 = 12^5,$
$a^m : b^m = (a : b)^m, \quad 8^3 : 4^3 = (8 : 4)^3 = 2^3,$
$(a^m)^n = a^{m \cdot n}, \quad (3^5)^2 = 3^{10}.$

Ferner gilt: $a^0 = 1$ für $a \neq 0$, $a^{-m} = \frac{1}{a^m}$ für $a \neq 0$.

Beachte: $1^m = 1$; $0^m = 0$.
Die Regeln gelten durch Erweiterung des Potenzbegriffes auch für rationale und irrationale Exponenten.

Anwendungen:

$(a + b)^2 = (a + b)(a + b) = a^2 + 2ab + b^2,$
$(a - b)^2 = (a - b)(a - b) = a^2 - 2ab + b^2,$
$(a + b) \cdot (a - b) = a^2 - ab + ab - b^2 = a^2 - b^2.$

Beispiele:

$a^2 \cdot (a^3 + b + a + 2a^2) = a^5 + a^2b + a^3 + 2a^4,$
$11x(2x^3 + 7x^2 + a) = 22x^4 + 77x^3 + 11ax,$
$(18a^4 - 9a^2) : 3a^2 = 6a^2 - 3a^0 = 6a^2 - 3,$
$x^m : x = x^{m-1}; \quad a^2 \cdot b^2 \cdot c^2 = (abc)^2,$
$(4a \cdot 3b)^2 = 16a^2 \cdot 9b^2 = 144a^2b^2.$

1.1.2.6. Radizieren (Wurzelziehen)

Das Radizieren ist eine Umkehrung des Potenzierens. Aus gegebener Potenz und gegebenem Exponenten ist die Basis zu ermitteln.
Löst man die Gleichung $a^m = c$ nach a auf, so ergibt sich $a = \sqrt[m]{c}$ (lies: »a gleich m-te Wurzel aus c«). Hierin sind c der *Radikand*, m der *Wurzelexponent* und a die *Wurzel*.

Regel: Wurzeln kann man nur dann addieren bzw. subtrahieren, wenn sie gleichen Wurzelexponenten und gleichen Radikanden haben.

Beispiele:

$\sqrt[4]{a} + \sqrt[4]{a} = 2\sqrt[4]{a};$
$5 \cdot \sqrt[3]{x} - 2 \cdot \sqrt[3]{x} = 3\sqrt[3]{x};$
$2\sqrt{b} + 3\sqrt{c} = 2\sqrt{b} + 3\sqrt{c}.$

Man schreibt statt $\sqrt[2]{x}$ kurz $\sqrt{x}$.

Für das Rechnen mit geraden und ungeraden Wurzelexponenten ergibt sich, wenn $a > 0$:

$\sqrt[2m]{+a} = \pm a^{\frac{1}{2m}}; \quad \sqrt[4]{16} = \pm 2; \quad \sqrt[2m]{-a}$ ist imaginär.

$\sqrt[2m+1]{+a} = +a^{\frac{1}{2m+1}}; \quad \sqrt[3]{8} = +2;$

$\sqrt[2m+1]{-a} = -a^{\frac{1}{2m+1}}; \quad \sqrt[3]{-8} = -2.$

Für das Rechnen mit Wurzeln gelten folgende *Regeln:*

$\sqrt[m]{a} \cdot \sqrt[m]{b} = \sqrt[m]{a \cdot b}; \quad \sqrt[3]{3} \cdot \sqrt[3]{9} = \sqrt[3]{3 \cdot 9} = \sqrt[3]{27} = 3.$

$\sqrt[m]{a} : \sqrt[m]{b} = \sqrt[m]{a : b}; \quad \sqrt{32} : \sqrt{2} = \sqrt{32 : 2} = \sqrt{16} = \pm 4.$

$\sqrt[m]{a^n} = \left(\sqrt[m]{a}\right)^n = a^{\frac{n}{m}} = \sqrt[\frac{m}{n}]{a}; \quad \sqrt{4^3} = (\sqrt{4})^3 = 2^3 = 8;$

$\sqrt[m]{a^m} = a^{\frac{m}{m}} = a^1 = a;$

$\sqrt[m]{a^n} = \sqrt[m \cdot p]{a^{n \cdot p}} = \sqrt[m:p]{a^{n:p}}; \quad \sqrt[4]{x^6} = \sqrt[2]{x^3};$

$\sqrt[4]{9x^8} = \sqrt[4]{9} \cdot \sqrt[4]{x^8} = x^2\sqrt{3}.$

$\sqrt[m]{\sqrt[n]{a}} = \sqrt[n]{\sqrt[m]{a}} = \sqrt[m \cdot n]{a}; \quad \sqrt[2]{\sqrt[3]{16}} = \sqrt[3]{\sqrt[2]{16}} = \sqrt[3]{4}.$

1.1.2.7. Gleichungen ersten Grades mit einer Unbekannten

Verbindet man zwei gleiche Größen durch ein Gleichheitszeichen, so erhält man eine *Gleichung*. Man unterscheidet identische Gleichungen und Bestimmungsgleichungen.

Identische Gleichungen sind z. B. $a + b = b + a$, $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$. Sie sind für jeden Wert von a und b gültig.

Eine *Bestimmungsgleichung* dagegen ist i. allg. nur für *einen* Wert der Unbekannten richtig, z. B. die Gleichung $x + 3 = 10$ für den Wert $x = 7$. Um die Bestimmungsgleichung nach der Unbekannten aufzulösen, müssen auf beiden Seiten der Gleichung dieselben Rechenoperationen ausgeführt werden, so daß sich der Wert der Gleichung nicht ändert.

Beispiele:

$x + 3 = 10$, auf beiden Seiten 3 abziehen, ergibt
$x + 3 - 3 = 10 - 3,$
$x = 7.$

$x - 5 = 20$, auf beiden Seiten 5 hinzuzählen,
$x - 5 + 5 = 20 + 5,$
$x = 25.$

$5x = 25$, beide Seiten durch 5 dividieren,
$\frac{5x}{5} = \frac{25}{5},$
$x = 5.$

$\frac{x}{3} = 15$, beide Seiten mit 3 multiplizieren,
$\frac{x}{3} \cdot 3 = 15 \cdot 3,$
$x = 45.$

Tritt die Unbekannte in einer Gleichung mehrfach auf, so sind mehrfache Umformungen nötig. Zunächst beseitigt man die Brüche, indem man beide Seiten der Gleichung mit dem Hauptnenner multipliziert; dann löst man die Klammern auf, faßt alle Glieder mit x auf einer Seite zusammen und teilt schließlich beide Seiten der Gleichung durch den Faktor von x.

Beispiele:

$\frac{12 - 3x}{6} + \frac{8x - 1}{5} - \frac{9x - 4}{7} = \frac{4x - 2}{3},$

durch den Hauptnenner $6 \cdot 5 \cdot 7 = 210$ teilen, ergibt

$(12 - 3x) \cdot 5 \cdot 7 + (8x - 1) \cdot 6 \cdot 7 - (9x - 4) \cdot 5 \cdot 6$
$= (4x - 2)\, 5 \cdot 7 \cdot 2,$
$420 - 105x + 336x - 42 - 270x + 120 = 280x - 140,$
$336x - 105x - 270x - 280x = 42 - 140 - 420 - 120,$
$336x - 655x = 42 - 680; \quad -319x = -638,$
$x = (-638) : (-319) = 2; \quad x = 2.$

1.1.2.8. Gleichungen ersten Grades mit zwei Unbekannten

Kommen in einer Gleichung zwei *Unbekannte* x, y vor, so lassen sich diese nicht eindeutig bestimmen. Der Gleichung $x + y = 100$ z. B. genügen unendlich viele Wertpaare x, y, etwa $x_1 = 20$, $y_1 = 80$; $x_2 = 40$, $y_2 = 60$ u. a. Hat man dagegen für die beiden Unbekannten zwei lineare Gleichungen, die nicht auseinander durch Umformung entstanden sind und die sich nicht widersprechen, so gibt es nur *ein* Wertpaar, das beiden Gleichungen genügt.
Zum Beispiel werden die Gleichungen $x + y = 100$, $3x - 4y = 20$ nur von den Werten $x = 60$ und $y = 40$ erfüllt. Um die zwei Unbekannten zu finden, stellt man aus den zwei Ausgangsgleichungen eine dritte Gleichung her, die nur eine der beiden Unbekannten enthält und nach dieser aufgelöst werden kann. Dies geschieht meist nach der Einsetzungs-, der Gleichsetzungs- oder der Additionsmethode.

Einsetzungsmethode

$$\begin{array}{l|l} \text{I} & 3x + 2y = 18 \\ \text{II} & 4x + \ y = 19 \end{array}$$

Aus Gleichung II folgt

II $y = 19 - 4x$.

Diesen Wert von y setzt man in I ein und erhält

I $3x + 2 \cdot (19 - 4x) = 18$;

hieraus errechnet man $x = 4$ und setzt diesen Wert in I oder II ein:

II $4 \cdot 4 + y = 19$,
$y = 19 - 16$; $y = 3$.

Gleichsetzungsmethode

$$\begin{array}{l|l} \text{I} & 3x + 2y = 18 \\ \text{II} & 4x + \ y = 19 \end{array}$$

Man löst beide Gleichungen nach y auf:

$$\begin{array}{l|l} \text{I} & y = (18 - 3x) : 2 \\ \text{II} & y = \ 19 - 4x \end{array}$$

und setzt sie einander gleich:

$(18 - 3x) : 2 = 19 - 4x$,
$18 - 3x = (19 - 4x) \cdot 2$; $x = 4$.

Durch Einsetzen in I oder II findet man

$y = 3$.

Additions- bzw. Subtraktionsmethode

$$\begin{array}{l|l} \text{I} & 3x + 2y = 18 \\ \text{II} & 4x + y \ = 19 \end{array}$$

II mit 2 erweitern und I von II abziehen:

$$\begin{array}{rl|l} \text{II} & 8x + 2y = 38 \\ -\text{I} & 3x + 2y = 18 \\ \hline & 5x \ = 20 \\ & x \ = 4. \end{array}$$

Durch Einsetzen in I oder II findet man

$= 3$.

1.1.2.9. Gleichungen zweiten Grades (quadratische Gleichungen)

Reinquadratische Gleichungen haben die Form $x^2 + q = 0$, die Unbekannte kommt nur in der zweiten Potenz vor. Für $q < 0$ treten zwei reelle Lösungen auf, die sich nur durch das Vorzeichen unterscheiden.

Beispiele: $x^2 = 25$,
$x = \pm\sqrt{25} = \pm 5$,
$x_1 = +5$; $x_2 = -5$.
$15 + 3x^2 = x^2 + 47$,
$3x^2 - x^2 = 47 - 15$,
$2x^2 = 32$,
$x^2 = 16$,
$x = \pm\sqrt{16}$,
$x_1 = 4$; $x_2 = -4$.

Gemischtquadratische Gleichungen haben die Form $x^2 + px - q = 0$. Man bringt q auf die rechte Seite und ergänzt die linke Seite zu einem Quadrat, indem man auf beiden Seiten das Glied $\left(\frac{p}{2}\right)^2$ addiert (quadratische Ergänzung):

$$x^2 + px + \left(\frac{p}{2}\right)^2 = -q + \left(\frac{p}{2}\right)^2.$$

Nun läßt sich die linke Seite als Quadrat darstellen, und man erhält

$$x^2 + 2 \cdot \frac{p}{2}\, x + \left(\frac{p}{2}\right)^2 = -q + \left(\frac{p}{2}\right)^2,$$

$$\left(x + \frac{p}{2}\right)^2 = -q + \frac{p^2}{4},$$

$$x + \frac{p}{2} = \pm\sqrt{-q + \frac{p^2}{4}},$$

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{-q + \frac{p^2}{4}}.$$

Beispiel:

$2x^2 + x + 13 = x^2 - 5x + 40$,
$x^2 + 6x = 27$,
$x^2 + 2 \cdot 3x + 3^2 = 27 + 3^2$,
$(x + 3)^2 = 27 + 9 = 36$,
$x + 3 = \pm\sqrt{36}$,
$x = -3 \pm 6$,
$x_1 = 3$; $x_2 = -9$.

Weitere Beispiele:

1. $18{,}75 - 5x = x^2 - 75$,
$18{,}75 + 75 = x^2 + 5x$,
$93{,}75 = x^2 + 2 \cdot 2{,}5x$,
$93{,}75 + 2{,}5^2 = x^2 + 2 \cdot 2{,}5x + 2{,}5^2$,
$93{,}75 + 6{,}25 = (x + 2{,}5)^2$,
$100 = (x + 2{,}5)^2$,
$\pm\sqrt{100} = x + 2{,}5$,
$\pm\sqrt{100} - 2{,}5 = x$,
$\pm 10 - 2{,}5 = x$,
$x_1 = 7{,}5$; $x_2 = -12{,}5$.

2. $x + 3x^2 = 7x + 45$,
$3x^2 + x - 7x = 45$,
$3x^2 - 6x = 45$,
$x^2 - 2x = 15$,
$x^2 - 2 \cdot 1 \cdot x + 1^2 = 15 + 1^2$,
$(x - 1)^2 = 15 + 1$,
$x - 1 = \pm\sqrt{16}$,
$x = 1 \pm \sqrt{16}$,
$x = 1 \pm 4$,
$x_1 = 5$; $x_2 = -3$.

3. $bx + x^2 - b^2 = 2b^2 + 3bx$,
$x^2 + bx - 3bx = 2b^2 + b^2$,
$x^2 - 2bx = 3b^2$,
$x^2 - 2 \cdot bx + b^2 = 3b^2 + b^2$,
$(x - b)^2 = 4b^2$,
$x - b = \pm\sqrt{4b^2}$,
$x = b \pm \sqrt{4b^2}$,
$x = b \pm 2b$,
$x_1 = 3b$; $x_2 = -b$.

1.1.2.10. Logarithmen

Das Logarithmieren ist eine Umkehrung des Potenzierens. Löst man die Gleichung $a^m = c$ nach m auf, so ergibt sich

$m = \log_a c$ (lies: m gleich Logarithmus von c zur Basis a).

Man nennt m den *Logarithmus*, a die *Basis*, c den *Numerus*. Der Logarithmus m einer Zahl c ist also derjenige Exponent, der zur Basis a die Zahl c ergibt.
Alle Logarithmen gleicher Basis bilden ein *Logarithmensystem*. Die Zahl e = 2,718 28... ist Basis der *natürlichen Logarithmen*, $\log_e c = \ln c$. Die natürlichen Logarithmen werden hauptsächlich in der höheren Mathematik benutzt. *Künstliche Logarithmen* sind alle anderen mit beliebiger Basis, z. B. $a = 2$, $\log_2 c = \text{lb}\, c$, oder $a = 10$, $\log_{10} c = \lg c$. Letztere werden Briggssche, *dekadische*, *gewöhnliche* oder *Zehner-Logarithmen* genannt. Sie werden beim Rechnen am häufigsten verwendet.

Für Zehnerpotenzen sind die BRIGGSschen Logarithmen leicht zu bestimmen:

$\lg 1000 = 3$, da $10^3 = 1000$,
$\lg 100 = 2$, da $10^2 = 100$,
$\lg 10 = 1$, da $10^1 = 10$,
$\lg 1 = 0$, da $10^0 = 1$,
$\lg 0{,}1 = -1$, da $10^{-1} = 0{,}1$,
$\lg 0{,}01 = -2$, da $10^{-2} = 0{,}01$,
$\lg 0{,}001 = -3$, da $10^{-3} = 0{,}001$ usw.

Demnach gilt, wenn c den Numerus und m dessen Logarithmus bedeuten:

$1000 > c > 100$	$3 > m > 2$
$100 > c > 10$	$2 > m > 1$
$10 > c > 1$	$1 > m > 0$
$1 > c > 0$	$0 > m > -1$
$0 > c > 0{,}1$	$-1 > m > -2$
$0{,}1 > c > 0{,}01$	$-2 > m > -3$

usw., z. B.

$\lg 348 = 2{,}541\,58$, $\lg 34{,}8 = 1{,}541\,58$, $\lg 3{,}48 = 0{,}541\,58$.

$\lg 0{,}348 = 0{,}541\,58 - 1$, $\lg 0{,}0348 = 0{,}541\,58 - 2$,

$\lg 0{,}00348 = 0{,}541\,58 - 3$.

Die Logarithmen bestehen also aus einer ganzen Zahl, der *Kennziffer*, und aus der Ziffernfolge nach dem Komma, der *Mantisse*.

Regeln: 1. Für eine Zahl mit n Ziffern vor dem Komma lautet die Kennziffer des Logarithmus $n - 1$.
2. Die negative Kennziffer des Logarithmus von Dezimalzahlen kleiner als 1 ist so groß wie die Anzahl der Nullen vor den geltenden Ziffern.
3. Zahlen mit gleicher Ziffernfolge haben die gleiche Mantisse.

Zugrunde liegen folgende vier *Gesetze*, die die Vorteile des Rechnens mit Logarithmen erkennen lassen:

$$\log (a \cdot b) = \log a + \log b, \qquad \log \frac{a}{b} = \log a - \log b,$$

$$\log a^n = n \cdot \log a, \qquad \log \sqrt[n]{a} = \log a^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{n} \log a.$$

Multiplizieren wird auf Addieren, Dividieren auf Subtrahieren, Potenzieren auf Multiplizieren und Radizieren auf Dividieren zurückgeführt.

Beispiele:

$$\lg \frac{2{,}8 \cdot 0{,}3}{1{,}7^3} = \lg 2{,}8 + \lg 0{,}3 - 3 \cdot \lg 1{,}7;$$

$$\lg \sqrt[5]{\left(\frac{1{,}4^2 \cdot 0{,}15}{19{,}2}\right)^3} = \frac{3}{5} (2 \cdot \lg 1{,}4 + \lg 0{,}15 - \lg 19{,}2).$$

Zum Rechnen mit Logarithmen dienen *Logarithmentafeln*. Die Tabelle 1.15 enthält fünfstellige Mantissen zu den Logarithmen der Zahlen 1...1000.

Beispiele:

1. $x = a \cdot b = 75{,}9 \cdot 9{,}25$ | $\lg a = 1{,}880\,24$, $\lg b = 0{,}966\,14$ (+)
$\lg x = \lg a + \lg b$ | $\lg x = 2{,}846\,38$; $x = 702$.

2. $x = a : b = 193 : 8{,}93$ | $\lg a = 2{,}285\,56$, $\lg b = 0{,}950\,85$ (−)
$\lg x = \lg a - \lg b$ | $\lg x = 1{,}334\,71$; $x = 21{,}6$.

3. $x = a^n = 7{,}77^3$ | $\lg a = 0{,}890\,42$, $3 \lg a = 2{,}671\,26$; $x = 469$.
$\lg x = n \lg a$

4. $x = \sqrt[n]{a} = \sqrt{6{,}917}$ | $\lg a = 6{,}92 = 0{,}840\,11$,
$\lg x = \frac{1}{n} \lg a$ | $\frac{1}{2} \lg a = 0{,}420\,05$; $x = 2{,}63$.

1.1.2.11. Mechanische und elektronische Rechenhilfsmittel

Rechenstab

Der Rechenstab dient vor allem zum schnellen und sicheren Multiplizieren und Dividieren mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit. Beim Taschenrechenstab sind die Skalenlänge 12,5 cm und die Ablesegenauigkeit etwa 3 Stellen, beim Normalrechenstab entsprechend 25 cm und 3 bis 4 Stellen.
Der Rechenstab besteht aus *Stabkörper*, verschiebbarer *Zunge* und *Läufer* mit Teilstrich. Körper und Zunge sind mit Skalen versehen, deren wichtigste die logarithmisch geteilten Skalen sind (Bild 1.1):

C, D	für Numeri von 1...10	Cl	für Reziprokzahlen
A, B	für Quadratzahlen	L	für Logarithmen
K	für Kubikzahlen		

Da die Skalen des Rechenstabs logarithmischen Maßstab aufweisen, liegen dem Rechenstabrechnen die *Regeln* für das logarithmische Rechnen zugrunde (vgl. 1.1.2.10.).
Die Stellenzahl ermittelt man am besten überschläglich im Kopf.

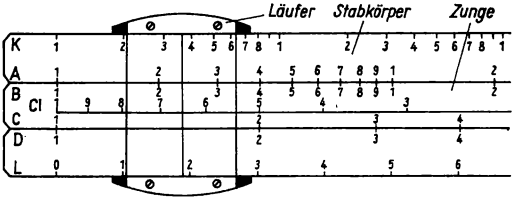


Bild 1.1. Normalrechenstab

Multiplizieren

1. Beispiel: $1{,}3 \cdot 1{,}6$

Über Teilstrich 13 der Skale D stellt man mit Hilfe des Läufers den Teilstrich 1 auf Skale C der Zunge (Bild 1.2). Unter dem Teilstrich 16 der Skale C liest man mit Hilfe des Läuferstrichs auf Skale D als Ergebnis 208 ab. Die Kommastellung findet man durch die Überschlagsrechnung $1{,}3 \cdot 1{,}6 \approx 2$, also ergibt sich $1{,}3 \cdot 1{,}6 = 2{,}08$.

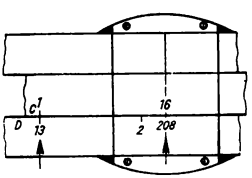


Bild 1.2. $1{,}3 \cdot 1{,}6 = 2{,}08$

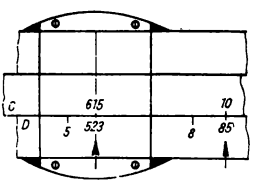


Bild 1.3. $8{,}5 \cdot 61{,}5 = 523$

2. Beispiel: $8{,}5 \cdot 61{,}5$

Über Teilstrich 85 der Skale D wird Teilstrich 10 der Skale C gestellt, unter Teilstrich 615 der Skale C auf Skale D 523 abgelesen (Bild 1.3).
Die Überschlagsrechnung ergibt $8{,}5 \cdot 61{,}5 \approx 500$, also erhält man $8{,}5 \cdot 61{,}5 = 523$.

Dividieren

Beispiel: $32{,}4 : 1{,}4$

Man stellt den Läuferstrich auf den Dividenden 324 der Skale D und bringt den Divisor 14 der Skale C darüber. Unter Teilstrich 1 (oder 10) der Skale C liest man dann auf Skale D das Ergebnis 231 ab. Durch Überschlagsrechnung $32{,}4 : 1{,}4 \approx 30 : 1{,}5 = 20$ erhält man $32{,}4 : 1{,}4 = 23{,}1$.

Quadrieren

Man findet den Quadratwert einer Zahl, indem man den Läuferstrich über die zu quadrierende Zahl auf Skale D stellt und auf Skale A das Ergebnis abliest (Bild 1.4), z. B. $3{,}1^2 = 9{,}6$.

Quadratwurzelziehen (Radizieren)

Man findet die Quadratwurzel einer Zahl, indem man diese auf Skale A einstellt und mittels des Läuferstrichs auf Skale D das Ergebnis abliest. Es ist darauf zu achten, daß – vom Komma aus gerechnet – die ungeradstelligen Zahlen auf der linken und die geradstelligen Zahlen auf der rechten Hälfte der Skale A gesucht werden (Bild 1.5).

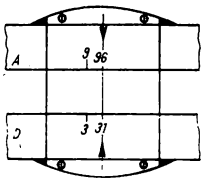


Bild 1.4. $3{,}1^2 = 9{,}6$

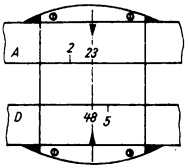


Bild 1.5. $\sqrt{23} = 4{,}8$

Ablesen von Sinus- und Tangenswerten

Zum Ablesen von *Sinuswerten* dient Skale S auf der Rückseite des Rechenstabs, auf der die Winkel von 6°...90° eingetragen sind. Man stellt den Läuferstrich auf den gegebenen Winkel, z. B. 30°, und liest auf Skale D die Ziffernfolge 500 ab. Ergebnis: sin 30° = 0,5 (Bild 1.6).

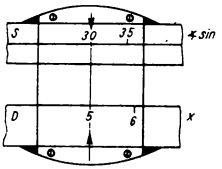


Bild 1.6. sin 30° = 0,5

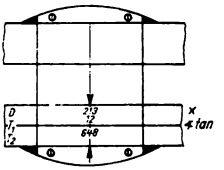


Bild 1.7. tan 12° = 0,213, tan 64,8° = 2,13

Zum Ablesen von *Tangenswerten* dienen Skale T_1 für Winkel bis 45°, Skale T_2 für Winkel über 45°. Der Tangenswert wird wie der Sinuswert auf Skale D abgelesen (Bild 1.7).

Elektronischer Taschenrechner

Er ist in den letzten Jahren zunehmend in Gebrauch gekommen und hat die Logarithmentafel nahezu völlig, den Rechenstab merklich verdrängt. Sein Vorteil ist die leicht erlernbare Bedienung; nachteilig ist, daß der Benutzer bei ausschließlicher Verwendung des Geräts das Kopf- und das schriftliche Rechnen verlernt.
Auf der Vorderseite des Gehäuses sind außer dem Schalter für Ein/Aus das Tastenfeld und das Anzeigefeld zu sehen (Bild 1.8). Bei einem Rechner mit »algebraischer Logik«, wie er hier beschrieben wird, entspricht die Reihenfolge der Eingaben im wesentlichen der mündlichen Formulierung, z. B.

[3] [×] [4] [=]

Das *Anzeigefeld* macht das Rechenergebnis durch Ziffernanzeige sichtbar.
Das *Tastenfeld* enthält:

Eingabetasten zur ziffernweisen Eingabe von Zahlen einschließlich Dezimalpunkt:

[0], [1], ..., [9] Ziffern 0 bis 9

[·] Dezimalpunkt (für Dezimalkomma)

Operationstasten für die vier Grundrechenarten einschließlich Ergebnistaste und Löschtaste:

[+] Addition [−] Subtraktion [×] Multiplikation

[÷] Division [+/−] Vorzeichenwechsel [=] Ergebnistaste

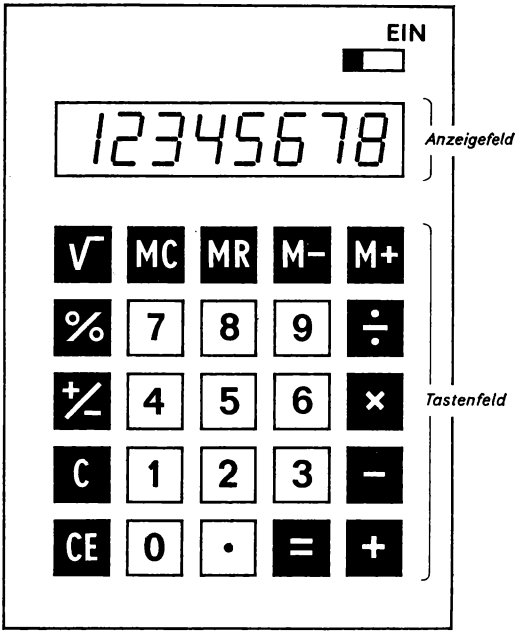


Bild 1.8. Einfacher elektronischer Taschenrechner (algebraische Logik)

[CE] Einzellöschung zur Korrektur der letzten Eingabe [von *clear entry* (engl.) Eingabe löschen]

[C] Gesamtlöschung (außer Speicher) [von *clear* (engl.) löschen]

Funktionstasten zur Ermittlung von Werten häufig vorkommender Funktionen, z. B.:

[%] Prozentrechnung [√] Quadratwurzel

Speichertasten zum Speichern von Zwischenergebnissen, damit diese nicht aufgeschrieben und bei Bedarf erneut eingegeben werden müssen:

[M+] Addieren zum Speicherinhalt

[M−] Subtrahieren vom Speicherinhalt

[MR] Abrufen des Speicherinhalts [von *memory recall* (engl.) Speicher abrufen]

[MC] Löschen des Speicherinhalts [von *memory clear* (engl.) Speicher löschen]

Die für die verschiedenen Gerätetypen unterschiedlichen Bedienungsvorschriften sind der jeweiligen Anleitung zu entnehmen.
Es folgen *Beispiele* für verschiedene Aufgabenarten, die ein einfacher Taschenrechner mit den vier Grundrechenarten, einigen Funktionen und einem Speicher zu lösen gestattet.

Aufgabe	*Eingabe*	*Anzeige*
3,6 + 2,1 = 5,7	3.6 [+] 2.1 [=]	5.7
53 − 27 = 26	53 [−] 27 [=]	26
4,5 · 2,6 = 11,7	4.5 [×] 2.6 [=]	11.7
3,14 : 2 = 1,57	3.14 [÷] 2 [=]	1.57

$2{,}07^2 \approx 4{,}28$	2.07 [×] [=]	4.2849
$8 - (-14) = 22$	8 [−] 14 [+/−] [=]	22
$3^1/_4\,\%$ v. 840 = 27,3	3.25 [×] 840 [%]	27.3
18 v. 45 = 40 %	18 [÷] 45 [%]	40
$\sqrt{51{,}36} \approx 7{,}17$	51.36 [√]	7.1665891

Speicherrechnung (Aufgabe und Eingabe)

$\sqrt{5^2 - 4^2} = 3$ 5 [×] [=] [M+] 4 [×] [=] [M−] [MR] [√]

$\frac{9 \cdot 7}{(8-3) \cdot 2} = 6{,}3$ 8 [−] 3 [×] 2 [=] [M+] 9 [×] 7 [÷] [MR] [=]

1.1.2.12. Fehlerfortpflanzung (Größtfehler)

Jeder an einem Meßgerät abgelesene Meßwert u ist mit einem gewissen *Fehler* behaftet. Die Ablesung der Temperatur an einem gewöhnlichen Zimmerthermometer erfolgt mit einer Ungenauigkeit von etwa $\pm\frac{2}{10}$ K, z. B. $u = 18{,}5$ °C, $\Delta u = \pm 0{,}2$ K. Die vollständige Angabe der Messung lautet also $u + \Delta u = 18{,}5$ °C $\pm$ 0,2 K. Dabei bezeichnet man Δu als den *absoluten (Größt-)Fehler*. Ferner nteressiert, z. B. zum Vergleich der Zuverlässigkeit der Angaben, das Verhältnis absoluter Fehler zu Meßwert, im Beispiel $\Delta u/|u| = 0{,}2 : 18{,}5 \approx 0{,}01 \triangleq 1\,\%$. Diesen Wert nennt man *relativen Fehler:*

u Meßwert,
Δu absoluter Fehler,
$\Delta u/|u|$ relativer Fehler.

Werden in einer Formel mehrere Meßwerte durch Rechenoperationen miteinander verbunden, so pflanzen sich auch die Fehler nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten fort, die für einfache Fälle in Tabelle 1.6 zusammengestellt sind.

Tabelle 1.6: Fehlerfortpflanzung bei einfachen Rechenoperationen

Rechenoperationen	y	Δy	$\frac{\Delta y}{\lvert y\rvert}$
Summe Differenz	$u + v$ $u - v$	$\Delta u + \Delta v$ $\Delta u + \Delta v$	$\frac{\Delta u + \Delta v}{\lvert u \pm v\rvert}$
Produkt	$u \cdot v$	$\Delta u\lvert v\rvert + \Delta v\lvert u\rvert$	$\frac{\Delta u}{\lvert u\rvert} + \frac{\Delta v}{\lvert v\rvert}$
Quotient	u/v	$\frac{\Delta u\lvert v\rvert + \Delta v\lvert u\rvert}{v^2}$	$\frac{\Delta u}{\lvert u\rvert} + \frac{\Delta v}{\lvert v\rvert}$
Kombination	$\frac{u \cdot v}{w}$	–	$\frac{\Delta u}{\lvert u\rvert} + \frac{\Delta v}{\lvert v\rvert} + \frac{\Delta w}{\lvert w\rvert}$
Potenz	u^n	$\Delta u\lvert n\rvert \cdot \lvert u^{n-1}\rvert$	$\lvert n\rvert \frac{\Delta u}{\lvert u\rvert}$

u, v, w Meßwerte, y Ergebnis,
$\Delta u, \Delta v, \Delta w$ absolute Fehler, Δy absoluter Fehler,
$\frac{\Delta u}{\lvert u\rvert}, \frac{\Delta v}{\lvert v\rvert}, \frac{\Delta w}{\lvert w\rvert}$ relative Fehler; $\frac{\Delta y}{\lvert y\rvert}$ relativer Fehler.

Hieraus lassen sich z. B. folgende *Regeln* erkennen:

1. Der absolute Fehler einer Summe (Differenz) ist gleich der Summe der absoluten Fehler der Summanden.
2. Der relative Fehler eines Produkts (Quotienten) ist gleich der Summe der relativen Fehler der Faktoren.

Beispiel 1: Um die Länge einer abgesteckten Strecke mit dem Bandmaß zu messen, sind zwei aufeinanderfolgende Ablesungen erforderlich: $a_1 = 10$ m, $a_2 = 7{,}60$ m. Wie groß sind die Gesamtstrecke sowie deren absoluter und relativer Fehler, wenn für jede der beiden Messungen ein absoluter Fehler von ± 1 cm angenommen wird?

$a = a_1 + a_2 = 10\text{ m} + 7{,}60\text{ m} = 17{,}60\text{ m};$
$\Delta a = \Delta a_1 + \Delta a_2 = 1\text{ cm} + 1\text{ cm} = 2\text{ cm};$
$a = 17{,}60\text{ m} \pm 0{,}02\text{ m};$
$\frac{\Delta a}{|a|} = \frac{0{,}02\text{ m}}{17{,}60\text{ m}} \approx 0{,}001 \triangleq 0{,}1\,\%.$

Beispiel 2: Der Rauminhalt eines Betonwürfels ist einschließlich absolutem und relativem Fehler zu berechnen. Für die Kantenlängen werden folgende Werte gemessen: $a = 19{,}6$ cm, $b = 20{,}1$ cm, $c = 20{,}7$ cm. Der absolute Fehler wird bei allen drei Meßwerten mit $\pm 0{,}5$ cm angenommen.

$V = a \cdot b \cdot c = 19{,}6\text{ cm} \cdot 20{,}1\text{ cm} \cdot 20{,}7\text{ cm} = 8154{,}972\text{ cm}^3;$
$\frac{\Delta V}{|V|} = \frac{\Delta a}{|a|} + \frac{\Delta b}{|b|} + \frac{\Delta c}{|c|} = \frac{0{,}5\text{ cm}}{19{,}6\text{ cm}} + \frac{0{,}5\text{ cm}}{20{,}1\text{ cm}} + \frac{0{,}5\text{ cm}}{20{,}7\text{ cm}}$
$\approx 0{,}0255 + 0{,}0249 + 0{,}0242$
$\triangleq 2{,}6\,\% + 2{,}5\,\% + 2{,}4\,\% = 7{,}5\,\%;$
$\Delta V = V \cdot \frac{\Delta V}{|V|} = 8154{,}972\text{ cm}^3 \cdot 0{,}075 \approx 612\text{ cm}^3;$
$V = (8155 \pm 612)\text{ cm}^3.$

Beispiel 3: An einem Verbraucher liegt eine Spannung von 36 V, der hindurchfließende Strom hat eine Stärke von 250 mA. Die absoluten Fehler werden mit ± 2 V bzw. ± 10 mA angegeben. Berechne den Widerstand mit absolutem und relativem Fehler!

$R = \frac{U}{I} = \frac{36\text{ V}}{0{,}250\text{ A}} = 144\,\Omega;$
$\frac{\Delta R}{|R|} = \frac{\Delta U}{|U|} + \frac{\Delta I}{|I|} = \frac{2}{36} + \frac{10}{250} \approx 0{,}06 + 0{,}04 = 0{,}1 \triangleq 10\,\%;$
$\Delta R = R \cdot \frac{\Delta R}{|R|} = 144\,\Omega \cdot 0{,}1 \approx 14\,\Omega;\ R = (144 \pm 14)\,\Omega.$

1.1.3. Geometrie

1.1.3.1. Formeln für Flächenberechnung (Planimetrie)

In Tabelle 1.7 sind Formeln für den Flächeninhalt bzw. den Umfang der einfachsten geometrischen Figuren zusammengestellt.

Tabelle 1.7: Flächeninhalte und Umfänge von Flächen

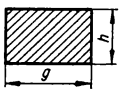
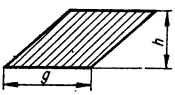
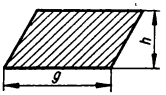
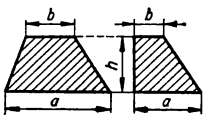
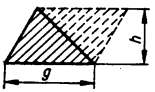
Bild	Bezeichnung und Formel
	Quadrat $A = aa = a^2$
	Rechteck $A = gh$
	Rhombus $A = gh$
	Rhomboid (Parallelogramm) $A = gh$
	Trapez $A = \frac{a+b}{2}h$
	Dreieck, allgemein $A = \frac{gh}{2}$

Tabelle 1.7 (Fortsetzung)

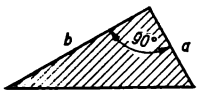
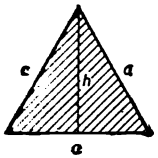
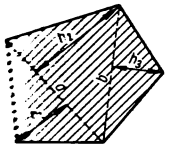
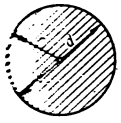
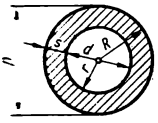
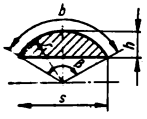
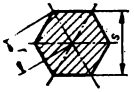
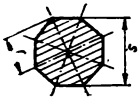
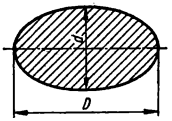
Bild	Bezeichnung und Formel
	rechtwinkliges Dreieck $A = \frac{ab}{2}$
	gleichseitiges Dreieck $A = \frac{a^2}{4}\sqrt{3};\quad h = \frac{a}{2}\sqrt{3}$
	Vieleck (Zerlegung in Dreiecke) $A = A_1 + A_2 + A_3$ $A = \frac{1}{2}(ah_1 + ah_2 + bh_3)$
	Kreis $U = \pi d = 2\pi r$ $A = \frac{\pi d^2}{4} = \pi r^2$ $\pi = 3{,}14159265\ldots \approx 3{,}14$
	Kreisring $s = R - r$ $A = \pi(R^2 - r^2)$ $A = \pi s(d + s)$ $A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}$
	Kreisausschnitt (Sektor) $b = \frac{\pi r \beta}{180°}$ $A = \frac{br}{2}$
	Kreisabschnitt (Segment) $s = \sqrt{8rh - 4h^2}$ $h = r - \sqrt{r^2 - 0{,}25s^2}$ $r = \frac{h}{2} + \frac{s^2}{8h}$ $A = \frac{br}{2} - \frac{s(r-h)}{2}$ $A \approx \frac{h}{6s}(3h^2 + 4s^2)$ $A \approx \frac{2}{3}sh$ für $\beta < 45°$
	Sechseck $A = 0{,}866s^2$ $A = \frac{3}{2}\sqrt{3}r^2 \approx 2{,}60r^2$
	Achteck $A = 0{,}828s^2$ $A = 2\sqrt{2}r^2 \approx 2{,}83r^2$

Bild	Bezeichnung und Formel
	Ellipse $U \approx \pi \frac{D + d}{2}$ $A = \frac{\pi D d}{4}$
	Weitere Näherungsformeln:
I. für $d \leqq 0{,}6D$	I. $U \approx \frac{7d}{20} + \frac{19d^2}{20D} + 2D$
II. für $d > 0{,}6D$	II. $U \approx \frac{6d}{10} + \frac{11d^2}{20D} + 2D$
	$U \approx 1{,}965 \cdot \frac{D^2 + 1{,}2Dd + d^2}{D + d}$

GULDINsche *Regeln*

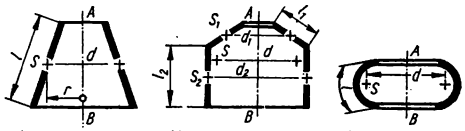
1. *Mantel einer Umdrehungsfläche*

gleich Länge der erzeugenden Linie mal Weglänge ihres Schwerpunkts:

$A_M = l \cdot \pi 2r = l \cdot \pi d$ (Bilder 1.9 a und 1.9 b)

$A_M = l_1 \pi d_1 + l_2 \pi d_2 = (l_1 + l_2) \cdot \pi d$ (Bild 1.9 c)

l Länge der erzeugenden Linie
S Schwerpunkt der erzeugenden Linie
AB Drehachse



a) b) c)

Bild 1.9. Umdrehungsflächen

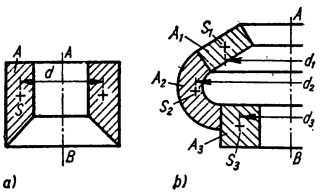
2. *Rauminhalt eines Umdrehungskörpers*

gleich erzeugende Fläche mal Weglänge ihres Schwerpunkts:

$V = A \cdot \pi 2r = A \cdot \pi d$ (Bild 1.10 a)

$V = A_1 \pi d_1 + A_2 \pi d_2 + A_3 \pi d_3$ (Bild 1.10 b)

A erzeugende Fläche
S Schwerpunkt der erzeugenden Fläche
AB Drehachse



a) b)

Bild 1.10 Umdrehungskörper

1.1.3.2. Formeln für Volumenberechnung (Stereometrie)

In Tabelle 1.8 sind Formeln für den Rauminhalt bzw. den Mantel der einfachsten Körper zusammengestellt.

Tabelle 1.8: Rauminhalte und Mantelflächen

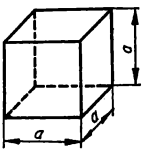
Bild	Bezeichnung und Formel
	Würfel $V = aaa = a^3$

Tabelle 1.8 (Fortsetzung)

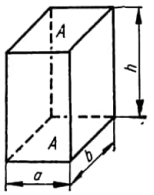
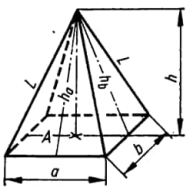
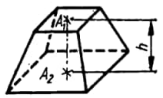
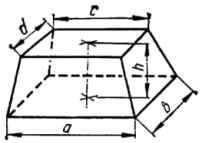
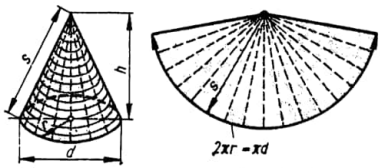
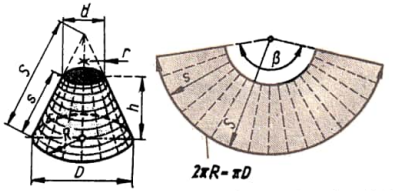
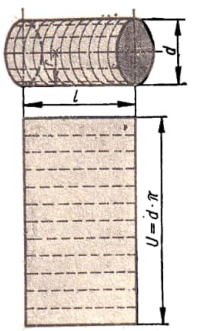
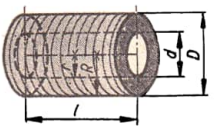
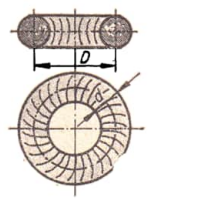
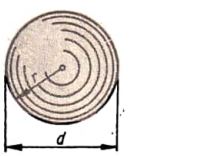
Bild	Bezeichnung und Formel
	Quader $V = Ah = abh$
	Pyramide $V = \frac{abh}{3} = \frac{Ah}{3}$ $h_b = \sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}}$ $L = \sqrt{h_b^2 + \frac{b^2}{4}}$ h_a und h_b Flächenhöhen L Kantenlänge
	Pyramidenstumpf $V = \frac{h}{3}(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2})$ $V \approx h\frac{A_1 + A_2}{2}$ A_1 und A_2 Grundflächen
	Ponton (verschieden geneigte Seitenflächen, Grundflächen einander nicht ähnlich) $V = \frac{h}{6}(2ab + ad + bc + 2cd)$
	Kegel mit Mantelfläche $A_M = \frac{\pi ds}{2}$ $V = \frac{Ah}{3} = \pi h\frac{d^2}{12}$
	Kegelstumpf mit Mantelfläche $A_M = \pi s(R + r) = \frac{\pi s(D + d)}{2}$ $V = (Rr + R^2 + r^2)\frac{\pi h}{3}$ $V = (Dd + D^2 + d^2)\frac{\pi h}{12}$ $\beta = \frac{D \cdot 180°}{S}$

Bild	Bezeichnung und Formel
	Zylinder mit Mantelfläche $A_M = \pi dl$ $V = \pi r^2 l$ $V = \frac{\pi d^2}{4} l = 0{,}785 d^2 l$
	Hohlzylinder $V = \pi(R^2 - r^2)\,l$ $V = \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}\right) l$
	Zylindrischer Ring $A_M = \pi d \pi D$ $V = \pi D \frac{\pi d^2}{4}$
	Kugel $A_M = 4\pi r^2 = \pi d^2$ $V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{\pi d^3}{6}$ $V = 4{,}189 r^3 = 0{,}523\,6 d^3$

1.1.3.3. Winkelfunktionen (Goniometrie)

Der Vollkreis wird in 360 *Grad* (360°) eingeteilt. Ein Viertel des Vollkreises umfaßt einen rechten Winkel, das sind 90°. Ein Grad wird unterteilt in 60 Winkelminuten (′), eine Winkelminute in 60 Winkelsekunden (″):

$1° = 60'$, $1' = 60''$.

Neben der sexagesimalen Unterteilung des Grades in Minuten und Sekunden verwendet man auch die dezimale Unterteilung dieses Winkels:

$7°30' = 7{,}5°$; $15°21' = 15{,}35°$; $20°15'45'' = 20{,}262\,5°$.

In der Geodäsie wird als Winkelmaß das *Gon* (gon) verwendet; 1 gon ist der vierhundertste Teil eines Vollkreises bzw. der hundertste Teil eines rechten Winkels.

$360° = 400$ gon; 1 gon $\approx 0{,}9°$; $1° \approx 1{,}1$ gon.

Je nach der Größe des Winkels unterscheidet man (Bild 1.11):

$0 < \alpha < 90°$	spitzer Winkel,
$\alpha = 90°$	rechter Winkel,
$90° < \alpha < 180°$	stumpfer Winkel,
$\alpha = 180°$	gestreckter Winkel,
$180° < \alpha < 360°$	überstumpfer Winkel.

Einführung der Winkelfunktionen

1. im *rechtwinkligen Dreieck* für spitze Winkel (Bild 1.12)

$$\text{Sinus} = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}} \quad \sin\alpha = \frac{a}{c};\ \sin\beta = \frac{b}{c}.$$

$$\text{Kosinus} = \frac{\text{anliegende Kathete}}{\text{Hypotenuse}} \quad \cos\alpha = \frac{b}{c};\ \cos\beta = \frac{a}{c}.$$

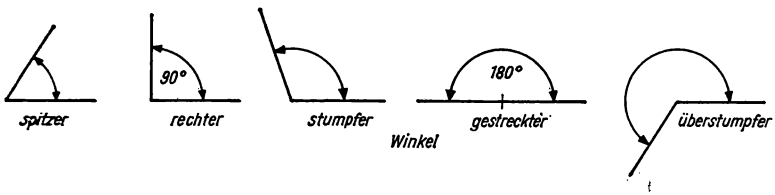


Bild 1.11
Bezeichnung der Winkel

$$\text{Tangens} = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{anliegende Kathete}} \qquad \tan\alpha = \frac{a}{b};\quad \tan\beta = \frac{b}{a}.$$

$$\text{Kotangens} = \frac{\text{anliegende Kathete}}{\text{Gegenkathete}} \qquad \cot\alpha = \frac{b}{a};\quad \cot\beta = \frac{a}{b}.$$

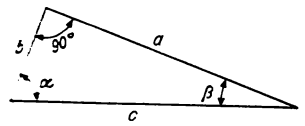


Bild 1.12
Rechtwinkliges Dreieck
(*c* Hypotenuse;
a, *b* Katheten)

… am *Einheitskreis für beliebige Winkel* (Bild 1.13)

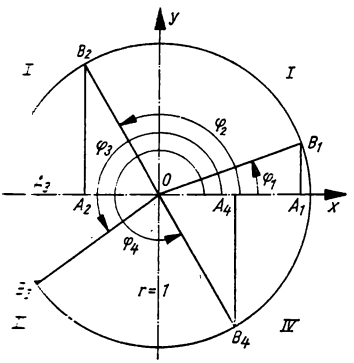


Bild 1.13
Winkelfunktionen
am Einheitskreis
(I, II, III, IV die
vier Quadranten)

$$\sin\varphi = \frac{\overline{AB}}{\overline{OB}};\quad \cos\varphi = \frac{\overline{OA}}{\overline{OB}};$$

$$\tan\varphi = \frac{\overline{AB}}{\overline{OA}};\quad \cot\varphi = \frac{\overline{OA}}{\overline{AB}}.$$

… nach oben positiv, nach unten negativ,
… nach rechts positiv, nach links negativ,
… positiv.

… auf der Winkelfunktionen in Abhängigkeit von der Größe … Winkels (Bild 1.14):

… Winkelfunktionen $y = \sin\alpha$ und $y = \cos\alpha$ sind periodisch … der Periode 2π:

$= \sin\alpha = \sin(\alpha + 2\pi)$,
$= \cos\alpha = \cos(\alpha + 2\pi)$.

… Winkelfunktionen $y = \tan\alpha$ und $y = \cot\alpha$ sind periodisch … der Periode π:

$= \tan\alpha = \tan(\alpha + \pi)$,
$= \cot\alpha = \cot(\alpha + \pi)$.

… den Tabellen 1.9 bis 1.11 sind Zusammenhänge, Werte und … zeichen bezüglich der Winkelfunktionen dargestellt.

… elle 1.9: Zusammenhang in den Quadranten

	$90° \pm \alpha$	$180° \pm \alpha$	$270° \pm \alpha$	$360° \pm \alpha$	$-\alpha$
…	$\cos\alpha$	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$\pm\sin\alpha$	$-\sin\alpha$
…	$\mp\sin\alpha$	$-\cos\alpha$	$\pm\sin\alpha$	$\cos\alpha$	$\cos\alpha$
…	$\mp\cot\alpha$	$\pm\tan\alpha$	$\mp\cot\alpha$	$\pm\tan\alpha$	$-\tan\alpha$
…	$\mp\tan\alpha$	$\pm\cot\alpha$	$\mp\tan\alpha$	$\pm\cot\alpha$	$-\cot\alpha$

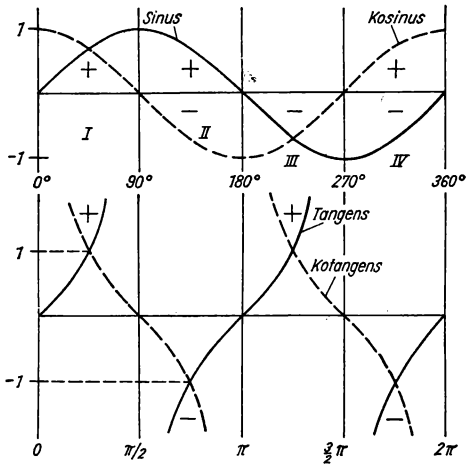


Bild 1.14. Die vier Winkelfunktionen

Beispiele:

$\sin(90° + \alpha) = \cos\alpha$, $\sin 120° = \cos 30°$,
$\sin\alpha = \sin(180° - \alpha)$, $\sin 135° = \sin 45°$,
$\cos(-\alpha) = \cos\alpha$, $\cos(-56°) = \cos 56°$,
$\tan(90° - \alpha) = \cot\alpha$, $\tan 70° = \cot 20°$.

Tabelle 1.10: Besondere Werte von Winkelfunktionen

	0°	30°	45°	60°	90°
Sinus	0	1/2	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	1
Kosinus	1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	1/2	0
Tangens	0	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}$	$\pm\infty$
Kotangens	$\pm\infty$	$\sqrt{3}$	1	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	0

Tabelle 1.11: Vorzeichen in den vier Quadranten

Quadrant	sin	cos	tan	cot
I	+	+	+	+
II	+	−	−	−
III	−	−	+	+
IV	−	+	−	−

Beziehung zwischen den Winkelfunktionen

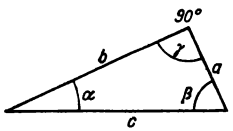
$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$,
$\tan\alpha = \sin\alpha : \cos\alpha$,
$1 + \tan^2\alpha = 1 : \cos^2\alpha$,
$1 + \cot^2\alpha = 1 : \sin^2\alpha$.

Additionstheoreme

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha\cos\beta \pm \sin\beta\cos\alpha$$
$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha\cos\beta \mp \sin\alpha\sin\beta$$
$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan\alpha \pm \tan\beta}{1 \mp \tan\alpha\tan\beta}$$
$$\cot(\alpha \pm \beta) = \frac{\cot\alpha\cot\beta \mp 1}{\cot\beta \pm \cot\alpha}$$

1.1.3.4. Berechnungen an Dreiecken (Trigonometrie)

Formeln für das rechtwinklige Dreieck (Bild 1.15):



Wegen $\alpha = 90° - \beta$ gilt
$\sin\alpha = \cos\beta = a:c$,
$\cos\alpha = \sin\beta = b:c$,
$\tan\alpha = \cot\beta = a:b$,
$\cot\alpha = \tan\beta = b:a$.

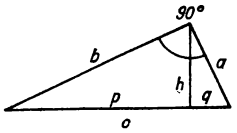


Bild 1.15
Rechtwinklige Dreiecke

Flächeninhalt $A = \frac{ab}{2}$,

$$A = \frac{bc}{2}\sin\alpha = \frac{ac}{2}\cos\alpha = \frac{b^2}{2}\tan\alpha = \frac{a^2}{2}\cot\alpha.$$

Satz des EUKLID $a^2 = qc$; $b^2 = pc$.
Satz des PYTHAGORAS $a^2 + b^2 = c^2$.
Höhensatz $h^2 = pq$.

1. Beispiel (Bild 1.16): Es soll ein Kegel mit $D = 100$ mm, $d = 60$ mm und $l = 90$ mm gedreht werden. Wie groß wird der Einstellwinkel α?

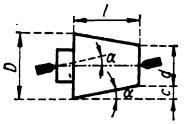


Bild 1.16. Kegel

Lösung: $c = (D - d):2$;
$c = (100\text{ mm} - 60\text{ mm}):2 = 40\text{ mm}:2 = 20\text{ mm}$,
$\tan\alpha = c:l = 20\text{ mm}:90\text{ mm} = 0{,}2222$.
Aus Tabelle 1.16 (S. 41) findet man $\alpha = 12°30' = 12^1/_2°$.

2. Beispiel (Bild 1.17): Die Radien zweier Kegelräder betragen $a = 450$ mm, $b = 240$ mm.
Wie groß sind die Winkel α und β zu wählen?

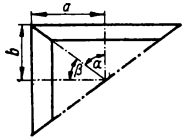


Bild 1.17. Kegelräder

Lösung: $\tan\alpha = a:b = 450\text{ mm}:240\text{ mm} = 1{,}8750$.
In Tabelle 1.16 (S. 42) findet man
für $\tan 61°60'$ 1,8807,
für $\tan 61°54'$ 1,8728;
Tafeldifferenz 0,0079,
Differenz zu $\tan\alpha$ ... 0,0022.

Es gilt die Proportion
$x:22 = 6':79$, $x \approx 2'$;
$\alpha = 61°54' + 2' = 61°56'$;
$\beta = 90° - 61°56' = 28°4'$.

Formeln für das schiefwinklige Dreieck (Bild 1.18)

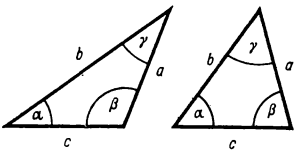


Bild 1.18
Schiefwinklige Dreiecke

Sinussatz $\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma}$;

Kosinussatz $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cdot\cos\alpha$,
$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac\cdot\cos\beta$,
$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cdot\cos\gamma$.

Bei stumpfem Winkel Vorzeichen beachten!

Tangenssatz $\frac{a+b}{a-b} = \frac{\tan\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\tan\frac{1}{2}(\alpha-\beta)}$.

MOLLWEIDEsche *Formeln*

$$(a+b):c = \cos\frac{\alpha-\beta}{2} : \sin\frac{\gamma}{2},$$
$$(a-b):c = \sin\frac{\alpha-\beta}{2} : \cos\frac{\gamma}{2}.$$

Flächeninhalt $A = \frac{ab\cdot\sin\gamma}{2} = \frac{ac\cdot\sin\beta}{2} = \frac{bc\cdot\sin\alpha}{2}$;

$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$;
$2s = a + b + c$.

Beispiel (Bild 1.19): Zwei Orte A und B liegen $c = 6{,}90$ km voneinander entfernt.
Man peilt einen Turm C an, ausgehend von der Richtung $\overline{AB}$
in A unter dem Winkel $\alpha = 63°42'$,
in B unter dem Winkel $\beta = 40°12'$.
Gesucht sind die Strecken $\overline{BC} = a$, $\overline{CD} = e$ und $\overline{BD} = d$.

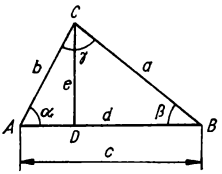


Bild 1.19
Zur Dreieckberechnung

Lösung: Aus $\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{c}{\sin\gamma}$ findet man $a = c\cdot\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$,
wobei $\gamma = 180° - \alpha - \beta = 76°6'$

$$a = \frac{6{,}9\text{ km}\cdot\sin 63°42'}{\sin 76°6'} = \frac{6{,}9\text{ km}\cdot 0{,}89649}{0{,}97072} \approx 6{,}37\text{ km}.$$

Im rechtwinkligen Dreieck BCD ist $\sin\beta = \frac{e}{a}$; $e = a\cdot\sin\beta$
$= 6{,}37\text{ km}\cdot\sin 40°12' = 6{,}37\text{ km}\cdot 0{,}64546 \approx 4{,}11$ km.
Die Strecke $d = \overline{BD}$ berechnet sich nach dem Satz des PYTHAGORAS $d = \sqrt{a^2 - e^2}$ oder nach der Beziehung $\cos\beta = \frac{d}{a}$.
$d = \sqrt{6{,}372^2 - 4{,}113^2} = \sqrt{23{,}6856\text{ km}^2} \approx 4{,}9$ km.
$d = a\cdot\cos\beta = 6{,}372\text{ km}\cdot\cos 40°12' = 6{,}372\text{ km}\cdot 0{,}7638$
$\approx 4{,}9$ km.

1.1.3.5. Geometrische Grundkonstruktionen

Eine Strecke halbieren (Bild 1.20)

Gegeben ist die Strecke $\overline{AB}$. Um A und B beschreibt man mit gleichen, genügend großen Radien Kreisbögen und verbindet deren Schnittpunkte C und D. Der Schnittpunkt E von $\overline{CD}$ (Mittellot) und $\overline{AB}$ ist der Mittelpunkt der Strecke $\overline{AB}$.

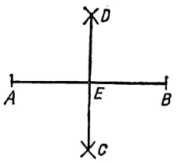


Bild 1.20. Strecke halbieren

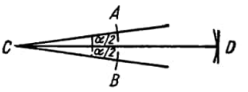


Bild 1.21. Winkel halbieren

Einen Winkel halbieren (Bild 1.21)

Gegeben ist der Winkel α. Um seinen Scheitel C beschreibt man mit beliebigem Radius einen Kreis; er schneidet die beiden Schenkel in A und B. Um A und B schlägt man mit gleichem, genügend großem Radius Kreise; sie schneiden sich in D. Die Verbindungsgerade CD halbiert den Winkel α.

Einen Winkel antragen (Bild 1.22)

Im Punkt P der Geraden AB ist der gegebene Winkel α anzutragen. Um O und um P schlägt man Kreise mit gleichen Radien. Schnittpunkte sind auf den Schenkeln von α die Punkte C und D, auf der Geraden der Punkt E. Ein Kreis um E mit dem Radius $\overline{CD}$ schneidet den um P gezogenen Kreis in F; Winkel EPF ist gleich α.

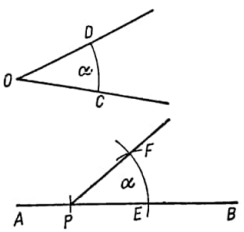


Bild 1.22. Winkel antragen

Eine Senkrechte errichten (Bild 1.23)

Auf der Geraden AB ist in P die Senkrechte zu errichten. Um Punkt P der Geraden AB schlägt man mit beliebigem Radius einen Kreis; er schneidet die Gerade in D und E. Um D und E schlägt man mit gleichem, genügend großem Radius Kreise, ihr Schnittpunkt ist F. Die Gerade PF steht senkrecht auf AB.

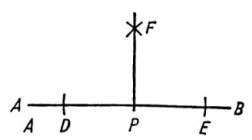


Bild 1.23. Senkrechte errichten

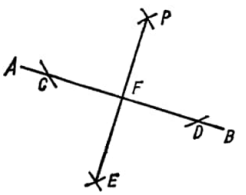


Bild 1.24. Lot fällen

Ein Lot fällen (Bild 1.24)

Vom Punkt P ist auf die Gerade AB das Lot zu fällen. Man schlägt um P einen Kreis mit genügend großem Radius; er schneidet AB in C und D. Um diese beiden Punkte werden wiederum Kreise mit gleichem, genügend großem Radius gezogen. Ihren Schnittpunkt E verbindet man mit P; $\overline{EP}$ ist das gesuchte Lot mit dem Fußpunkt F auf AB.

Eine Parallele ziehen (Bild 1.25)

Durch Punkt P ist zu der Geraden AB die Parallele zu ziehen. Man verbindet P mit einem beliebigen Punkt C von $\overline{AB}$ und schlägt um C einen Kreis mit Radius $\overline{CP}$; er schneidet $\overline{AB}$ in D. Um D und P werden wiederum Kreise mit Radius $\overline{CP}$ geschlagen; sie schneiden sich in E. Die Gerade PE läuft parallel zu $\overline{AB}$.

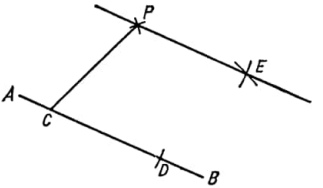


Bild 1.25
Parallele ziehen

An einen Kreis eine Tangente legen (Bild 1.26)

Von Punkt P sind an einen Kreis um Z die Tangenten zu legen. Man verbindet P mit Z, halbiert die Strecke $\overline{PZ}$ und schlägt um den Halbierungspunkt M mit der halben Streckenlänge den Kreis. Er schneidet den gegebenen Kreis in T_1 und T_2; PT_1 und PT_2 sind die gesuchten Tangenten.

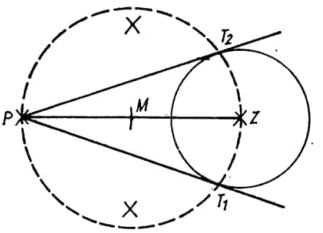


Bild 1.26
Tangenten an den Kreis

Zu einem Kreisbogen den Mittelpunkt suchen (Bild 1.27)

Man zeichnet zwei Sehnen in den Kreisbogen und errichtet auf ihnen die Mittelsenkrechten. Diese schneiden sich im Mittelpunkt M des Kreises.

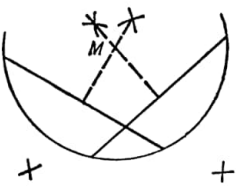


Bild 1.27. Kreismittelpunkt

1.1.3.6. Aus der analytischen Geometrie

Die analytische Geometrie beschreibt Form und Lage geometrischer Figuren durch Zahlen und Gleichungen. Im kartesischen Koordinatensystem (rechtwinklige Parallelkoordinaten) stehen die Abszissen- oder x-Achse (horizontal) und die Ordinaten- oder y-Achse (vertikal) aufeinander senkrecht. Jeder Punkt $P(x; y)$ der Ebene wird durch seine Abstände x bzw. y von der y- bzw. der x-Achse zahlenmäßig beschrieben.

Strecke (Bild 1.28): $\overline{P_1P_2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$.

Streckenmittelpunkt P_m: $x_m = \dfrac{x_1 + x_2}{2}$, $y_m = \dfrac{y_1 + y_2}{2}$.

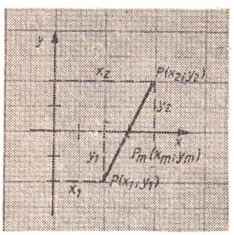


Bild 1.28. Strecke P_1P_2

Gerade (Bild 1.29): Normalform $y = mx + n$;
$m = \tan\varphi$ Anstieg, n Abschnitt auf y-Achse.

Achsenabschnittsgleichung: $\dfrac{x}{a} + \dfrac{y}{b} = 1$;

a Abschnitt auf x-Achse, b Abschnitt auf y-Achse.

Zweipunktegleichung: $\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$.

Punktrichtungsgleichung: $\frac{y - y_1}{x - x_1} = \tan\varphi$.

Beispiel: Gegeben $P_1(2; -4)$ und $P_2(6; 4)$. Gesucht Mittelpunkt und Länge der Strecke $\overline{P_1P_2}$ sowie Gleichung der Geraden durch P_1, P_2.

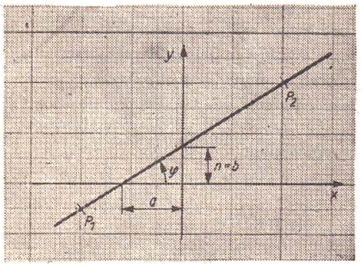


Bild 1.29. Zur Gleichung einer Geraden

Lösung: $x_m = \frac{2 + 6}{2} = 4, \quad y_m = \frac{-4 + 4}{2} = 0;$

$\overline{P_1P_2} = \sqrt{(6 - 2)^2 + (4 + 4)^2} = \sqrt{16 + 64} = \sqrt{80} \approx 8{,}9;$

Zweipunktegleichung: $\frac{y + 4}{x - 2} = \frac{4 + 4}{6 - 2} = 2;$

$y + 4 = 2x - 4; \quad y = 2x - 8.$

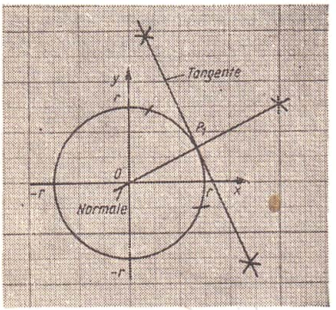


Bild 1.30. Kreis in Mittelpunktlage

Kreis (Bild 1.30): Mittelpunktlage $x^2 + y^2 = r^2$.

Tangente in P_1: $xx_1 + yy_1 = r^2$.

Normale durch P_1: $y = \frac{y_1}{x_1} x$.

Mittelpunkt $M(c; d)$: $(x - c)^2 + (y - d)^2 = r^2$.

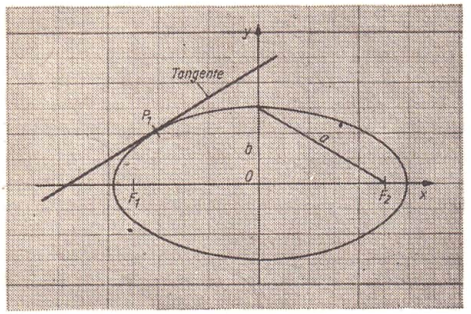


Bild 1.31. Ellipse

Ellipse, Hyperbel (Bilder 1.31 und 1.32): $\frac{x^2}{a^2} \pm \frac{y^2}{b^2} = 1.$

Tangente in P_1: $\frac{xx_1}{a^2} \pm \frac{yy_1}{b^2} = 1.$

Gleichung der Asymptoten: $\frac{x}{a} \pm \frac{y}{b} = 1.$

Mittelpunkt $M(c; d)$: $\frac{(x - c)^2}{a^2} + \frac{(y - d)^2}{b^2} = 1.$

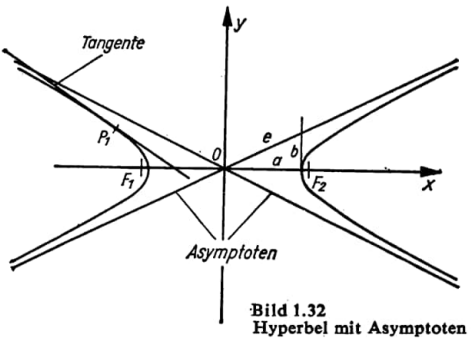


Bild 1.32
Hyperbel mit Asymptoten

Parabel (Bild 1.33): Scheitellage, nach rechts geöffnet: $y^2 = 2px$.
Tangente in P_1: $yy_1 = p(x + x_1)$.

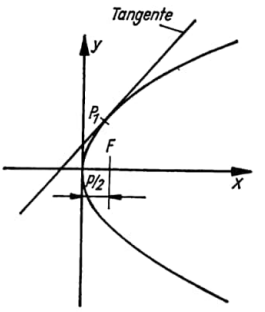


Bild 1.33. Parabel

Beispiel: Wie lautet die Gleichung der Tangente im Punkt $P_1(x_1 = 4; y_1 > 0)$ an den Kreis in Mittelpunktlage mit Radius $r = 5$?

Lösung: Kreisgleichung $x^2 + y^2 = 25$; $y = \sqrt{25 - 16} = \pm 3$, $y_1 = 3$.

Tangentengleichung $x \cdot 4 + y \cdot 3 = 25; y = -\frac{4}{3} x + \frac{25}{3}$.

1.1.4. Dualsystem

1.1.4.1. Bedeutung

Während im Dezimalsystem die Zahlen mit Hilfe der zehn Ziffern 0, 1, 2, ..., 9 dargestellt werden, verwendet man im *Dualsystem* nur die zwei Ziffern 0 und 1. Die Eins wird, um Verwechslungen mit gleichlautenden Dezimalzahlen zu vermeiden, mit L, die Null mit dem Großbuchstaben O geschrieben. Die Dualziffern L und O heißen auch *Binärzeichen*. Durch Folgen von Binärzeichen werden *Dualzahlen* dargestellt.
Das Dualsystem hat besondere Bedeutung in der maschinellen Rechentechnik erlangt, da die beiden Ziffern mit Stanzungen auf Lochstreifen und mit den physikalischen Zuständen („Aus" und „Ein") der *Bauelemente* eines Rechenautomaten (Relais, Dioden, Transistoren, Magnetkerne u. a.) gleichgesetzt werden können. Durch spezielle Schaltungen der Bauelemente werden *logische Verknüpfungen* dargestellt; diese bilden die Grundlage für die maschinelle Ausführung der *arithmetischen Operationen*.

1.1.4.2. Zahlendarstellung

Ebenso wie das Dezimalsystem ist auch das Dualsystem ein *Stellenwertsystem* (Positionssystem); der Zahlenwert ist die Summe der Produkte aus Ziffernwert und Stellenwert. Die Stellenwerte sind Potenzen der Basis des Systems: Basis 10 im Dezimalsystem, Basis 2 im Dualsystem.

Beispiel 1: Dezimalzahl 283,05

Ziffernwert	2	8	3,	0	5
Stellenwert	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}
Zahlwert	$2 \cdot 100 + 8 \cdot 10 + 3 \cdot 1 + 0 \cdot 0{,}1 + 5 \cdot 0{,}01$				
	$= 283{,}05$				

Beispiel 2: Dualzahl LOLO, LL *(rein duale Darstellung)*

Ziffernwert	L	O	L	O,	L	L
	1	0	1	0,	1	1
Stellenwert	2^3	2^2	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}
Zahlwert	$1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0{,}5 + 1 \cdot 0{,}25$					
	$= 10{,}75$					

Jede Dezimalzahl kann als Dualzahl geschrieben werden (Tabelle 1.12).

Tabelle 1.12: Zuordnung von Dualzahlen zu Dezimalzahlen

Dezimalzahl	Dualzahl	Dezimalzahl	Dualzahl
0	O	8	LOOO
1	L	9	LOOL
2	LO	10	LOLO
3	LL	11	LOLL
4	LOO	12	LLOO
5	LOL	13	LLOL
6	LLO	14	LLLO
7	LLL	15	LLLL

Neben der rein dualen Darstellung wird die *dezimal-duale* oder *Tetradendarstellung* verwendet, in der jede einzelne Dezimalziffer als vierstellige Dualzahl (Tetrade) geschrieben wird. Sie liegt z. B. der Zahlendarstellung auf Lochstreifen zugrunde.

Beispiel 3: Dezimalzahl 10,75

Tetradendarstellung

OOOL	OOOO,	OLLL	OLOL
1	0,	7	5

1.1.4.3. Umwandlung (Konvertierung) von Dezimalzahlen in Dualzahlen

Will man eine Dezimalzahl in eine Dualzahl (rein duale Darstellung) umwandeln, so zerlegt man die Dezimalzahl in eine Summe aus Zweierpotenzen. Man verwendet folgendes *Rechenschema*, in dem zuerst (a) der ganzzahlige Teil (Dezimalstellen *vor* dem Komma) und danach (b) der echte Dezimalbruch (Dezimalstellen *nach* dem Komma) umgewandelt werden:

a) Der ganzzahlige Teil wird durch 2 dividiert und der Quotient als ganzzahliger Teil und Rest geschrieben. Der Rest liefert den Ziffernwert der Dualzahlstelle, der ganzzahlige Teil wird erneut dividiert usw.

b) Der echte Dezimalbruch wird mit 2 multipliziert und das Produkt als Summe aus ganzzahligem Teil und echtem Dezimalbruch geschrieben. Der ganzzahlige Teil (0 oder 1) ergibt den Ziffernwert der Dualzahlstelle, der echte Dezimalbruch wird erneut mit 2 multipliziert usw.

Beispiel: Konvertierung der Dezimalzahl 115,8125

a) Rechenschema zur Konvertierung von 115

0←	1←	3←	7←	14←	28←	57←	115	ganzzahliger Teil
	0,5	1,5	3,5	7	14	28,5	57,5	Quotient
	1	1	1	0	0	1	1	Rest
	L	L	L	O	O	L	L	Dualziffern

1. Teilergebnis: 115 = LLLOOLL

b) Rechenschema zur Konvertierung von 0,8125

echter Dezimalbruch	0,8125	→0,625	→0,25	→0,5 →0
Produkt	1,625	1,25	0,5	1,0
ganzzahliger Teil	1	1	0	1
Dualziffer	L	L	O	L

2. Teilergebnis: 0,8125 = O,LLOL

Gesamtergebnis: 115,8125 = LLLOOLL,LLOL

1.1.4.4. Grundrechenoperationen

Die Grundrechenoperationen Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren und Dividieren lassen sich nach den gleichen Regeln wie im Dezimalsystem ausführen. Sie sind zurückführbar auf das Addieren, die Komplementbildung (Ergänzung bis zu einer vorgegebenen Zahl) und die Stellenwertverschiebung.

Addieren

Grundregeln

O	O	L	L	L
+O	+L	+O	+L	+L
=O	=L	=L	=LO*	+L
				=LL**

* Ergebnis O, Übertrag L
** Ergebnis L, Übertrag L

Beispiel:

LLOLOL	53
+LOOOLL	+35
(+LOOLLL) Übertrag	
=LOLLOOO	=88

Von rechts her wird spaltenweise addiert. Man erhält die Ergebnisziffer für die betreffende Spalte und den Übertrag, der zur linken Nachbarspalte addiert wird.

Subtrahieren

Grundregeln

L	O	L	LO	LO	LL
−O	−O	−L	−L	−L	−L
=L	=O	=O	=L*	−L	−L
				=O**	=O***

Bei spaltenweisem Subtrahieren ist für

* O − L Ergebnis L, Mangelübertrag L
** O − L − L Ergebnis 0, Mangelübertrag L
*** L − L − L Ergebnis 0, Mangelübertrag L

Beispiel:

LLOLOOLL	211
−LLOLLLO	−110
(−LLOLLOO) Mangelübertrag	
=LLOOLOL	=101

Von rechts her wird spaltenweise subtrahiert. Der Mangelübertrag wird in der linken Nachbarspalte subtrahiert.

Multiplizieren

Grundregeln

O · O = O
O · L = O
L · O = O
L · L = L

Die Teilprodukte aus erstem Faktor und Ziffernwert des zweiten Faktors sind entweder gleich Null oder gleich dem zweiten Faktor.

Beispiel: 19 · 22

LOOLL · LOLLO
LOOLL
OOOOO
LOOLL
LOOLL
OOOOO
=LLOLOOOLO =418

Dividieren

Es wird von links nach rechts schrittweise geprüft, ob sich der Divisor vom jeweiligen Rest des Dividenden abziehen läßt oder nicht; entsprechend werden als Teilergebnisse die Ziffern L oder O von links nach rechts geschrieben.

Beispiel:

```
 LOLLOLOO : LOOL = LOLOO
-LOOL
 OLOO
-OOOO        180 : 9 = 20
 LOOL
-LOOL
 OOOO
-OOOO
 OOOO
-OOOO
    O
```

Subtraktion mit Einerkomplement

Neben der für das Subtrahieren angegebenen Methode ist noch die Methode durch *Komplementbildung* üblich. Durch sie kann die Subtraktion auf eine Addition zurückgeführt werden. Das *Einerkomplement* einer Dualzahl bildet man, indem man in der Zahl alle Ziffern O durch L und alle Ziffern L durch O ersetzt.
Minuend und Subtrahend werden in gleicher Stellenzahl geschrieben. Zum Subtrahenden wird das Einerkomplement gebildet und dieses zum Minuenden addiert. Wird die vorgegebene Stellenzahl überschritten, so ist am Ergebnis folgende Korrektur auszuführen: Die Ziffer L in der vordersten Stelle wird gestrichen und in der letzten Stelle addiert.

Beispiel:

```
  LOOLLOL   77 Minuend    zum Subtrahenden OLOOLLL
- OLOOLLL  - 39 Subtrahend ist das Komplement
                                    LOLLOOO
  LOOLLOL
+ LOLLOOO        Addition des Komplements
  OLOOLOL
+         L      Korrektur
  OLOOLLO   38
```

1.1.4.5. Logische Verknüpfungen

Die Binärzeichen eignen sich zur Darstellung logischer Verknüpfungen (auch als logische Operationen bezeichnet). Dabei werden die Ziffern L und O als *Wahrheitswerte* für Variablen der zweiwertigen Logik gedeutet: Eine logische Variable kann den Wert O („nicht wahr") oder L („wahr") annehmen. Mit den logischen Variablen kann man logische Verknüpfungen ausführen (Tabelle 1.13). Ihnen entsprechen *Schaltungen* der zugeordneten Bauelemente in der Rechentechnik. Die wichtigsten Verknüpfungen werden durch *Schaltsymbole* (auch logische Elemente oder Schaltelemente genannt) bezeichnet.
Die Rechenoperationen von Dualzahlen lassen sich als Verknüpfungen von logischen Variablen auffassen und aus logischen Grundverknüpfungen zusammensetzen. Als Beispiel für eine zusammengesetzte logische Schaltung zur Addition von zwei Dualzahlen gleichen Stellenwerts ohne Berücksichtigung des Übertrages, genannt *Halbadder*, dient Bild 1.34. Der Halbadder führt folgende arithmetische Operation aus: $a + b$ ergibt Summe S Übertrag P.

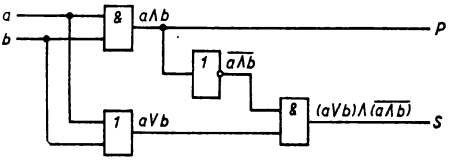
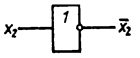
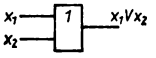
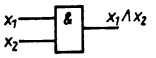
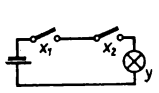
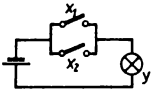
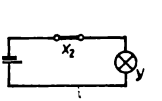


Bild 1.34. Halbadder mit Schaltbelegungstabelle

Eingangszustände		Zustände am Ausgang der einzelnen logischen Elemente			
a	b	$a \wedge b$	$\overline{a \wedge b}$	$a \vee b$	$(a \vee b) \wedge (\overline{a \wedge b})$
O	O	O	L	O	O
O	L	O	L	L	L
L	O	O	L	L	L
L	L	L	O	L	O
		↓			↓
		Übertrag			Summe

Tabelle 1.13: Logische Verknüpfungen

Bezeichnung	Konjunktion »und«	Disjunktion »oder«	Negation »nicht«
Eingangsvariable	Ausgangsvariable (symbolische Schreibweise)		
x_1 x_2	$y = x_1 \wedge x_2$	$y = x_1 \vee x_2$	$y = \bar{x}_2$
O O	O	O	L
O L	O	L	O
L O	O	L	L
L L	L	L	O
	y ist wahr, wenn gleichzeitig x_1 und x_2 wahr sind	y ist wahr, wenn x_1 oder x_2 wahr ist (oder alle beide)	y ist wahr, wenn x_2 unwahr ist
Schaltsymbol			
Schaltermodell			
	(Reihenschaltung)	(Parallelschaltung)	
y = O Stromkreis unterbrochen y = L Stromkreis geschlossen	x_i = O Schalter geöffnet x_i = L Schalter geschlossen		x_2 = O Schalter geschlossen x_2 = L Schalter geöffnet

1.1.5. Zahlentabellen

Die Tabellen enthalten Potenzen, Wurzeln, Kreisumfänge, Kreisinhalte (Tabelle 1.14), Mantissen der Ziffernfolgen 1...1000 (Tabelle 1.15), natürliche Werte der Winkelfunktionen (Tabelle 1.16), natürliche Logarithmen der Zahlen 1...1000 (Tabelle 1.17), Werte der Exponentialfunktionen e^x und e^{-x} (Tabelle 1.18) und Umrechnungswerte Neper – Dezibel (Tabelle 1.19).

Tabelle 1.14: Potenzen, Wurzeln, Kreisumfänge und Kreisinhalte **0,1 ... 10,0**

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
0,01	0,0001	0,000001	0,100	0,215	0,0314	0,00008
0,1	0,0100	0,001000	0,316	0,464	0,3142	0,00785
0,2	0,0400	0,008000	0,447	0,585	0,6283	0,03142
0,3	0,0900	0,027000	0,548	0,669	0,9425	0,07069
0,4	0,1600	0,064000	0,632	0,737	1,2566	0,12566
0,5	0,2500	0,125000	0,707	0,794	1,5708	0,19635
0,6	0,3600	0,216000	0,775	0,843	1,8850	0,28274
0,7	0,4900	0,343000	0,837	0,888	2,1991	0,38485
0,8	0,6400	0,512000	0,894	0,928	2,5133	0,50266
0,9	0,8100	0,729000	0,949	0,965	2,8274	0,63617
1,0	1,00	1,000	1,000	1,000	3,142	0,7854
1,1	1,21	1,331	1,049	1,032	3,456	0,9503
1,2	1,44	1,728	1,095	1,063	3,770	1,1310
1,3	1,69	2,197	1,140	1,091	4,084	1,3273
1,4	1,96	2,744	1,183	1,119	4,398	1,5394
1,5	2,25	3,375	1,225	1,145	4,712	1,7671
1,6	2,56	4,096	1,265	1,170	5,027	2,0106
1,7	2,89	4,913	1,304	1,194	5,341	2,2697
1,8	3,24	5,832	1,342	1,216	5,655	2,5447
1,9	3,61	6,859	1,378	1,239	5,969	2,8353
2,0	4,00	8,000	1,414	1,260	6,283	3,1416
2,1	4,41	9,261	1,449	1,281	6,597	3,4636
2,2	4,84	10,648	1,483	1,301	6,912	3,8013
2,3	5,29	12,167	1,517	1,320	7,226	4,1548
2,4	5,76	13,824	1,549	1,339	7,540	4,5239
2,5	6,25	15,625	1,581	1,357	7,854	4,9087
2,6	6,76	17,576	1,613	1,375	8,168	5,3093
2,7	7,29	19,683	1,643	1,393	8,482	5,7256
2,8	7,84	21,952	1,673	1,410	8,797	6,1575
2,9	8,41	24,389	1,703	1,426	9,111	6,6052
3,0	9,00	27,000	1,732	1,442	9,425	7,0686
3,1	9,61	29,791	1,761	1,458	9,739	7,5477
3,2	10,24	32,768	1,789	1,474	10,053	8,0425
3,3	10,89	35,937	1,817	1,489	10,367	8,5530
3,4	11,56	39,304	1,844	1,504	10,681	9,0792
3,5	12,25	42,875	1,871	1,518	10,996	9,6211
3,6	12,96	46,656	1,897	1,533	11,310	10,1788
3,7	13,69	50,653	1,924	1,547	11,624	10,7521
3,8	14,44	54,872	1,949	1,561	11,938	11,3411
3,9	15,21	59,319	1,975	1,574	12,252	11,9459
4,0	16,00	64,000	2,000	1,587	12,566	12,5664
4,1	16,81	68,921	2,025	1,601	12,881	13,2025
4,2	17,64	74,088	2,049	1,613	13,195	13,8544
4,3	18,49	79,507	2,074	1,626	13,509	14,5220
4,4	19,36	85,184	2,098	1,639	13,823	15,2053
4,5	20,25	91,125	2,121	1,651	14,137	15,9043
4,6	21,16	97,336	2,145	1,663	14,451	16,6190
4,7	22,09	103,823	2,168	1,675	14,765	17,3494
4,8	23,04	110,592	2,191	1,687	15,080	18,0956
4,9	24,01	117,649	2,214	1,699	15,394	18,8574
5,0	25,00	125,000	2,236	1,710	15,708	19,6350

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
5,0	25,00	125,00	2,236	1,710	15,708	19,64
5,1	26,01	132,65	2,258	1,721	16,022	20,43
5,2	27,04	140,61	2,280	1,733	16,336	21,24
5,3	28,09	148,88	2,302	1,744	16,650	22,06
5,4	29,16	157,46	2,324	1,754	16,965	22,90
5,5	30,25	166,38	2,345	1,765	17,279	23,76
5,6	31,36	175,62	2,366	1,776	17,593	24,63
5,7	32,49	185,19	2,387	1,786	17,907	25,52
5,8	33,64	195,11	2,408	1,797	18,221	26,42
5,9	34,81	205,38	2,429	1,807	18,535	27,34
6,0	36,00	216,00	2,450	1,817	18,850	28,27
6,1	37,21	226,98	2,470	1,827	19,164	29,22
6,2	38,44	238,33	2,490	1,837	19,478	30,19
6,3	39,69	250,05	2,510	1,847	19,792	31,17
6,4	40,96	262,14	2,530	1,857	20,106	32,17
6,5	42,25	274,63	2,550	1,866	20,420	33,18
6,6	43,56	287,50	2,569	1,876	20,735	34,21
6,7	44,89	300,76	2,588	1,885	21,049	35,26
6,8	46,24	314,43	2,608	1,894	21,363	36,32
6,9	47,61	328,51	2,627	1,904	21,677	37,39
7,0	49,00	343,00	2,646	1,913	21,991	38,48
7,1	50,41	357,91	2,665	1,922	22,305	39,59
7,2	51,84	373,25	2,683	1,931	22,619	40,72
7,3	53,29	389,02	2,702	1,940	22,934	41,85
7,4	54,76	405,22	2,720	1,949	23,248	43,01
7,5	56,25	421,88	2,739	1,957	23,562	44,18
7,6	57,76	438,98	2,757	1,966	23,876	45,36
7,7	59,29	456,53	2,775	1,975	24,190	46,57
7,8	60,84	474,55	2,793	1,983	24,504	47,78
7,9	62,41	493,04	2,811	1,992	24,819	49,02
8,0	64,00	512,00	2,828	2,000	25,133	50,27
8,1	65,61	531,44	2,846	2,008	25,447	51,53
8,2	67,24	551,37	2,864	2,017	25,761	52,81
8,3	68,89	571,79	2,881	2,025	26,075	54,11
8,4	70,56	592,70	2,898	2,033	26,389	55,42
8,5	72,25	614,13	2,915	2,041	26,704	56,75
8,6	73,96	636,06	2,933	2,049	27,018	58,09
8,7	75,69	658,50	2,950	2,057	27,332	59,45
8,8	77,44	681,47	2,966	2,065	27,646	60,82
8,9	79,21	704,97	2,983	2,072	27,960	62,21
9,0	81,00	729,00	3,000	2,080	28,274	63,62
9,1	82,81	753,57	3,017	2,088	28,588	65,04
9,2	84,64	778,69	3,033	2,095	28,903	66,48
9,3	86,49	804,36	3,050	2,103	29,217	67,93
9,4	88,36	830,58	3,066	2,111	29,531	69,40
9,5	90,25	857,38	3,082	2,118	29,845	70,88
9,6	92,16	884,74	3,098	2,125	30,159	72,38
9,7	94,09	912,67	3,115	2,133	30,473	73,90
9,8	96,04	941,19	3,131	2,140	30,788	75,43
9,9	98,01	970,30	3,146	2,147	31,102	76,98
10,0	100,00	1000,00	3,162	2,154	31,416	78,54

Kommaverschiebung nach rechts

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
21,5	462,3	9938	4,637	2,781	67,54	363,1
215	46230	9938000	–	–	675,4	36310
2150	4 Stellen	6 Stellen	46,37	–	2 Stellen	4 Stellen

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) 10,0...20,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
10,0	100,00	1000,00	3,162	2,154	31,416	78,54
10,1	102,01	1030,30	3,178	2,162	31,730	80,12
10,2	104,04	1061,21	3,194	2,169	32,044	81,71
10,3	106,09	1092,73	3,209	2,176	32,358	83,32
10,4	108,16	1124,86	3,225	2,183	32,673	84,95
10,5	110,25	1157,63	3,240	2,190	32,987	86,59
10,6	112,4	1191	3,256	2,197	33,30	88,25
10,7	114,5	1225	3,271	2,204	33,62	89,92
10,8	116,6	1260	3,286	2,210	33,93	91,61
10,9	118,8	1295	3,302	2,217	34,24	93,31
11,0	121,0	1331	3,317	2,224	34,56	95,03
11,1	123,2	1368	3,332	2,231	34,87	96,77
11,2	125,4	1405	3,347	2,237	35,19	98,52
11,3	127,7	1443	3,362	2,244	35,50	100,3
11,4	130,0	1482	3,376	2,251	35,81	102,1
11,5	132,3	1521	3,391	2,257	36,13	103,9
11,6	134,6	1561	3,406	2,264	36,44	105,7
11,7	136,9	1602	3,421	2,270	36,76	107,5
11,8	139,2	1643	3,435	2,277	37,07	109,4
11,9	141,6	1685	3,450	2,283	37,38	111,2
12,0	144,0	1728	3,464	2,289	37,70	113,1
12,1	146,4	1772	3,479	2,296	38,01	115,0
12,2	148,8	1816	3,493	2,302	38,33	116,9
12,3	151,3	1861	3,507	2,308	38,64	118,8
12,4	153,8	1907	3,521	2,315	38,96	120,8
12,5	156,3	1953	3,536	2,321	39,27	122,7
12,6	158,8	2000	3,550	2,327	39,58	124,7
12,7	161,3	2048	3,564	2,333	39,90	126,7
12,8	163,8	2097	3,578	2,339	40,21	128,7
12,9	166,4	2147	3,592	2,345	40,53	130,7
13,0	169,0	2197	3,606	2,351	40,84	132,7
13,1	171,6	2248	3,619	2,357	41,16	134,8
13,2	174,2	2300	3,633	2,363	41,47	136,8
13,3	176,9	2353	3,647	2,369	41,78	138,9
13,4	179,6	2406	3,661	2,375	42,10	141,0
13,5	182,3	2460	3,674	2,381	42,41	143,1
13,6	185,0	2515	3,688	2,387	42,73	145,3
13,7	187,7	2571	3,701	2,393	43,04	147,4
13,8	190,4	2628	3,715	2,399	43,35	149,6
13,9	193,2	2686	3,728	2,404	43,67	151,7
14,0	196,0	2744	3,742	2,410	43,98	153,9
14,1	198,8	2803	3,755	2,416	44,30	156,1
14,2	201,6	2863	3,768	2,422	44,61	158,4
14,3	204,5	2924	3,782	2,427	44,93	160,6
14,4	207,4	2986	3,795	2,433	45,24	162,9
14,5	210,3	3049	3,808	2,438	45,55	165,1
14,6	213,2	3112	3,821	2,444	45,87	167,4
14,7	216,1	3177	3,834	2,450	46,18	169,7
14,8	219,0	3242	3,847	2,455	46,50	172,0
14,9	222,0	3308	3,860	2,461	46,81	174,4
15,0	25,0	3375	3,873	2,466	47,12	176,7

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
15,0	225,0	3375	3,873	2,466	47,12	176,7
15,1	228,0	3443	3,886	2,472	47,44	179,1
15,2	231,0	3512	3,899	2,477	47,75	181,5
15,3	234,1	3582	3,912	2,483	48,07	183,9
15,4	237,2	3652	3,924	2,488	48,38	186,3
15,5	240,3	3724	3,937	2,493	48,69	188,7
15,6	243,4	3796	3,950	2,499	49,01	191,1
15,7	246,5	3870	3,962	2,504	49,32	193,6
15,8	249,6	3944	3,975	2,509	49,64	196,1
15,9	252,8	4020	3,987	2,515	49,95	198,6
16,0	256,0	4096	4,000	2,520	50,27	201,1
16,1	259,2	4173	4,012	2,525	50,58	203,6
16,2	262,4	4252	4,025	2,530	50,89	206,1
16,3	265,7	4331	4,037	2,535	51,21	208,7
16,4	269,0	4411	4,050	2,541	51,52	211,2
16,5	272,3	4492	4,062	2,546	51,84	213,8
16,6	275,6	4574	4,074	2,551	52,15	216,4
16,7	278,9	4657	4,087	2,556	52,47	219,0
16,8	282,2	4742	4,099	2,561	52,78	221,7
16,9	285,6	4827	4,111	2,566	53,09	224,3
17,0	289,0	4913	4,123	2,571	53,41	227,0
17,1	292,4	5000	4,135	2,576	53,72	229,7
17,2	295,8	5088	4,147	2,581	54,04	232,4
17,3	299,3	5178	4,159	2,586	54,35	235,1
17,4	302,8	5268	4,171	2,591	54,66	237,8
17,5	306,3	5359	4,183	2,596	54,98	240,5
17,6	309,8	5452	4,195	2,601	55,29	243,3
17,7	313,3	5545	4,207	2,606	55,61	246,1
17,8	316,8	5640	4,219	2,611	55,92	248,8
17,9	320,4	5735	4,231	2,616	56,24	251,6
18,0	324,0	5832	4,243	2,621	56,55	254,5
18,1	327,6	5930	4,254	2,626	56,86	257,3
18,2	331,2	6029	4,266	2,630	57,18	260,2
18,3	334,9	6128	4,278	2,635	57,49	263,0
18,4	338,6	6230	4,290	2,640	57,81	265,9
18,5	342,3	6332	4,301	2,645	58,12	268,8
18,6	346,0	6435	4,313	2,650	58,43	271,7
18,7	349,7	6539	4,324	2,654	58,75	274,6
18,8	353,4	6645	4,336	2,659	59,06	277,6
18,9	357,2	6751	4,347	2,664	59,38	280,6
19,0	361,0	6859	4,359	2,668	59,69	283,5
19,1	364,8	6968	4,370	2,673	60,00	286,5
19,2	368,6	7078	4,382	2,678	60,32	289,5
19,3	372,5	7189	4,393	2,682	60,63	292,6
19,4	376,4	7301	4,405	2,687	60,95	295,6
19,5	380,3	7415	4,416	2,692	61,26	298,6
19,6	384,2	7530	4,427	2,696	61,58	301,7
19,7	388,1	7645	4,438	2,701	61,89	304,8
19,8	392,0	7762	4,450	2,705	62,20	307,9
19,9	396,0	7881	4,461	2,710	62,52	311,0
20,0	400,0	8000	4,472	2,714	62,83	314,2

Kommaverschiebung nach rechts

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
21,5 21 500	462,3 6 Stellen	9938 9 Stellen	4,637 –	2,781 27,81	67,54 3 Stellen	363,1 6 Stellen

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) **20,0...30,0**

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
20,0	400,0	8000	4,472	2,714	62,83	314,2
20,1	404,0	8121	4,483	2,719	63,15	317,3
20,2	408,0	8242	4,494	2,723	63,46	320,5
20,3	412,1	8365	4,506	2,728	63,77	323,7
20,4	416,2	8490	4,517	2,732	64,09	326,9
20,5	420,3	8615	4,528	2,737	64,40	330,1
20,6	424,4	8742	4,539	2,741	64,72	333,3
20,7	428,5	8870	4,550	2,746	65,03	336,5
20,8	432,6	8999	4,561	2,750	65,35	339,8
20,9	436,8	9129	4,572	2,755	65,66	343,1
21,0	441,0	9261	4,583	2,759	65,97	346,4
21,1	445,2	9394	4,593	2,763	66,29	349,7
21,2	449,4	9528	4,604	2,768	66,60	353,0
21,3	453,7	9664	4,615	2,772	66,92	356,3
21,4	458,0	9800	4,626	2,776	67,23	359,7
21,5	462,3	9938	4,637	2,781	67,54	363,1
21,6	466,6	10078	4,648	2,785	67,86	366,4
21,7	470,9	10218	4,658	2,789	68,17	369,8
21,8	475,2	10360	4,669	2,794	68,49	373,3
21,9	479,6	10503	4,680	2,798	68,80	376,7
22,0	484,0	10648	4,690	2,802	69,12	380,1
22,1	488,4	10794	4,701	2,806	69,43	383,6
22,2	492,8	10941	4,712	2,811	69,74	387,1
22,3	497,3	11090	4,722	2,815	70,06	390,6
22,4	501,8	11239	4,733	2,819	70,37	394,1
22,5	506,3	11391	4,743	2,823	70,69	397,6
22,6	510,8	11543	4,754	2,827	71,00	401,1
22,7	515,3	11697	4,764	2,831	71,31	404,7
22,8	519,8	11852	4,775	2,836	71,63	408,3
22,9	524,4	12009	4,785	2,840	71,94	411,9
23,0	529,0	12167	4,796	2,844	72,26	415,5
23,1	533,6	12326	4,806	2,848	72,57	419,1
23,2	538,2	12487	4,817	2,852	72,88	422,7
23,3	542,9	12649	4,827	2,856	73,20	426,4
23,4	547,6	12813	4,837	2,860	73,51	430,1
23,5	552,3	12978	4,848	2,864	73,83	433,7
23,6	557,0	13144	4,858	2,868	74,14	437,4
23,7	561,7	13312	4,868	2,872	74,46	441,2
23,8	566,4	13481	4,879	2,876	74,77	444,9
23,9	571,2	13652	4,889	2,880	75,08	448,6
24,0	576,0	13824	4,899	2,884	75,40	452,4
24,1	580,8	13998	4,909	2,888	75,71	456,2
24,2	585,6	14172	4,919	2,892	76,03	460,0
24,3	590,5	14349	4,930	2,896	76,34	463,8
24,4	595,4	14527	4,940	2,900	76,65	467,6
24,5	600,3	14706	4,950	2,904	76,97	471,4
24,6	605,2	14887	4,960	2,908	77,28	475,3
24,7	610,1	15069	4,970	2,912	77,60	479,2
24,8	615,0	15253	4,980	2,916	77,91	483,1
24,9	620,0	15438	4,990	2,920	78,23	487,0
25,0	625,0	15625	5,000	2,924	78,54	490,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
25,0	625,0	15625	5,000	2,924	78,54	490,9
25,1	630,0	15813	5,010	2,928	78,85	494,8
25,2	635,0	16003	5,020	2,932	79,17	498,8
25,3	640,1	16194	5,030	2,936	79,48	502,7
25,4	645,2	16387	5,040	2,940	79,80	506,7
25,5	650,3	16581	5,050	2,943	80,11	510,7
25,6	655,4	16777	5,060	2,947	80,42	514,7
25,7	660,5	16975	5,070	2,951	80,74	518,7
25,8	665,6	17174	5,079	2,955	81,05	522,8
25,9	670,8	17374	5,089	2,959	81,37	526,9
26,0	676,0	17576	5,099	2,962	81,68	530,9
26,1	681,2	17780	5,109	2,966	82,00	535,0
26,2	686,4	17985	5,119	2,970	82,31	539,1
26,3	691,7	18191	5,128	2,974	82,62	543,3
26,4	697,0	18400	5,138	2,978	82,94	547,4
26,5	702,3	18610	5,148	2,981	83,25	551,5
26,6	707,6	18821	5,158	2,985	83,57	555,7
26,7	712,9	19034	5,167	2,989	83,88	559,9
26,8	718,2	19249	5,177	2,993	84,19	564,1
26,9	723,6	19465	5,187	2,996	84,51	568,3
27,0	729,0	19683	5,196	3,000	84,82	572,6
27,1	734,4	19903	5,206	3,004	85,14	576,8
27,2	739,8	20124	5,215	3,007	85,45	581,1
27,3	745,3	20346	5,225	3,011	85,77	585,3
27,4	750,8	20571	5,235	3,015	86,08	589,6
27,5	756,3	20797	5,244	3,018	86,39	594,0
27,6	761,8	21025	5,254	3,022	86,71	598,3
27,7	767,3	21254	5,263	3,026	87,02	602,6
27,8	772,8	21485	5,273	3,029	87,34	607,0
27,9	778,4	21718	5,282	3,033	87,65	611,4
28,0	784,0	21952	5,292	3,037	87,96	615,8
28,1	789,6	22188	5,301	3,040	88,28	620,2
28,2	795,2	22426	5,310	3,044	88,59	624,6
28,3	800,9	22665	5,320	3,047	88,91	629,0
28,4	806,6	22906	5,329	3,051	89,22	633,5
28,5	812,3	23149	5,339	3,055	89,54	637,9
28,6	818,0	23394	5,348	3,058	89,85	642,4
28,7	823,7	23640	5,357	3,062	90,16	646,9
28,8	829,4	23888	5,367	3,065	90,48	651,4
28,9	835,2	24138	5,376	3,069	90,79	656,0
29,0	841,0	24389	5,385	3,072	91,11	660,5
29,1	846,8	24642	5,394	3,076	91,42	665,1
29,2	852,6	24897	5,404	3,079	91,73	669,7
29,3	858,5	25154	5,413	3,083	92,05	674,3
29,4	864,4	25412	5,422	3,086	92,36	678,9
29,5	870,3	25672	5,431	3,090	92,68	683,5
29,6	876,2	25934	5,441	3,093	92,99	688,1
29,7	882,1	26198	5,450	3,097	93,31	692,8
29,8	888,0	26464	5,459	3,100	93,62	697,5
29,9	894,0	26731	5,468	3,104	93,93	702,2
30,0	900,0	27000	5,477	3,107	94,25	706,9

Kommaverschiebung nach links

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
21,5	462,3	9938	4,637	2,781	67,54	363,1
2,15	4,623	9,938	–	–	6,754	3,63
0,215	4 Stellen	6 Stellen	0,4637	–	2 Stellen	4 Stellen

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) 30,0...40,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
30,0	900,0	27000	5,477	3,107	94,25	706,9
30,1	906,0	27271	5,486	3,111	94,56	711,6
30,2	912,0	27544	5,495	3,114	94,88	716,3
30,3	918,1	27818	5,505	3,117	95,19	721,1
30,4	924,2	28094	5,514	3,121	95,50	725,8
30,5	930,3	28373	5,523	3,124	95,82	730,6
30,6	936,4	28653	5,532	3,128	96,13	735,4
30,7	942,5	28934	5,541	3,131	96,45	740,2
30,8	948,6	29218	5,550	3,135	96,76	745,1
30,9	954,8	29504	5,559	3,138	97,08	749,9
31,0	961,0	29791	5,568	3,141	97,39	754,8
31,1	967,2	30080	5,577	3,145	97,70	759,6
31,2	973,4	30371	5,586	3,148	98,02	764,5
31,3	979,7	30664	5,595	3,151	98,33	769,4
31,4	986,0	30959	5,604	3,155	98,65	774,4
31,5	992,3	31256	5,612	3,158	98,96	779,3
31,6	998,6	31554	5,621	3,162	99,27	784,3
31,7	1005	31855	5,630	3,165	99,59	789,2
31,8	1011	32157	5,639	3,168	99,90	794,2
31,9	1018	32462	5,648	3,171	100,2	799,2
32,0	1024	32768	5,657	3,175	100,5	804,2
32,1	1030	33076	5,666	3,178	100,8	809,3
32,2	1037	33386	5,675	3,181	101,2	814,3
32,3	1043	33698	5,683	3,185	101,5	819,4
32,4	1050	34012	5,692	3,188	101,8	824,5
32,5	1056	34328	5,701	3,191	102,1	829,6
32,6	1063	34646	5,710	3,195	102,4	834,7
32,7	1069	34966	5,718	3,198	102,7	839,8
32,8	1076	35288	5,727	3,201	103,0	845,0
32,9	1082	35611	5,736	3,204	103,4	850,1
33,0	1089	35937	5,745	3,208	103,7	855,3
33,1	1096	36265	5,753	3,211	104,0	860,5
33,2	1102	36594	5,762	3,214	104,3	865,7
33,3	1109	36926	5,771	3,217	104,6	870,9
33,4	1116	37260	5,779	3,220	104,9	876,2
33,5	1122	37595	5,788	3,224	105,2	881,4
33,6	1129	37933	5,797	3,227	105,6	886,7
33,7	1136	38273	5,805	3,230	105,9	892,0
33,8	1142	38614	5,814	3,233	106,2	897,3
33,9	1149	38958	5,822	3,236	106,5	902,6
34,0	1156	39304	5,831	3,240	106,8	907,9
34,1	1163	39652	5,840	3,243	107,1	913,3
34,2	1170	40002	5,848	3,246	107,4	918,6
34,3	1176	40354	5,857	3,249	107,8	924,0
34,4	1183	40708	5,865	3,252	108,1	929,4
34,5	1190	41064	5,874	3,255	108,4	934,8
34,6	1197	41422	5,882	3,259	108,7	940,2
34,7	1204	41782	5,891	3,262	109,0	945,7
34,8	1211	42144	5,899	3,265	109,3	951,1
34,9	1218	42509	5,908	3,268	109,6	956,6
35,0	1225	42875	5,916	3,271	110,0	962,1

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
35,0	1225	42875	5,916	3,271	110,0	962,1
35,1	1232	43244	5,925	3,274	110,3	967,6
35,2	1239	43614	5,933	3,277	110,6	973,1
35,3	1246	43987	5,941	3,280	110,9	978,7
35,4	1253	44362	5,950	3,283	111,2	984,2
35,5	1260	44739	5,958	3,287	111,5	989,8
35,6	1267	45118	5,967	3,290	111,8	995,4
35,7	1274	45499	5,975	3,293	112,2	1001
35,8	1282	45883	5,983	3,296	112,5	1007
35,9	1289	46268	5,992	3,299	112,8	1012
36,0	1296	46656	6,000	3,302	113,1	1018
36,1	1303	47046	6,008	3,305	113,4	1024
36,2	1310	47438	6,017	3,308	113,7	1029
36,3	1318	47832	6,025	3,311	114,0	1035
36,4	1325	48229	6,033	3,314	114,4	1041
36,5	1332	48627	6,042	3,317	114,7	1046
36,6	1340	49028	6,050	3,320	115,0	1052
36,7	1347	49431	6,058	3,323	115,3	1058
36,8	1354	49836	6,066	3,326	115,6	1064
36,9	1362	50243	6,075	3,329	115,9	1069
37,0	1369	50653	6,083	3,332	116,2	1075
37,1	1376	51065	6,091	3,335	116,6	1081
37,2	1384	51479	6,099	3,338	116,9	1087
37,3	1391	51895	6,107	3,341	117,2	1093
37,4	1399	52314	6,116	3,344	117,5	1099
37,5	1406	52734	6,124	3,347	117,8	1104
37,6	1414	53157	6,132	3,350	118,1	1110
37,7	1421	53583	6,140	3,353	118,4	1116
37,8	1429	54010	6,148	3,356	118,8	1122
37,9	1436	54440	6,156	3,359	119,1	1128
38,0	1444	54872	6,164	3,362	119,4	1134
38,1	1452	55306	6,173	3,365	119,7	1140
38,2	1459	55743	6,181	3,368	120,0	1146
38,3	1467	56182	6,189	3,371	120,3	1152
38,4	1475	56623	6,197	3,374	120,6	1158
38,5	1482	57067	6,205	3,377	121,0	1164
38,6	1490	57512	6,213	3,380	121,3	1170
38,7	1498	57961	6,221	3,382	121,6	1176
38,8	1505	58411	6,229	3,385	121,9	1182
38,9	1513	58864	6,237	3,388	122,2	1188
39,0	1521	59319	6,245	3,391	122,5	1195
39,1	1529	59776	6,253	3,394	122,8	1201
39,2	1537	60236	6,261	3,397	123,2	1207
39,3	1544	60698	6,269	3,400	123,5	1213
39,4	1552	61163	6,277	3,403	123,8	1219
39,5	1560	61630	6,285	3,406	124,1	1225
39,6	1568	62099	6,293	3,409	124,4	1232
39,7	1576	62571	6,301	3,411	124,7	1238
39,8	1584	63045	6,309	3,414	125,0	1244
39,9	1592	63521	6,317	3,417	125,3	1250
40,0	1600	64000	6,325	3,420	125,7	1257

Kommaverschiebung nach links

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
21,5	462,3	9938	4,637	2,781	67,54	363,1
0,021 5	6 Stellen	9 Stellen	–	0,278 1	3 Stellen	6 Stellen

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) 40,0...50,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
40,0	1600	64000	6,325	3,420	125,7	1257
40,1	1608	64481	6,332	3,423	126,0	1263
40,2	1616	64965	6,340	3,426	126,3	1269
40,3	1624	65451	6,348	3,428	126,6	1276
40,4	1632	65939	6,356	3,431	126,9	1282
40,5	1640	66430	6,364	3,434	127,2	1288
40,6	1648	66923	6,372	3,437	127,5	1295
40,7	1656	67419	6,380	3,440	127,9	1301
40,8	1665	67917	6,387	3,443	128,2	1307
40,9	1673	68418	6,395	3,445	128,5	1314
41,0	1681	68921	6,403	3,448	128,8	1320
41,1	1689	69427	6,411	3,451	129,1	1327
41,2	1697	69935	6,419	3,454	129,4	1333
41,3	1706	70445	6,427	3,457	129,7	1340
41,4	1714	70958	6,434	3,459	130,1	1346
41,5	1722	71473	6,442	3,462	130,4	1353
41,6	1731	71991	6,450	3,465	130,7	1359
41,7	1739	72512	6,458	3,468	131,0	1366
41,8	1747	73035	6,465	3,471	131,3	1372
41,9	1756	73560	6,473	3,473	131,6	1379
42,0	1764	74088	6,481	3,476	131,9	1385
42,1	1772	74618	6,488	3,479	132,3	1392
42,2	1781	75151	6,496	3,482	132,6	1399
42,3	1789	75687	6,504	3,484	132,9	1405
42,4	1798	76225	6,512	3,487	133,2	1412
42,5	1806	76766	6,519	3,490	133,5	1419
42,6	1815	77309	6,527	3,493	133,8	1425
42,7	1823	77854	6,535	3,495	134,1	1432
42,8	1832	78403	6,542	3,498	134,5	1439
42,9	1840	78954	6,550	3,501	134,8	1445
43,0	1849	79507	6,557	3,503	135,1	1452
43,1	1858	80063	6,565	3,506	135,4	1459
43,2	1866	80622	6,573	3,509	135,7	1466
43,3	1875	81183	6,580	3,512	136,0	1473
43,4	1884	81747	6,588	3,514	136,3	1479
43,5	1892	82313	6,595	3,517	136,6	1486
43,6	1901	82882	6,603	3,520	137,0	1493
43,7	1910	83453	6,611	3,522	137,3	1500
43,8	1918	84028	6,618	3,525	137,6	1507
43,9	1927	84605	6,626	3,528	137,9	1514
44,0	1936	85184	6,633	3,530	138,2	1521
44,1	1945	85766	6,641	3,533	138,5	1527
44,2	1954	86351	6,648	3,536	138,9	1534
44,3	1962	86938	6,656	3,538	139,2	1541
44,4	1971	87528	6,663	3,541	139,5	1548
44,5	1980	88121	6,671	3,544	139,8	1555
44,6	1989	88717	6,678	3,546	140,1	1562
44,7	1998	89315	6,686	3,549	140,4	1569
44,8	2007	89915	6,693	3,552	140,7	1576
44,9	2016	90519	6,701	3,554	141,1	1583
45,0	2025	91125	6,708	3,557	141,4	1590

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
45,0	2025	91125	6,708	3,557	141,4	1590
45,1	2034	91734	6,716	3,560	141,7	1598
45,2	2043	92345	6,723	3,562	142,0	1605
45,3	2052	92960	6,731	3,565	142,3	1612
45,4	2061	93577	6,738	3,567	142,6	1619
45,5	2070	94196	6,745	3,570	142,9	1626
45,6	2079	94819	6,753	3,573	143,3	1633
45,7	2088	95444	6,760	3,575	143,6	1640
45,8	2098	96072	6,768	3,578	143,9	1647
45,9	2107	96703	6,775	3,580	144,2	1655
46,0	2116	97336	6,782	3,583	144,5	1662
46,1	2125	97972	6,790	3,586	144,8	1669
46,2	2134	98611	6,797	3,588	145,1	1676
46,3	2144	99253	6,804	3,591	145,5	1684
46,4	2153	99897	6,812	3,593	145,8	1691
46,5	2162	100545	6,819	3,596	146,1	1698
46,6	2172	101195	6,826	3,599	146,4	1706
46,7	2181	101848	6,834	3,601	146,7	1713
46,8	2190	102503	6,841	3,604	147,0	1720
46,9	2200	103162	6,848	3,606	147,3	1728
47,0	2209	103823	6,856	3,609	147,7	1735
47,1	2218	104487	6,863	3,611	148,0	1742
47,2	2228	105154	6,870	3,614	148,3	1750
47,3	2237	105824	6,877	3,616	148,6	1757
47,4	2247	106496	6,885	3,619	148,9	1765
47,5	2256	107172	6,892	3,622	149,2	1772
47,6	2266	107850	6,899	3,624	149,5	1780
47,7	2275	108531	6,907	3,627	149,9	1787
47,8	2285	109215	6,914	3,629	150,2	1795
47,9	2294	109902	6,921	3,632	150,5	1802
48,0	2304	110592	6,928	3,634	150,8	1810
48,1	2314	111285	6,935	3,637	151,1	1817
48,2	2323	111980	6,943	3,639	151,4	1825
48,3	2333	112679	6,950	3,642	151,7	1832
48,4	2343	113380	6,957	3,644	152,1	1840
48,5	2352	114084	6,964	3,647	152,4	1847
48,6	2362	114791	6,971	3,649	152,7	1855
48,7	2372	115501	6,979	3,652	153,0	1863
48,8	2381	116214	6,986	3,654	153,3	1870
48,9	2391	116930	6,993	3,657	153,6	1878
49,0	2401	117649	7,000	3,659	153,9	1886
49,1	2411	118371	7,007	3,662	154,3	1893
49,2	2421	119095	7,014	3,664	154,6	1901
49,3	2430	119823	7,021	3,667	154,9	1909
49,4	2440	120554	7,029	3,669	155,2	1917
49,5	2450	121287	7,036	3,672	155,5	1924
49,6	2460	122024	7,043	3,674	155,8	1932
49,7	2470	122763	7,050	3,677	156,1	1940
49,8	2480	123506	7,057	3,679	156,5	1948
49,9	2490	124251	7,064	3,682	156,8	1956
50,0	2500	125000	7,071	3,684	157,1	1964

Beispiele: $40{,}3^2 = 1624$, $\sqrt{1858} = 43{,}1$,

$41{,}74^2 = 1742$, $\sqrt{1802} = 42{,}45$.

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) 50,0...60,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
50,0	2500	125000	7,071	3,684	157,1	1964
50,1	2510	125752	7,078	3,686	157,4	1971
50,2	2520	126506	7,085	3,689	157,7	1979
50,3	2530	127264	7,092	3,691	158,0	1987
50,4	2540	128024	7,099	3,694	158,3	1995
50,5	2550	128788	7,106	3,696	158,7	2003
50,6	2560	129554	7,113	3,699	159,0	2011
50,7	2570	130324	7,120	3,701	159,3	2019
50,8	2581	131097	7,127	3,704	159,6	2027
50,9	2591	131872	7,134	3,706	159,9	2035
51,0	2601	132651	7,141	3,708	160,2	2043
51,1	2611	133433	7,148	3,711	160,5	2051
51,2	2621	134218	7,155	3,713	160,8	2059
51,3	2632	135006	7,162	3,716	161,2	2067
51,4	2642	135797	7,169	3,718	161,5	2075
51,5	2652	136591	7,176	3,721	161,8	2083
51,6	2663	137388	7,183	3,723	162,1	2091
51,7	2673	138188	7,190	3,725	162,4	2099
51,8	2683	138992	7,197	3,728	162,7	2107
51,9	2694	139798	7,204	3,730	163,0	2116
52,0	2704	140608	7,211	3,733	163,4	2124
52,1	2714	141421	7,218	3,735	163,7	2132
52,2	2725	142237	7,225	3,737	164,0	2140
52,3	2735	143056	7,232	3,740	164,3	2148
52,4	2746	143878	7,239	3,742	164,6	2157
52,5	2756	144703	7,246	3,744	164,9	2165
52,6	2767	145532	7,253	3,747	165,2	2173
52,7	2777	146363	7,259	3,749	165,6	2181
52,8	2788	147198	7,266	3,752	165,9	2190
52,9	2798	148036	7,273	3,754	166,2	2198
53,0	2809	148877	7,280	3,756	166,5	2206
53,1	2820	149721	7,287	3,759	166,8	2215
53,2	2830	150569	7,294	3,761	167,1	2223
53,3	2841	151419	7,301	3,763	167,4	2231
53,4	2852	152273	7,308	3,766	167,8	2240
53,5	2862	153130	7,314	3,768	168,1	2248
53,6	2873	153991	7,321	3,770	168,4	2256
53,7	2884	154854	7,328	3,773	168,7	2265
53,8	2894	155721	7,335	3,775	169,0	2273
53,9	2905	156591	7,342	3,777	169,3	2282
54,0	2916	157464	7,348	3,780	169,7	2290
54,1	2927	158340	7,355	3,782	170,0	2299
54,2	2938	159220	7,362	3,784	170,3	2307
54,3	2948	160103	7,369	3,787	170,6	2316
54,4	2959	160989	7,376	3,789	170,9	2324
54,5	2970	161879	7,382	3,791	171,2	2333
54,6	2981	162771	7,389	3,794	171,5	2341
54,7	2992	163667	7,396	3,796	171,8	2350
54,8	3003	164567	7,403	3,798	172,2	2359
54,9	3014	165469	7,409	3,801	172,5	2367
55,0	3025	166375	7,416	3,803	172,8	2376

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
55,0	3025	166375	7,416	3,803	172,8	2376
55,1	3036	167284	7,423	3,805	173,1	2384
55,2	3047	168197	7,430	3,808	173,4	2393
55,3	3058	169112	7,436	3,810	173,7	2402
55,4	3069	170031	7,443	3,812	174,0	2411
55,5	3080	170954	7,450	3,814	174,4	2419
55,6	3091	171880	7,457	3,817	174,7	2428
55,7	3102	172809	7,463	3,819	175,0	2437
55,8	3114	173741	7,470	3,821	175,3	2445
55,9	3125	174677	7,477	3,824	175,6	2454
56,0	3136	175616	7,483	3,826	175,9	2463
56,1	3147	176558	7,490	3,828	176,2	2472
56,2	3158	177504	7,497	3,830	176,6	2481
56,3	3170	178454	7,503	3,833	176,9	2489
56,4	3181	179406	7,510	3,835	177,2	2498
56,5	3192	180362	7,517	3,837	177,5	2507
56,6	3204	181321	7,523	3,839	177,8	2516
56,7	3215	182284	7,530	3,842	178,1	2525
56,8	3226	183250	7,537	3,844	178,4	2534
56,9	3238	184220	7,543	3,846	178,8	2543
57,0	3249	185193	7,550	3,849	179,1	2552
57,1	3260	186169	7,556	3,851	179,4	2561
57,2	3272	187149	7,563	3,853	179,7	2570
57,3	3283	188133	7,570	3,855	180,0	2579
57,4	3295	189119	7,576	3,857	180,3	2588
57,5	3306	190109	7,583	3,860	180,6	2597
57,6	3318	191103	7,589	3,862	181,0	2606
57,7	3329	192100	7,596	3,864	181,3	2615
57,8	3341	193101	7,603	3,866	181,6	2624
57,9	3352	194105	7,609	3,869	181,9	2633
58,0	3364	195112	7,616	3,871	182,2	2642
58,1	3376	196123	7,622	3,873	182,5	2651
58,2	3387	197137	7,629	3,875	182,8	2660
58,3	3399	198155	7,635	3,878	183,2	2669
58,4	3411	199177	7,642	3,880	183,5	2679
58,5	3422	200202	7,649	3,882	183,8	2688
58,6	3434	201230	7,655	3,884	184,1	2697
58,7	3446	202262	7,662	3,886	184,4	2706
58,8	3457	203297	7,668	3,889	184,7	2715
58,9	3469	204336	7,675	3,891	185,0	2725
59,0	3481	205379	7,681	3,893	185,4	2734
59,1	3493	206425	7,688	3,895	185,7	2743
59,2	3505	207475	7,694	3,897	186,0	2753
59,3	3516	208528	7,701	3,900	186,3	2762
59,4	3528	209585	7,707	3,902	186,6	2771
59,5	3540	210645	7,714	3,904	186,9	2781
59,6	3552	211709	7,720	3,906	187,2	2790
59,7	3564	212776	7,727	3,908	187,6	2799
59,8	3576	213847	7,733	3,911	187,9	2809
59,9	3588	214922	7,740	3,913	188,2	2818
60,0	3600	216000	7,746	3,915	188,5	2827

Beispiele: $50{,}4^3 = 128024$, $\sqrt[3]{157464} = 54{,}0$,

$51{,}67^3 = 137948$, $\sqrt[3]{158375} \approx 54{,}14$.

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) 60,0...70,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
60,0	3600	216000	7,746	3,915	188,5	2827
60,1	3612	217082	7,752	3,917	188,8	2837
60,2	3624	218167	7,759	3,919	189,1	2846
60,3	3636	219256	7,765	3,921	189,4	2856
60,4	3648	220349	7,772	3,924	189,8	2865
60,5	3660	221445	7,778	3,926	190,1	2875
60,6	3672	222545	7,785	3,928	190,4	2884
60,7	3684	223649	7,791	3,930	190,7	2894
60,8	3697	224756	7,797	3,932	191,0	2903
60,9	3709	225867	7,804	3,934	191,3	2913
61,0	3721	226981	7,810	3,936	191,6	2922
61,1	3733	228099	7,817	3,939	192,0	2932
61,2	3745	229221	7,823	3,941	192,3	2942
61,3	3758	230346	7,829	3,943	192,6	2951
61,4	3770	231476	7,836	3,945	192,9	2961
61,5	3782	232608	7,842	3,947	193,2	2971
61,6	3795	233745	7,849	3,949	193,5	2980
61,7	3807	234885	7,855	3,951	193,8	2990
61,8	3819	236029	7,861	3,954	194,2	3000
61,9	3832	237177	7,868	3,956	194,5	3009
62,0	3844	238328	7,874	3,958	194,8	3019
62,1	3856	239483	7,880	3,960	195,1	3029
62,2	3869	240642	7,887	3,962	195,4	3039
62,3	3881	241804	7,893	3,964	195,7	3048
62,4	3894	242971	7,899	3,966	196,0	3058
62,5	3906	244141	7,906	3,968	196,3	3068
62,6	3919	245314	7,912	3,971	196,7	3078
62,7	3931	246492	7,918	3,973	197,0	3088
62,8	3944	247673	7,925	3,975	197,3	3097
62,9	3956	248858	7,931	3,977	197,6	3107
63,0	3969	250047	7,937	3,979	197,9	3117
63,1	3982	251240	7,944	3,981	198,2	3127
63,2	3994	252436	7,950	3,983	198,5	3137
63,3	4007	253636	7,956	3,985	198,9	3147
63,4	4020	254840	7,962	3,987	199,2	3157
63,5	4032	256048	7,969	3,990	199,5	3167
63,6	4045	257259	7,975	3,992	199,8	3177
63,7	4058	258475	7,981	3,994	200,1	3187
63,8	4070	259694	7,987	3,996	200,4	3197
63,9	4083	260917	7,994	3,998	200,7	3207
64,0	4096	262144	8,000	4,000	201,1	3217
64,1	4109	263375	8,006	4,002	201,4	3227
64,2	4122	264609	8,012	4,004	201,7	3237
64,3	4134	265848	8,019	4,006	202,0	3247
64,4	4147	267090	8,025	4,008	202,3	3257
64,5	4160	268336	8,031	4,010	202,6	3267
64,6	4173	269586	8,037	4,013	202,9	3278
64,7	4186	270840	8,044	4,015	203,3	3288
64,8	4199	272098	8,050	4,017	203,6	3298
64,9	4212	273359	8,056	4,019	203,9	3308
65,0	4225	274625	8,062	4,021	204,2	3318

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
65,0	4225	274625	8,062	4,021	204,2	3318
65,1	4238	275894	8,068	4,023	204,5	3329
65,2	4251	277168	8,075	4,025	204,8	3339
65,3	4264	278445	8,081	4,027	205,1	3349
65,4	4277	279726	8,087	4,029	205,5	3359
65,5	4290	281011	8,093	4,031	205,8	3370
65,6	4303	282300	8,099	4,033	206,1	3380
65,7	4316	283593	8,106	4,035	206,4	3390
65,8	4330	284890	8,112	4,037	206,7	3400
65,9	4343	286191	8,118	4,039	207,0	3411
66,0	4356	287496	8,124	4,041	207,3	3421
66,1	4369	288805	8,130	4,043	207,7	3432
66,2	4382	290118	8,136	4,045	208,0	3442
66,3	4396	291434	8,142	4,047	208,3	3452
66,4	4409	292755	8,149	4,049	208,6	3463
66,5	4422	294080	8,155	4,051	208,9	3473
66,6	4436	295408	8,161	4,053	209,2	3484
66,7	4449	296741	8,167	4,055	209,5	3494
66,8	4462	298078	8,173	4,058	209,9	3505
66,9	4476	299418	8,179	4,060	210,2	3515
67,0	4489	300763	8,185	4,062	210,5	3526
67,1	4502	302112	8,191	4,064	210,8	3536
67,2	4516	303464	8,198	4,066	211,1	3547
67,3	4529	304821	8,204	4,068	211,4	3557
67,4	4543	306182	8,210	4,070	211,7	3568
67,5	4556	307547	8,216	4,072	212,1	3578
67,6	4570	308916	8,222	4,074	212,4	3589
67,7	4583	310289	8,228	4,076	212,7	3600
67,8	4597	311666	8,234	4,078	213,0	3610
67,9	4610	313047	8,240	4,080	213,3	3621
68,0	4624	314432	8,246	4,082	213,6	3632
68,1	4638	315821	8,252	4,084	213,9	3642
68,2	4651	317215	8,258	4,086	214,3	3653
68,3	4665	318612	8,264	4,088	214,6	3664
68,4	4679	320014	8,270	4,090	214,9	3675
68,5	4692	321419	8,276	4,092	215,2	3685
68,6	4706	322829	8,283	4,094	215,5	3696
68,7	4720	324243	8,289	4,096	215,8	3707
68,8	4733	325661	8,295	4,098	216,1	3718
68,9	4747	327083	8,301	4,100	216,5	3728
69,0	4761	328509	8,307	4,102	216,8	3739
69,1	4775	329939	8,313	4,104	217,1	3750
69,2	4789	331374	8,319	4,106	217,4	3761
69,3	4802	332813	8,325	4,108	217,7	3772
69,4	4816	334255	8,331	4,109	218,0	3783
69,5	4830	335702	8,337	4,111	218,3	3794
69,6	4844	337154	8,343	4,113	218,7	3805
69,7	4858	338609	8,349	4,115	219,0	3816
69,8	4872	340068	8,355	4,117	219,3	3826
69,9	4886	341532	8,361	4,119	219,6	3837
70,0	4900	343000	8,367	4,121	219,9	3848

Beispiele: $\sqrt{65{,}7} = 8{,}106$, $8{,}337^2 = 69{,}5$,

$\sqrt{0{,}657} = 0{,}811$, $83{,}37^2 = 6950$.

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) 70,0...80,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
70,0	4900	343000	8,367	4,121	219,9	3848
70,1	4914	344472	8,373	4,123	220,2	3859
70,2	4928	345948	8,379	4,125	220,5	3870
70,3	4942	347429	8,385	4,127	220,9	3882
70,4	4956	348914	8,390	4,129	221,2	3893
70,5	4970	350403	8,396	4,131	221,5	3904
70,6	4984	351896	8,402	4,133	221,8	3915
70,7	4998	353393	8,408	4,135	222,1	3926
70,8	5013	354895	8,414	4,137	222,4	3937
70,9	5027	356401	8,420	4,139	222,7	3948
71,0	5041	357911	8,426	4,141	223,1	3959
71,1	5055	359425	8,432	4,143	223,4	3970
71,2	5069	360944	8,438	4,145	223,7	3982
71,3	5084	362467	8,444	4,147	224,0	3993
71,4	5098	363994	8,450	4,149	224,3	4004
71,5	5112	365526	8,456	4,151	224,6	4015
71,6	5127	367062	8,462	4,152	224,9	4026
71,7	5141	368602	8,468	4,154	225,3	4038
71,8	5155	370146	8,473	4,156	225,6	4049
71,9	5170	371695	8,479	4,158	225,9	4060
72,0	5184	373248	8,485	4,160	226,2	4072
72,1	5198	374805	8,491	4,162	226,5	4083
72,2	5213	376367	8,497	4,164	226,8	4094
72,3	5227	377933	8,503	4,166	227,1	4106
72,4	5242	379503	8,509	4,168	227,5	4117
72,5	5256	381078	8,515	4,170	227,8	4128
72,6	5271	382657	8,521	4,172	228,1	4140
72,7	5285	384241	8,526	4,174	228,4	4151
72,8	5300	385828	8,532	4,176	228,7	4162
72,9	5314	387420	8,538	4,177	229,0	4174
73,0	5329	389017	8,544	4,179	229,3	4185
73,1	5344	390618	8,550	4,181	229,7	4197
73,2	5358	392223	8,556	4,183	230,0	4208
73,3	5373	393833	8,562	4,185	230,3	4220
73,4	5388	395447	8,567	4,187	230,6	4231
73,5	5402	397065	8,573	4,189	230,9	4243
73,6	5417	398688	8,579	4,191	231,2	4254
73,7	5432	400316	8,585	4,193	231,5	4266
73,8	5446	401947	8,591	4,195	231,8	4278
73,9	5461	403583	8,597	4,196	232,2	4289
74,0	5476	405224	8,602	4,198	232,5	4301
74,1	5491	406869	8,608	4,200	232,8	4312
74,2	5506	408518	8,614	4,202	233,1	4324
74,3	5520	410172	8,620	4,204	233,4	4336
74,4	5535	411831	8,626	4,206	233,7	4347
74,5	5550	413494	8,631	4,208	234,0	4359
74,6	5565	415161	8,637	4210	234,4	4371
74,7	5580	416833	8,643	4,212	234,7	4383
74,8	5595	418509	8,649	4,213	235,0	4394
74,9	5610	420190	8,654	4,215	235,3	4406
75,0	5625	421875	8,660	4,217	235,6	4418

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
75,0	5625	421875	8,660	4,217	235,6	4418
75,1	5640	423565	8,666	4,219	235,9	4430
75,2	5655	425259	8,672	4,221	236,2	4441
75,3	5670	426958	8,678	4,223	236,6	4453
75,4	5685	428661	8,683	4,225	236,9	4465
75,5	5700	430369	8,689	4,227	237,2	4477
75,6	5715	432081	8,695	4,228	237,5	4489
75,7	5730	433798	8,701	4,230	237,8	4501
75,8	5746	435520	8,706	4,232	238,1	4513
75,9	5761	437245	8,712	4,234	238,4	4525
76,0	5776	438976	8,718	4,236	238,8	4536
76,1	5791	440711	8,724	4,238	239,1	4548
76,2	5806	442451	8,729	4,240	239,4	4560
76,3	5822	444195	8,735	4,241	239,7	4572
76,4	5837	445944	8,741	4,243	240,0	4584
76,5	5852	447697	8,746	4,245	240,3	4596
76,6	5868	449455	8,752	4,247	240,6	4608
76,7	5883	451218	8,758	4,249	241,0	4620
76,8	5898	452985	8,764	4,251	241,3	4632
76,9	5914	454757	8,769	4,252	241,6	4645
77,0	5929	456533	8,775	4,254	241,9	4657
77,1	5944	458314	8,781	4,256	242,2	4669
77,2	5960	460100	8,786	4,258	242,5	4681
77,3	5975	461890	8,792	4,260	242,8	4693
77,4	5991	463685	8,798	4,262	243,2	4705
77,5	6006	465484	8,803	4,264	243,5	4717
77,6	6022	467289	8,809	4,265	243,8	4729
77,7	6037	469097	8,815	4,267	244,1	4742
77,8	6053	470911	8,820	4,269	244,4	4754
77,9	6068	472729	8,826	4,271	244,7	4766
78,0	6084	474552	8,832	4,273	245,0	4778
78,1	6100	476380	8,837	4,274	245,4	4791
78,2	6115	478212	8,843	4,276	245,7	4803
78,3	6131	480049	8,849	4,278	246,0	4815
78,4	6147	481890	8,854	4,280	246,3	4827
78,5	6162	483737	8,860	4,282	246,6	4840
78,6	6178	485588	8,866	4,284	246,9	4852
78,7	6194	487443	8,871	4,285	247,2	4865
78,8	6209	489304	8,877	4,287	247,6	4877
78,9	6225	491169	8,883	4,289	247,9	4889
79,0	6241	493039	8,888	4,291	248,2	4902
79,1	6257	494914	8,894	4,293	248,5	4914
79,2	6273	496793	8,899	4,294	248,8	4927
79,3	6288	498677	8,905	4,296	249,1	4939
79,4	6304	500566	8,911	4,298	249,4	4951
79,5	6320	502460	8,916	4,300	249,8	4964
79,6	6336	504358	8,922	4,302	250,1	4976
79,7	6352	506262	8,927	4,303	250,4	4989
79,8	6368	508170	8,933	4,305	250,7	5001
79,9	6384	510082	8,939	4,307	251,0	5014
80,0	6400	512000	8,944	4,309	251,3	5027

Beispiele: $\sqrt[3]{77{,}6} = 4{,}265$, $4{,}172^3 = 72{,}6$,

$\sqrt[3]{70{,}65} = 4{,}134$, $4{,}308^3 = 79{,}95$.

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) 80,0...90,0

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
80,0	6400	512000	8,944	4,309	251,3	5027
80,1	6416	513922	8,950	4,311	251,6	5039
80,2	6432	515850	8,955	4,312	252,0	5052
80,3	6448	517782	8,961	4,314	252,3	5064
80,4	6464	519718	8,967	4,316	252,6	5077
80,5	6480	521660	8,972	4,318	252,9	5090
80,6	6496	523607	8,978	4,320	253,2	5102
80,7	6512	525558	8,983	4,321	253,5	5115
80,8	6529	527514	8,989	4,323	253,8	5128
80,9	6545	529475	8,994	4,325	254,2	5140
81,0	6561	531441	9,000	4,327	254,5	5153
81,1	6577	533412	9,006	4,329	254,8	5166
81,2	6593	535387	9,011	4,330	255,1	5178
81,3	6610	537368	9,017	4,332	255,4	5191
81,4	6626	539353	9,022	4,334	255,7	5204
81,5	6642	541343	9,028	4,336	256,0	5217
81,6	6659	543338	9,033	4,337	256,4	5230
81,7	6675	545339	9,039	4,339	256,7	5242
81,8	6691	547343	9,044	4,341	257,0	5255
81,9	6708	549353	9,050	4,343	257,3	5268
82,0	6724	551368	9,055	4,344	257,6	5281
82,1	6740	553388	9,061	4,346	257,9	5294
82,2	6757	555412	9,066	4,348	258,2	5307
82,3	6773	557442	9,072	4,350	258,6	5320
82,4	6790	559476	9,077	4,352	258,9	5333
82,5	6806	561516	9,083	4,353	259,2	5346
82,6	6823	563560	9,088	4,355	259,5	5359
82,7	6839	565609	9,094	4,357	259,8	5372
82,8	6856	567664	9,099	4,359	260,1	5385
82,9	6872	569723	9,105	4,360	260,4	5398
83,0	6889	571787	9,110	4,362	260,8	5411
83,1	6906	573856	9,116	4,364	261,1	5424
83,2	6922	575930	9,121	4,366	261,4	5437
83,3	6939	578010	9,127	4,367	261,7	5450
83,4	6956	580094	9,132	4,369	262,0	5463
83,5	6972	582183	9,138	4,371	262,3	5476
83,6	6989	584277	9,143	4,373	262,6	5489
83,7	7006	586376	9,149	4,374	263,0	5502
83,8	7022	588480	9,154	4,376	263,3	5515
83,9	7039	590590	9,160	4,378	263,6	5529
84,0	7056	592704	9,165	4,380	263,9	5542
84,1	7073	594823	9,171	4,381	264,2	5555
84,2	7090	596948	9,176	4,383	264,5	5568
84,3	7106	599077	9,182	4,385	264,8	5581
84,4	7123	601212	9,187	4,386	265,2	5595
84,5	7140	603351	9,192	4,388	265,5	5608
84,6	7157	605496	9,198	4,390	265,8	5621
84,7	7174	607645	9,203	4,392	266,1	5635
84,8	7191	609800	9,209	4,393	266,4	5648
84,9	7208	611960	9,214	4,395	266,7	5661
85,0	7225	614125	9,220	4,397	267,0	5675

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
85,0	7225	614125	9,220	4,397	267,0	5675
85,1	7242	616295	9,225	4,399	267,3	5688
85,2	7259	618470	9,230	4,400	267,7	5701
85,3	7276	620650	9,236	4,402	268,0	5715
85,4	7293	622836	9,241	4,404	268,3	5728
85,5	7310	625026	9,247	4,405	268,6	5741
85,6	7327	627222	9,252	4,407	268,9	5755
85,7	7344	629423	9,257	4,409	269,2	5768
85,8	7362	631629	9,263	4,411	269,5	5782
85,9	7379	633840	9,268	4,412	269,9	5795
86,0	7396	636056	9,274	4,414	270,2	5809
86,1	7413	638277	9,279	4,416	270,5	5822
86,2	7430	640504	9,284	4,417	270,8	5836
86,3	7448	642736	9,290	4,419	271,1	5849
86,4	7465	644973	9,295	4,421	271,4	5863
86,5	7482	647215	9,301	4,423	271,7	5877
86,6	7500	649462	9,306	4,424	272,1	5890
86,7	7517	651714	9,311	4,426	272,4	5904
86,8	7534	653972	9,317	4,428	272,7	5917
86,9	7552	656235	9,322	4,429	273,0	5931
87,0	7569	658503	9,327	4,431	273,3	5945
87,1	7586	660776	9,333	4,433	273,6	5958
87,2	7604	663055	9,338	4,434	273,9	5972
87,3	7621	665339	9,343	4,436	274,3	5986
87,4	7639	667628	9,349	4,438	274,6	5999
87,5	7656	669922	9,354	4,440	274,9	6013
87,6	7674	672221	9,359	4,441	275,2	6027
87,7	7691	674526	9,365	4,443	275,5	6041
87,8	7709	676836	9,370	4,445	275,8	6055
87,9	7726	679151	9,375	4,446	276,1	6068
88,0	7744	681472	9,381	4,448	276,5	6082
88,1	7762	683798	9,386	4,450	276,8	6096
88,2	7779	686129	9,391	4,451	277,1	6110
88,3	7797	688465	9,397	4,453	277,4	6124
88,4	7815	690807	9,402	4,455	277,7	6138
88,5	7832	693154	9,407	4,456	278,0	6151
88,6	7850	695506	9,413	4,458	278,3	6165
88,7	7868	697864	9,418	4,460	278,7	6179
88,8	7885	700227	9,423	4,461	279,0	6193
88,9	7903	702595	9,429	4,463	279,3	6207
89,0	7921	704969	9,434	4,465	279,6	6221
89,1	7939	707348	9,439	4,466	279,9	6235
89,2	7957	709732	9,445	4,468	280,2	6249
89,3	7974	712122	9,450	4,470	280,5	6263
89,4	7992	714517	9,455	4,471	280,9	6277
89,5	8010	716917	9,460	4,473	281,2	6291
89,6	8028	719323	9,466	4,475	281,5	6305
89,7	8046	721734	9,471	4,476	281,8	6319
89,8	8064	724151	9,476	4,478	282,1	6333
89,9	8082	726573	9,482	4,480	282,4	6348
90,0	8100	729000	9,487	4,481	282,7	6362

Beispiele: $d = 82{,}6 \rightarrow \pi d = 259{,}5$, $\pi d = 282{,}4 \rightarrow d = 89{,}9$,

$d = 8{,}89 \rightarrow \pi d = 27{,}93$, $\pi d = 25{,}64 \rightarrow d = 8{,}16$.

Tabelle 1.14 (Fortsetzung) **90,0...100,0**

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
90,0	8100	729000	9,487	4,481	282,7	6362
90,1	8118	731433	9,492	4,483	283,1	6376
90,2	8136	733871	9,497	4,485	283,4	6390
90,3	8154	736314	9,503	4,486	283,7	6404
90,4	8172	738763	9,508	4,488	284,0	6418
90,5	8190	741218	9,513	4,490	284,3	6433
90,6	8208	743677	9,518	4,491	284,6	6447
90,7	8226	746143	9,524	4,493	284,9	6461
90,8	8245	748613	9,529	4,495	285,3	6475
90,9	8263	751089	9,534	4,496	285,6	6490
91,0	8281	753571	9,539	4,498	285,9	6504
91,1	8299	756058	9,545	4,500	286,2	6518
91,2	8317	758551	9,550	4,501	286,5	6533
91,3	8336	761048	9,555	4,503	286,8	6547
91,4	8354	763552	9,560	4,505	287,1	6561
91,5	8372	766061	9,566	4,506	287,5	6576
91,6	8391	768575	9,571	4,508	287,8	6590
91,7	8409	771095	9,576	4,509	288,1	6604
91,8	8427	773621	9,581	4,511	288,4	6619
91,9	8446	776152	9,586	4,513	288,7	6633
92,0	8464	778688	9,592	4,514	289,0	6648
92,1	8482	781230	9,597	4,516	289,3	6662
92,2	8501	783777	9,602	4,518	289,7	6677
92,3	8519	786330	9,607	4,519	290,0	6691
92,4	8538	788889	9,612	4,521	290,3	6706
92,5	8556	791453	9,618	4,523	290,6	6720
92,6	8575	794023	9,623	4,524	290,9	6735
92,7	8593	796598	9,628	4,526	291,2	6749
92,8	8612	799179	9,633	4,527	291,5	6764
92,9	8630	801765	9,638	4,529	291,9	6778
93,0	8649	804357	9,644	4,531	292,2	6793
93,1	8668	806954	9,649	4,532	292,5	6808
93,2	8686	809558	9,654	4,534	292,8	6822
93,3	8705	812166	9,659	4,536	293,1	6837
93,4	8724	814781	9,664	4,537	293,4	6851
93,5	8742	817400	9,670	4,539	293,7	6866
93,6	8761	820026	9,675	4,540	294,1	6881
93,7	8780	822657	9,680	4,542	294,4	6896
93,8	8798	825294	9,685	4,544	294,7	6910
93,9	8817	827936	9,690	4,545	295,0	6925
94,0	8836	830584	9,695	4,547	295,3	6940
94,1	8855	833238	9,701	4,548	295,6	6955
94,2	8874	835897	9,706	4,550	295,9	6969
94,3	8892	838562	9,711	4,552	296,3	6984
94,4	8911	841232	9,716	4,553	296,6	6999
94,5	8930	843909	9,721	4,555	296,9	7014
94,6	8949	846591	9,726	4,556	297,2	7029
94,7	8968	849278	9,731	4,558	297,5	7044
94,8	8987	851971	9,737	4,560	297,8	7058
94,9	9006	854670	9,742	4,561	298,1	7073
95,0	9025	857375	9,747	4,563	298,5	7088

$n = d$	n^2	n^3	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	πd	$\frac{\pi d^2}{4}$
95,0	9025	857375	9,747	4,563	298,5	7088
95,1	9044	860085	9,752	4,565	298,8	7103
95,2	9063	862801	9,757	4,566	299,1	7118
95,3	9082	865523	9,762	4,568	299,4	7133
95,4	9101	868251	9,767	4,569	299,7	7148
95,5	9120	870984	9,772	4,571	300,0	7163
95,6	9139	873723	9,778	4,572	300,3	7178
95,7	9158	876467	9,783	4,574	300,7	7193
95,8	9178	879218	9,788	4,576	301,0	7208
95,9	9197	881974	9,793	4,577	301,3	7223
96,0	9216	884736	9,798	4,579	301,6	7238
96,1	9235	887504	9,803	4,580	301,9	7253
96,2	9254	890277	9,808	4,582	302,2	7268
96,3	9274	893056	9,813	4,584	302,5	7284
96,4	9293	895841	9,818	4,585	302,8	7299
96,5	9312	898632	9,823	4,587	303,2	7314
96,6	9332	901429	9,829	4,588	303,5	7329
96,7	9351	904231	9,834	4,590	303,8	7344
96,8	9370	907039	9,839	4,592	304,1	7359
96,9	9390	909853	9,844	4,593	304,4	7375
97,0	9409	912673	9,849	4,595	304,7	7390
97,1	9428	915499	9,854	4,596	305,0	7405
97,2	9448	918330	9,859	4,598	305,4	7420
97,3	9467	921167	9,864	4,599	305,7	7436
97,4	9487	924010	9,869	4,601	306,0	7451
97,5	9506	926859	9,874	4,603	306,3	7466
97,6	9526	929714	9,879	4,604	306,6	7482
97,7	9545	932575	9,884	4,606	306,9	7497
97,8	9565	935441	9,889	4,607	307,2	7512
97,9	9584	938314	9,894	4,609	307,6	7528
98,0	9604	941192	9,899	4,610	307,9	7543
98,1	9624	944076	9,905	4,612	308,2	7558
98,2	9643	946966	9,910	4,614	308,5	7574
98,3	9663	949862	9,915	4,615	308,8	7589
98,4	9683	952764	9,920	4,617	309,1	7605
98,5	9702	955672	9,925	4,618	309,4	7620
98,6	9722	958585	9,930	4,620	309,8	7636
98,7	9742	961505	9,935	4,621	310,1	7651
98,8	9761	964430	9,940	4,623	310,4	7667
98,9	9781	967362	9,945	4,625	310,7	7682
99,0	9801	970299	9,950	4,626	311,0	7698
99,1	9821	973242	9,955	4,628	311,3	7713
99,2	9841	976191	9,960	4,629	311,6	7729
99,3	9860	979147	9,965	4,631	312,0	7744
99,4	9880	982108	9,970	4,632	312,3	7760
99,5	9900	985075	9,975	4,634	312,6	7776
99,6	9920	988048	9,980	4,635	312,9	7791
99,7	9940	991027	9,985	4,637	313,2	7807
99,8	9960	994012	9,990	4,638	313,5	7823
99,9	9980	997003	9,995	4,640	313,8	7838
100,0	10000	1000000	10,000	4,642	314,2	7854

Beispiele: $d = 91{,}3 \rightarrow \frac{\pi d^2}{4} = 6547$, $\frac{\pi d^2}{4} = 6590 \rightarrow d = 91{,}6$,

$d = 9{,}93 \rightarrow \frac{\pi d^2}{4} = 77{,}44$, $\frac{\pi d^2}{4} = 74{,}88 \rightarrow d = 9{,}764$.

Tabelle 1.15: Mantissen der Ziffernfolgen 1...1000

lg 1...lg 500

Num.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	$-\infty$	00000	30103	47712	60206	69897	77815	84510	90309	95424
1	00000	04139	07918	11394	14613	17609	20412	23045	25527	27875
2	30103	32222	34242	36173	38021	39794	41497	43136	44716	46240
3	47712	49136	50515	51851	53148	54407	55630	56820	57978	59106
4	60206	61278	62325	63347	64345	65321	66276	67210	68124	69020
5	69897	70757	71600	72428	73239	74036	74819	75587	76343	77085
6	77815	78533	79239	79934	80618	81291	81954	82607	83251	83885
7	84510	85126	85733	86332	86923	87506	88081	88649	89209	89763
8	90309	90849	91381	91908	92428	92942	93450	93952	94448	94939
9	95424	95904	96379	96848	97313	97772	98227	98677	99123	99564
10	00000	00432	00860	01284	01703	02119	02531	02938	03342	03743
11	04139	04532	04922	05308	05690	06070	06446	06819	07188	07555
12	07918	08279	08636	08991	09342	09691	10037	10380	10721	11059
13	11394	11727	12057	12385	12710	13033	13354	13672	13988	14301
14	14613	14922	15229	15534	15836	16137	16435	16732	17026	17319
15	17609	17898	18184	18469	18752	19033	19312	19590	19866	20140
16	20412	20683	20952	21219	21484	21748	22011	22272	22531	22789
17	23045	23300	23553	23805	24055	24304	24551	24797	25042	25285
18	25527	25768	26007	26245	26482	26717	26951	27184	27416	27646
19	27875	28103	28330	28556	28780	29003	29226	29447	29667	29885
20	30103	30320	30535	30750	30963	31175	31387	31597	31806	32015
21	32222	32428	32634	32838	33041	33244	33445	33646	33846	34044
22	34242	34439	34635	34830	35025	35218	35411	35603	35793	35984
23	36173	36361	36549	36736	36922	37107	37291	37475	37658	37840
24	38021	38202	38382	38561	38739	38917	39094	39270	39445	39620
25	39794	39967	40140	40312	40483	40654	40824	40993	41162	41330
26	41497	41664	41830	41996	42160	42325	42488	42651	42813	42975
27	43136	43297	43457	43616	43775	43933	44091	44248	44404	44560
28	44716	44871	45025	45179	45332	45484	45637	45788	45939	46090
29	46240	46389	46538	46687	46835	46982	47129	47276	47422	47567
30	47712	47857	48001	48144	48287	48430	48572	48714	48855	48996
31	49136	49276	49415	49554	49693	49831	49969	50106	50243	50379
32	50515	50651	50786	50920	51055	51188	51322	51455	51587	51720
33	51851	51983	52114	52244	52375	52504	52634	52763	52892	53020
34	53148	53275	53403	53529	53656	53782	53908	54033	54158	54283
35	54407	54531	54654	54777	54900	55023	55145	55267	55388	55509
36	55630	55751	55871	55991	56110	56229	56348	56467	56585	56703
37	56820	56937	57054	57171	57287	57403	57519	57634	57749	57864
38	57978	58092	58206	58320	58433	58546	58659	58771	58883	58995
39	59106	59218	59329	59439	59550	59660	59770	59879	59988	60097
40	60206	60314	60423	60531	60638	60746	60853	60959	61066	61172
41	61278	61384	61490	61595	61700	61805	61909	62014	62118	62221
42	62325	62428	62531	62634	62737	62839	62941	63043	63144	63246
43	63347	63448	63548	63649	63749	63849	63949	64048	64147	64246
44	64345	64444	64542	64640	64738	64836	64933	65031	65128	65225
45	65321	65418	65514	65610	65706	65801	65896	65992	66087	66181
46	66276	66370	66464	66558	66652	66745	66839	66932	67025	67117
47	67210	67302	67394	67486	67578	67669	67761	67852	67943	68034
48	68124	68215	68305	68395	68485	68574	68664	68753	68842	68931
49	69020	69108	69197	69285	69373	69461	69548	69636	69723	69810
50	69897	69984	70070	70157	70243	70329	70415	70501	70586	70672

Beispiele: $n = 293 \rightarrow \lg n = 2{,}46687$,

$n = 0{,}293 \rightarrow \lg n = 0{,}46687 - 1$.

Tabelle 1.15 (Fortsetzung)

lg 500...lg 1000

Num.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	69897	69984	70070	70157	70243	70329	70415	70501	70586	70672
51	70757	70842	70927	71012	71096	71181	71265	71349	71433	71517
52	71600	71684	71767	71850	71933	72016	72099	72181	72263	72346
53	72428	72509	72591	72673	72754	72835	72916	72997	73078	73159
54	73239	73320	73400	73480	73560	73640	73719	73799	73878	73957
55	74036	74115	74194	74273	74351	74429	74507	74586	74663	74741
56	74819	74896	74974	75051	75128	75205	75282	75358	75435	75511
57	75587	75664	75740	75815	75891	75967	76042	76118	76193	76268
58	76343	76418	76492	76567	76641	76716	76790	76864	76938	77012
59	77085	77159	77232	77305	77379	77452	77525	77597	77670	77743
60	77815	77887	77960	78032	78104	78176	78247	78319	78390	78462
61	78533	78604	78675	78746	78817	78888	78958	79029	79099	79169
62	79239	79309	79379	79449	79518	79588	79657	79727	79796	79865
63	79934	80003	80072	80140	80209	80277	80346	80414	80482	80550
64	80618	80686	80754	80821	80889	80956	81023	81090	81158	81224
65	81291	81358	81425	81491	81558	81624	81690	81757	81823	81889
66	81954	82020	82086	82151	82217	82282	82347	82413	82478	82543
67	82607	82672	82737	82802	82866	82930	82995	83059	83123	83187
68	83251	83315	83378	83442	83506	83569	83632	83696	83759	83822
69	83885	83948	84011	84073	84136	84198	84261	84323	84386	84448
70	84510	84572	84634	84696	84757	84819	84880	84942	85003	85065
71	85126	85187	85248	85309	85370	85431	85491	85552	85612	85673
72	85733	85794	85854	85914	85974	86034	86094	86153	86213	86273
73	86332	86392	86451	86510	86570	86629	86688	86747	86806	86864
74	86923	86982	87040	87099	87157	87216	87274	87332	87390	87448
75	87506	87564	87622	87679	87737	87795	87852	87910	87967	88024
76	88081	88138	88195	88252	88309	88366	88423	88480	88536	88593
77	88649	88705	88762	88818	88874	88930	88986	89042	89098	89154
78	89209	89265	89321	89376	89432	89487	89542	89597	89653	89708
79	89763	89818	89873	89927	89982	90037	90091	90146	90200	90255
80	90309	90363	90417	90472	90526	90580	90634	90687	90741	90795
81	90849	90902	90956	91009	91062	91116	91169	91222	91275	91328
82	91381	91434	91487	91540	91593	91645	91698	91751	91803	91855
83	91908	91960	92012	92065	92117	92169	92221	92273	92324	92376
84	92428	92480	92531	92583	92634	92686	92737	92788	92840	92891
85	92942	92993	93044	93095	93146	93197	93247	93298	93349	93399
86	93450	93500	93551	93601	93651	93702	93752	93802	93852	93902
87	93952	94002	94052	94101	94151	94201	94250	94300	94349	94399
88	94448	94498	94547	94596	94645	94694	94743	94792	94841	94890
89	94939	94988	95036	95085	95134	95182	95231	95279	95328	95376
90	95424	95472	95521	95569	95617	95665	95713	95761	95809	95856
91	95904	95952	95999	96047	96095	96142	96190	96237	96284	96332
92	96379	96426	96473	96520	96567	96614	96661	96708	96755	96802
93	96848	96895	96942	96988	97035	97081	97128	97174	97220	97267
94	97313	97359	97405	97451	97497	97543	97589	97635	97681	97727
95	97772	97818	97864	97909	97955	98000	98046	98091	98137	98182
96	98227	98272	98318	98363	98408	98453	98498	98543	98588	98632
97	98677	98722	98767	98811	98856	98900	98945	98989	99034	99078
98	99123	99167	99211	99255	99300	99344	99388	99432	99476	99520
99	99564	99607	99651	99695	99739	99782	99826	99870	99913	99957
100	00000	00043	00087	00130	00173	00217	00260	00303	00346	00389

Beispiele: $\lg n = 3{,}91540 \rightarrow n = 8230$,

$\lg n = 0{,}78604 - 2 \rightarrow n = 0{,}0611$.

Tabelle 1.16: Natürliche Werte der Winkelfunktionen

sin 0°...sin 45°

Min.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	(1,0)	
0	0,00000	00175	00349	00524	00698	00873	01047	01222	01396	01571	01745	**89**
1	01745	01920	02094	02269	02443	02618	02792	02967	03141	03316	03490	**88**
2	03490	03664	03839	04013	04188	04362	04536	04711	04885	05059	05234	**87**
3	05234	05408	05582	05756	05931	06105	06279	06453	06627	06802	06976	**86**
4	06976	07150	07324	07498	07672	07846	08020	08194	08368	08542	08716	**85**
5	08716	08889	09063	09237	09411	09585	09758	09932	10106	10279	10453	**84**
6	10453	10626	10800	10973	11147	11320	11494	11667	11840	12014	12187	**83**
7	12187	12360	12533	12706	12880	13053	13226	13399	13572	13744	13917	**82**
8	13917	14090	14263	14436	14608	14781	14954	15126	15299	15471	15643	**81**
9	15643	15816	15988	16160	16333	16505	16677	16849	17021	17193	17365	**80**
10	0,17365	17537	17708	17880	18052	18224	18395	18567	18738	18910	19081	**79**
11	19081	19252	19423	19595	19766	19937	20108	20279	20450	20620	20791	**78**
12	20791	20962	21132	21303	21474	21644	21814	21985	22155	22325	22495	**77**
13	22495	22665	22835	23005	23175	23345	23514	23684	23853	24023	24192	**76**
14	24192	24362	24531	24700	24869	25038	25207	25376	25545	25713	25882	**75**
15	25882	26050	26219	26387	26556	26724	26892	27060	27228	27396	27564	**74**
16	27564	27731	27899	28067	28234	28402	28569	28736	28903	29070	29237	**73**
17	29237	29404	29571	29737	29904	30071	30237	30403	30570	30736	30902	**72**
18	30902	31068	31233	31399	31565	31730	31896	32061	32227	32392	32557	**71**
19	32557	32722	32887	33051	33216	33381	33545	33710	33874	34038	34202	**70**
20	0,34202	34366	34530	34694	34857	35021	35184	35347	35511	35674	35837	**69**
21	35837	36000	36162	36325	36488	36650	36812	36975	37137	37299	37461	**68**
22	37461	37622	37784	37946	38107	38268	38430	38591	38752	38912	39073	**67**
23	39073	39234	39394	39555	39715	39875	40035	40195	40355	40514	40674	**66**
24	40674	40833	40992	41151	41310	41469	41628	41787	41945	42104	42262	**65**
25	42262	42420	42578	42736	42894	43051	43209	43366	43523	43680	43837	**64**
26	43837	43994	44151	44307	44464	44620	44776	44932	45088	45243	45399	**63**
27	45399	45554	45710	45865	46020	46175	46330	46484	46639	46793	46947	**62**
28	46947	47101	47255	47409	47562	47716	47869	48022	48175	48328	48481	**61**
29	48481	48634	48786	48938	49090	49242	49394	49546	49697	49849	50000	**60**
30	0,50000	50151	50303	50453	50603	50754	50904	51054	51204	51354	51504	**59**
31	51504	51653	51803	51952	52101	52250	52399	52547	52696	52844	52992	**58**
32	52992	53140	53288	53435	53583	53730	53877	54024	54171	54317	54464	**57**
33	54464	54610	54756	54902	55048	55194	55339	55484	55630	55775	55919	**56**
34	55919	56064	56208	56353	56497	56641	56784	56928	57071	57215	57358	**55**
35	57358	57501	57643	57786	57928	58070	58212	58354	58496	58637	58779	**54**
36	58779	58920	59061	59201	59342	59482	59622	59763	59902	60042	60182	**53**
37	60182	60321	60460	60599	60738	60876	61015	61153	61291	61429	61566	**52**
38	61566	61704	61841	61978	62115	62251	62388	62524	62660	62796	62932	**51**
39	62932	63068	63203	63338	63473	63608	63742	63877	64011	64145	64279	**50**
40	0,64279	64412	64546	64679	64812	64945	65077	65210	65342	65474	65606	**49**
41	65606	65738	65869	66000	66131	66262	66393	66523	66653	66783	66913	**48**
42	66913	67043	67172	67301	67430	67559	67688	67816	67944	68072	68200	**47**
43	68200	68327	68455	68582	68709	68835	68962	69088	69214	69340	69466	**46**
44	69466	69591	69717	69842	69966	70091	70215	70339	70463	70587	70711	**45**
	(1,0)	,9	,8	,7	,6	,5	,4	,3	,2	,1	,0	Grad
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	Min.

cos 45°...cos 90°

Beispiele: $\alpha = 15{,}6° = 15°36' \rightarrow \sin\alpha = 0{,}26892$,

$\sin\alpha = 0{,}67301 \rightarrow \alpha = 42{,}3° = 42°18'$,

$\alpha = 57{,}2° = 57°12' \rightarrow \cos\alpha = 0{,}54171$,

$\cos\alpha = 0{,}67301 \rightarrow \alpha = 47{,}7° = 47°42'$.

Tabelle 1.16 (Fortsetzung)

sin 45°...sin 90°

Min.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	(1,0)	
45	0,70711	70834	70957	71080	71203	71325	71447	71569	71691	71813	71934	44
46	71934	72055	72176	72297	72417	72537	72657	72777	72897	73016	73135	43
47	73135	73254	73373	73491	73610	73728	73846	73963	74080	74198	74314	42
48	74314	74431	74548	74664	74780	74896	75011	75126	75241	75356	75471	41
49	75471	75585	75700	75813	75927	76041	76154	76267	76380	76492	76604	40
50	0,76604	76717	76828	76940	77051	77162	77273	77384	77494	77605	77715	39
51	77715	77824	77934	78043	78152	78261	78369	78478	78586	78694	78801	38
52	78801	78908	79016	79122	79229	79335	79441	79547	79653	79758	79864	37
53	79864	79968	80073	80178	80282	80386	80489	80593	80696	80799	80902	36
54	80902	81004	81106	81208	81310	81412	81513	81614	81714	81815	81915	35
55	81915	82015	82115	82214	82314	82413	82511	82610	82708	82806	82904	34
56	82904	83001	83098	83195	83292	83389	83485	83581	83676	83772	83867	33
57	83867	83962	84057	84151	84245	84339	84433	84526	84619	84712	84805	32
58	84805	84897	84989	85081	85173	85264	85355	85446	85536	85627	85717	31
59	85717	85806	85896	85985	86074	86163	86251	86340	86427	86515	86603	30
60	0,86603	86690	86777	86863	86949	87036	87121	87207	87292	87377	87462	29
61	87462	87546	87631	87715	87798	87882	87965	88048	88130	88213	88295	28
62	88295	88377	88458	88539	88620	88701	88782	88862	88942	89021	89101	27
63	89101	89180	89259	89337	89415	89493	89571	89649	89726	89803	89879	26
64	89879	89956	90032	90108	90183	90259	90334	90408	90483	90557	90631	25
65	90631	90704	90778	90851	90924	90996	91068	91140	91212	91283	91355	24
66	91355	91425	91496	91566	91636	91706	91775	91845	91914	91982	92050	23
67	92050	92119	92186	92254	92321	92388	92455	92521	92587	92653	92718	22
68	92718	92784	92849	92913	92978	93042	93106	93169	93232	93295	93358	21
69	93358	93420	93483	93544	93606	93667	93728	93789	93849	93909	93969	20
70	0,93969	94029	94088	94147	94206	94264	94322	94380	94438	94495	94552	19
71	94552	94609	94665	94721	94777	94832	94888	94943	94997	95052	95106	18
72	95106	95159	95213	95266	95319	95372	95424	95476	95528	95579	95630	17
73	95630	95681	95732	95782	95832	95882	95931	95981	96029	96078	96126	16
74	96126	96174	96222	96269	96316	96363	96410	96456	96502	96547	96593	15
75	96593	96638	96682	96727	96771	96815	96858	96902	96945	96987	97030	14
76	97030	97072	97113	97155	97196	97237	97278	97318	97358	97398	97437	13
77	97437	97476	97515	97553	97592	97630	97667	97705	97742	97778	97815	12
78	97815	97851	97887	97922	97958	97992	98027	98061	98096	98129	98163	11
79	98163	98196	98229	98261	98294	98325	98357	98389	98420	98450	98481	10
80	0,98481	98511	98541	98570	98600	98629	98657	98686	98714	98741	98769	9
81	98769	98796	98823	98849	98876	98902	98927	98953	98978	99002	99027	8
82	99027	99051	99075	99098	99122	99144	99167	99189	99211	99233	99255	7
83	99255	99276	99297	99317	99337	99357	99377	99396	99415	99434	99452	6
84	99452	99470	99488	99506	99523	99540	99556	99572	99588	99604	99619	5
85	99619	99635	99649	99664	99678	99692	99705	99719	99731	99744	99756	4
86	99756	99768	99780	99792	99803	99813	99824	99834	99844	99854	99863	3
87	99863	99872	99881	99889	99897	99905	99912	99919	99926	99933	99939	2
88	99939	99945	99951	99956	99961	99966	99970	99974	99978	99982	99985	1
89	99985	99988	99990	99993	99995	99996	99998	99999	99999	1,00000	1,00000	0
	(1,0)	,9	,8	,7	,6	,5	,4	,3	,2	,1	,0	Grad
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	Min.

cos 0°...cos 45°

Beispiele: $\alpha = 76{,}25° = 76°15' \rightarrow \sin\alpha = 0{,}97134$,

$\sin\alpha = 0{,}96602 \rightarrow \alpha = 75{,}02° = 75°1{,}2'$,

$\alpha = 16{,}55° = 16°33' \rightarrow \cos\alpha = 0{,}95857$,

$\cos\alpha = 0{,}95951 \rightarrow \alpha = 16{,}36° = 16°21{,}6'$.

Tabelle 1.16 (Fortsetzung)

tan 0°...tan 45°

Min.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	(1,0)	
0	0,00000	00175	00349	00524	00698	00873	01047	01222	01396	01571	01746	89
1	01746	01920	02095	02269	02444	02619	02793	02968	03143	03317	03492	88
2	03492	03667	03842	04016	04191	04366	04541	04716	04891	05066	05241	87
3	05241	05416	05591	05766	05941	06116	06291	06467	06642	06817	06993	86
4	06993	07168	07344	07519	07695	07870	08046	08221	08397	08573	08749	85
5	08749	08925	09101	09277	09453	09629	09805	09981	10158	10334	10510	84
6	10510	10687	10863	11040	11217	11394	11570	11747	11924	12101	12278	83
7	12278	12456	12633	12810	12988	13165	13343	13521	13698	13876	14054	82
8	14054	14232	14410	14588	14767	14945	15124	15302	15481	15660	15838	81
9	15838	16017	16196	16376	16555	16734	16914	17093	17273	17453	17633	80
10	0,17633	17813	17993	18173	18353	18534	18714	18895	19076	19257	19438	79
11	19438	19619	19801	19982	20164	20345	20527	20709	20891	21073	21256	78
12	21256	21438	21621	21804	21986	22169	22353	22536	22719	22903	23087	77
13	23087	23271	23455	23639	23823	24008	24193	24377	24562	24747	24933	76
14	24933	25118	25304	25490	25676	25862	26048	26235	26421	26608	26795	75
15	26795	26982	27169	27357	27545	27732	27921	28109	28297	28486	28675	74
16	28675	28864	29053	29242	29432	29621	29811	30001	30192	30382	30573	73
17	30573	30764	30955	31147	31338	31530	31722	31914	32106	32299	32492	72
18	32492	32685	32878	33072	33266	33460	33654	33848	34043	34238	34433	71
19	34433	34628	34824	35020	35216	35412	35608	35805	36002	36199	36397	70
20	0,36397	36595	36793	36991	37190	37388	37588	37787	37986	38186	38386	69
21	38386	38587	38787	38988	39190	39391	39593	39795	39997	40200	40403	68
22	40403	40606	40809	41013	41217	41421	41626	41831	42036	42242	42447	67
23	42447	42654	42860	43067	43274	43481	43689	43897	44105	44314	44523	66
24	44523	44732	44942	45152	45362	45573	45784	45995	46206	46418	46631	65
25	46631	46843	47056	47270	47483	47698	47912	48127	48342	48557	48773	64
26	48773	48989	49206	49423	49640	49858	50076	50295	50514	50733	50953	63
27	50953	51173	51393	51614	51835	52057	52279	52501	52724	52947	53171	62
28	53171	53395	53620	53844	54070	54296	54522	54748	54975	55203	55431	61
29	55431	55659	55888	56117	56347	56577	56808	57039	57271	57503	57735	60
30	0,57735	57968	58201	58435	58670	58905	59140	59376	59612	59849	60086	59
31	60086	60324	60562	60801	61040	61280	61520	61761	62003	62245	62487	58
32	62487	62730	62973	63217	63462	63707	63953	64199	64446	64693	64941	57
33	64941	65189	65438	65688	65938	66189	66440	66692	66944	67197	67451	56
34	67451	67705	67960	68215	68471	68728	68985	69243	69502	69761	70021	55
35	70021	70281	70542	70804	71066	71329	71593	71857	72122	72388	72654	54
36	72654	72921	73189	73457	73726	73996	74267	74538	74810	75082	75355	53
37	75355	75629	75904	76180	76456	76733	77010	77289	77568	77848	78129	52
38	78129	78410	78692	78975	79259	79544	79829	80115	80402	80690	80978	51
39	80978	81268	81558	81849	82141	82434	82727	83022	83317	83613	83910	50
40	0,83910	84208	84507	84806	85107	85408	85710	86014	86318	86623	86929	49
41	86929	87236	87543	87852	88162	88473	88784	89097	89410	89725	90040	48
42	90040	90357	90674	90993	91313	91633	91955	92277	92601	92926	93252	47
43	93252	93578	93906	94235	94565	94896	95229	95562	95897	96232	96569	46
44	96569	96907	97246	97586	97927	98270	98613	98958	99304	99652	1,00000	45
	(1,0)	,9	,8	,7	,6	5	,4	,3	,2	,1	,0	Grad
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	Min.

cot 45°...cot 90°

Beispiele: $\alpha = 13{,}7° = 13°42' \rightarrow \tan\alpha = 0{,}24377$,

$\tan\alpha = 0{,}39190 \rightarrow \alpha = 21{,}4° = 21°24'$,

$\alpha = 82{,}1° = 82°6' \rightarrow \cot\alpha = 0{,}13876$,

$\cot\alpha = 0{,}39190 \rightarrow \alpha = 68{,}6° = 68°36'$.

Tabelle 1.16 (Fortsetzung)

tan 45°...tan 90°

Min.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9	(1,0)	
45	1,00000	00350	00701	01053	01406	01761	02117	02474	02832	03192	03553	44
46	03553	03915	04279	04644	05010	05378	05747	06117	06489	06862	07237	43
47	07237	07613	07990	08369	08749	09131	09514	09899	10285	10672	11061	42
48	11061	11452	11844	12238	12633	13029	13428	13828	14229	14632	15037	41
49	15037	15443	15851	16261	16672	17085	17500	17916	18334	18754	19175	40
50	1,1918	1960	2002	2045	2088	2131	2174	2218	2261	2305	2349	39
51	2349	2393	2437	2482	2527	2572	2617	2662	2708	2753	2799	38
52	2799	2846	2892	2938	2985	3032	3079	3127	3175	3222	3270	37
53	3270	3319	3367	3416	3465	3514	3564	3613	3663	3713	3764	36
54	3764	3814	3865	3916	3968	4019	4071	4124	4176	4229	4281	35
55	4281	4335	4388	4442	4496	4550	4605	4659	4715	4770	4826	34
56	4826	4882	4938	4994	5051	5108	5166	5224	5282	5340	5399	33
57	5399	5458	5517	5577	5637	5697	5757	5818	5880	5941	6003	32
58	6003	6066	6128	6191	6255	6319	6383	6447	6512	6577	6643	31
59	6643	6709	6775	6842	6909	6977	7045	7113	7182	7251	7321	30
60	1,7321	7391	7461	7532	7603	7675	7747	7820	7893	7966	8040	29
61	8040	8115	8190	8265	8341	8418	8495	8572	8650	8728	8807	28
62	8807	8887	8967	9047	9128	9210	9292	9375	9458	9542	9626	27
63	9626	9711	9797	9883	9970	*0057	*0145	*0233	*0323	*0413	*0503	26
64	2,0503	0594	0686	0778	0872	0965	1060	1155	1251	1348	1445	25
65	1445	1543	1642	1742	1842	1943	2045	2148	2251	2355	2460	24
66	2460	2566	2673	2781	2889	2998	3109	3220	3332	3445	3559	23
67	3559	3673	3789	3906	4023	4142	4262	4383	4504	4627	4751	22
68	4751	4876	5002	5129	5257	5386	5517	5649	5782	5916	6051	21
69	6051	6187	6325	6464	6605	6746	6889	7034	7179	7326	7475	20
70	2,7475	7625	7776	7929	8083	8239	8397	8556	8716	8878	9042	19
71	9042	9208	9375	9544	9714	9887	*0061	*0237	*0415	*0595	*0777	18
72	3,0777	0961	1146	1334	1524	1716	1910	2106	2305	2506	2709	17
73	2709	2914	3122	3332	3544	3759	3977	4197	4420	4646	4874	16
74	4874	5105	5339	5576	5816	6059	6305	6554	6806	7062	7321	15
75	7321	7583	7848	8118	8391	8667	8947	9232	9520	9812	*0108	14
76	4,0108	0408	0713	1022	1335	1653	1976	2303	2635	2972	3315	13
77	3315	3662	4015	4373	4737	5107	5483	5864	6252	6646	7046	12
78	7046	7453	7867	8288	8716	9152	9594	*0045	*0504	*0970	*1446	11
79	5,1446	1929	2422	2924	3435	3955	4486	5026	5578	6140	6713	10
80	5,6713	5,7297	5,7894	5,8502	5,9124	5,9758	6,0405	6,1066	6,1742	6,2432	6,3138	9
81	6,3138	6,3859	6,4596	6,5350	6,6122	6,6912	6,7720	6,8548	6,9395	7,0264	7,1154	8
82	7,1154	7,2066	7,3002	7,3962	7,4947	7,5958	7,6996	7,8062	7,9158	8,0285	8,1443	7
83	8,1443	8,2636	8,3863	8,5126	8,6427	8,7769	8,9152	9,0579	9,2052	9,3572	9,5144	6
84	9,5144	9,6768	9,8448	10,019	10,199	10,385	10,579	10,780	10,988	11,205	11,430	5
85	11,430	11,664	11,909	12,163	12,429	12,706	12,996	13,300	13,617	13,951	14,301	4
86	14,301	14,669	15,056	15,464	15,895	16,350	16,832	17,343	17,886	18,464	19,081	3
87	19,081	19,740	20,446	21,205	22,022	22,904	23,859	24,898	26,031	27,271	28,636	2
88	28,636	30,145	31,821	33,694	35,801	38,188	40,917	44,066	47,739	52,081	57,290	1
89	57,290	63,657	71,615	81,847	95,489	114,59	143,24	190,98	286,48	572,96	(∞)	0
	(1,0)	,9	,8	,7	,6	,5	,4	,3	,2	,1	,0	Grad
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	Min.

cot 0°...cot45°

Beispiele: $\alpha = 55{,}86° = 55°51{,}6' \rightarrow \tan\alpha = 1{,}47480$,

$\tan\alpha = 1{,}15645 \rightarrow \alpha = 49{,}15° = 49°9'$,

$\alpha = 36{,}63° = 36°37{,}8' \rightarrow \cot\alpha = 1{,}34503$,

$\cot\alpha = 2{,}0384 \rightarrow \alpha = 26{,}13° = 26°7{,}8'$.

Tabelle 1.17: Natürliche Logarithmen der Zahlen 1...1000

N.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	(−∞)	0,00000	0,69315	1,09861	1,38629	1,60944	1,79176	1,94591	2,07944	2,19722
1	2,30259	39790	48491	56495	63906	70805	77259	83321	89037	94444
2	99573	*04452	*09104	*13549	*17805	*21888	*25810	*29584	*33220	*36730
3	3,40120	43399	46574	49651	52636	55535	58352	61092	63759	66356
4	68888	71357	73767	76120	78419	80666	82864	85015	87120	89182
5	91202	93183	95124	97029	98898	*00733	*02535	*04305	*06044	*07754
6	4,09434	11087	12713	14313	15888	17439	18965	20469	21951	23411
7	24850	26268	27667	29046	30407	31749	33073	34381	35671	36945
8	38203	39445	40672	41884	43082	44265	45435	46591	47734	48864
9	49981	51086	52179	53260	54329	55388	56435	57471	58497	59512
10	4,60517	61512	62497	63473	64439	65396	66344	67283	68213	69135
11	70048	70953	71850	72739	73620	74493	75359	76217	77068	77912
12	78749	79579	80402	81218	82028	82831	83628	84419	85203	85981
13	86753	87520	88280	89035	89784	90527	91265	91998	92725	93447
14	94164	94876	95583	96284	96981	97673	98361	99043	99721	*00395
15	5,01064	01728	02388	03044	03695	04343	04986	05625	06260	06890
16	07517	08140	08760	09375	09987	10595	11199	11799	12396	12990
17	13580	14166	14749	15329	15906	16479	17048	17615	18178	18739
18	19296	19850	20401	20949	21494	22036	22575	23111	23644	24175
19	24702	25227	25750	26269	26786	27300	27811	28320	28827	29330
20	5,29832	30330	30827	31321	31812	32301	32788	33272	33754	34233
21	34711	35186	35659	36129	36598	37064	37528	37990	38450	38907
22	39363	39816	40268	40717	41165	41610	42053	42495	42935	43372
23	43808	44242	44674	45104	45532	45959	46383	46806	47227	47646
24	48064	48480	48894	49306	49717	50126	50533	50939	51343	51745
25	5,52146	52545	52943	53339	53733	54126	54518	54908	55296	55683
26	56068	56452	56834	57215	57595	57973	58350	58725	59099	59471
27	59842	60212	60580	60947	61313	61677	62040	62402	62762	63121
28	63479	63835	64191	64545	64897	65249	65599	65948	66296	66643
29	66988	67332	67675	68017	68358	68698	69036	69373	69709	70044
30	5,70378	70711	71043	71373	71703	72031	72359	72685	73010	73334
31	73657	73979	74300	74620	74939	75257	75574	75890	76205	76519
32	76832	77144	77455	77765	78074	78383	78690	78996	79301	79606
33	79909	80212	80513	80814	81114	81413	81711	82008	82305	82600
34	82895	83188	83481	83773	84064	84354	84644	84932	85220	85507
35	5,85793	86079	86363	86647	86930	87212	87493	87774	88053	88332
36	88610	88888	89164	89440	89715	89990	90263	90536	90808	91080
37	91350	91620	91889	92158	92426	92693	92959	93225	93489	93754
38	94017	94280	94542	94803	95064	95324	95584	95842	96101	96358
39	96615	96871	97126	97381	97635	97889	98141	98394	98645	98896
40	99146	99396	99645	99894	*00141	*00389	*00635	*00881	*01127	*01372
41	6,01616	01859	02102	02345	02587	02828	03069	03309	03548	03787
42	04025	04263	04501	04737	04973	05209	05444	05678	05912	06146
43	06379	06611	06843	07074	07304	07535	07764	07993	08222	08450
44	08677	08904	09131	09357	09582	09807	10032	10256	10479	10702
45	6,10925	11147	11368	11589	11810	12030	12249	12468	12687	12905
46	13123	13340	13556	13773	13988	14204	14419	14633	14847	15060
47	15273	15486	15698	15910	16121	16331	16542	16752	16961	17170
48	17379	17587	17794	18002	18208	18415	18621	18826	19032	19236
49	19441	19644	19848	20051	20254	20456	20658	20859	21060	21261
50	6,21461	21661	21860	22059	22258	22456	22654	22851	23048	23245

Beispiele: ln 3 = 1,09861; ln 30 = 3,40120; ln 300 = 5,70378.

Tabelle 1.17 (Fortsetzung)

N.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	6,21461	21661	21860	22059	22258	22456	22654	22851	23048	23245
51	23441	23637	23832	24028	24222	24417	24611	24804	24998	25190
52	25383	25575	25767	25958	26149	26340	26530	26720	26910	27099
53	27288	27476	27664	27852	28040	28227	28413	28600	28786	28972
54	29157	29342	29527	29711	29895	30079	30262	30445	30628	30810
55	6,30992	31173	31355	31536	31716	31897	32077	32257	32436	32615
56	32794	32972	33150	33328	33505	33683	33859	34036	34212	34388
57	34564	34739	34914	35089	35263	35437	35611	35784	35957	36130
58	36303	36475	36647	36819	36990	37161	37332	37502	37673	37843
59	38012	38182	38351	38519	38688	38856	39024	39192	39359	39526
60	6,39693	39859	40026	40192	40357	40523	40688	40853	41017	41182
61	41346	41510	41673	41836	41999	42162	42325	42487	42649	42811
62	42972	43133	43294	43455	43615	43775	43935	44095	44254	44413
63	44572	44731	44889	45047	45205	45362	45520	45677	45834	45990
64	46147	46303	46459	46614	46770	46925	47080	47235	47389	47543
65	6,47697	47851	48004	48158	48311	48464	48616	48768	48920	49072
66	49224	49375	49527	49677	49828	49979	50129	50279	50429	50578
67	50728	50877	51026	51175	51323	51471	51619	51767	51915	52062
68	52209	52356	52503	52649	52796	52942	53088	53233	53379	53524
69	53669	53814	53959	54103	54247	54391	54535	54679	54822	54965
70	6,55108	55251	55393	55536	55678	55820	55962	56103	56244	56386
71	56526	56667	56808	56948	57088	57228	57368	57508	57647	57786
72	57925	58064	58203	58341	58479	58617	58755	58893	59030	59167
73	59304	59441	59578	59715	59851	59987	60123	60259	60394	60530
74	60665	60800	60935	61070	61204	61338	61473	61607	61740	61874
75	6,62007	62141	62274	62407	62539	62672	62804	62936	63068	63200
76	63332	63463	63595	63726	63857	63988	64118	64249	64379	64509
77	64639	64769	64898	65028	65157	65286	65415	65544	65673	65801
78	65929	66058	66185	66313	66441	66568	66696	66823	66950	67077
79	67203	67330	67456	67582	67708	67834	67960	68085	68211	68336
80	6,68461	68586	68711	68835	68960	69084	69208	69332	69456	69580
81	69703	69827	69950	70073	70196	70319	70441	70564	70686	70808
82	70930	71052	71174	71296	71417	71538	71659	71780	71901	72022
83	72143	72263	72383	72503	72623	72743	72863	72982	73102	73221
84	73340	73459	73578	73697	73815	73934	74052	74170	74288	74406
85	6,74524	74641	74759	74876	74993	75110	75227	75344	75460	75577
86	75693	75809	75926	76041	76157	76273	76388	76504	76619	76734
87	76849	76964	77079	77194	77308	77422	77537	77651	77765	77878
88	77992	78106	78219	78333	78446	78559	78672	78784	78897	79010
89	79122	79234	79347	79459	79571	79682	79794	79906	80017	80128
90	6,80239	80351	80461	80572	80683	80793	80904	81014	81124	81235
91	81344	81454	81564	81674	81783	81892	82002	82111	82220	82329
92	82437	82546	82655	82763	82871	82979	83087	83195	83303	83411
93	83518	83626	83733	83841	83948	84055	84162	84268	84375	84482
94	84588	84694	84801	84907	85013	85118	85224	85330	85435	85541
95	6,85646	85751	85857	85961	86066	86171	86276	86380	86485	86589
96	86693	86797	86901	87005	87109	87213	87316	87420	87523	87626
97	87730	87833	87936	88038	88141	88244	88346	88449	88551	88653
98	88755	88857	88959	89061	89163	89264	89366	89467	89568	89669
99	89770	89871	89972	90073	90174	90274	90375	90475	90575	90675
100	6,90776	90875	90975	91075	91175	91274	91374	91473	91572	91672

Beispiele:

$\ln 21540 = \ln (30 \cdot 718)$
$= \ln 30 + \ln 718$
$= 3{,}40120 + 6{,}57647$
$= 9{,}97767$

$\ln 0{,}042 = \ln (42 : 1000)$
$= \ln 42 - \ln 1000$
$= 3{,}73767 - 6{,}90776$
$= -3{,}17009$

Tabelle 1.18: Exponentialfunktionen e^x und e^{-x}

x rad	Grad	e^x	e^{-x}	x rad	Grad	e^x	e^{-x}	x rad	Grad	e^x	e^{-x}
0,00	**0,00°**	**1,0000**	**1,0000**	**0,50**	**28,65°**	**1,6487**	**0,6065**	**1,00**	**57,30°**	**2,7183**	**0,3679**
0,01	0,57	1,0101	0,9900	0,51	29,22	1,6653	0,6005	1,01	57,87	2,7456	0,3642
0,02	1,15	1,0202	0,9802	0,52	29,79	1,6820	0,5945	1,02	58,44	2,7732	0,3606
0,03	1,72	1,0305	0,9704	0,53	30,37	1,6989	0,5886	1,03	59,01	2,8011	0,3570
0,04	2,29	1,0408	0,9608	0,54	30,94	1,7160	0,5827	1,04	59,59	2,8292	0,3535
0,05	2,86	1,0513	0,9512	0,55	31,51	1,7333	0,5769	1,05	60,16	2,8577	0,3499
0,06	3,44	1,0618	0,9418	0,56	32,09	1,7507	0,5712	1,06	60,73	2,8864	0,3465
0,07	4,01	1,0725	0,9324	0,57	32,66	1,7683	0,5655	1,07	61,31	2,9154	0,3430
0,08	4,58	1,0833	0,9231	0,58	32,23	1,7860	0,5599	1,08	61,88	2,9447	0,3396
0,09	5,16	1,0942	0,9139	0,59	33,80	1,8040	0,5543	1,09	62,45	2,9743	0,3362
0,10	**5,73°**	**1,1052**	**0,9048**	**0,60**	**34,38°**	**1,8221**	**0,5488**	**1,10**	**63,03°**	**3,0042**	**0,3329**
0,11	6,30	1,1163	0,8958	0,61	34,95	1,8404	0,5434	1,11	63,60	3,0344	0,3296
0,12	6,88	1,1275	0,8869	0,62	35,52	1,8589	0,5379	1,12	64,17	3,0649	0,3263
0,13	7,45	1,1388	0,8781	0,63	36,10	1,8776	0,5326	1,13	64,74	3,0957	0,3230
0,14	8,02	1,1503	0,8694	0,64	36,67	1,8965	0,5273	1,14	65,32	3,1268	0,3198
0,15	8,59	1,1618	0,8607	0,65	37,24	1,9155	0,5220	1,15	65,89	3,1582	0,3166
0,16	9,17	1,1735	0,8521	0,66	37,82	1,9348	0,5169	1,16	66,46	3,1899	0,3135
0,17	9,74	1,1853	0,8437	0,67	38,39	1,9542	0,5117	1,17	67,04	3,2220	0,3104
0,18	10,31	1,1972	0,8353	0,68	38,96	1,9739	0,5066	1,18	67,61	3,2544	0,3073
0,19	10,89	1,2092	0,8270	0,69	39,53	1,9937	0,5016	1,19	68,18	3,2871	0,3042
0,20	**11,46°**	**1,2214**	**0,8187**	**0,70**	**40,11°**	**2,0138**	**0,4966**	**1,20**	**68,75°**	**3,3201**	**0,3012**
0,21	12,03	1,2337	0,8106	0,71	40,68	2,0340	0,4916	1,21	69,33	3,3535	0,2982
0,22	12,61	1,2461	0,8025	0,72	41,25	2,0544	0,4868	1,22	69,90	3,3872	0,2952
0,23	13,18	1,2586	0,7945	0,73	41,83	2,0751	0,4819	1,23	70,47	3,4212	0,2923
0,24	13,75	1,2712	0,7866	0,74	42,40	2,0959	0,4771	1,24	71,05	3,4556	0,2894
0,25	14,32	1,2840	0,7788	0,75	42,97	2,1170	0,4724	1,25	71,62	3,4903	0,2865
0,26	14,90	1,2969	0,7711	0,76	43,54	2,1383	0,4677	1,26	72,19	3,5254	0,2837
0,27	15,47	1,3100	0,7634	0,77	44,12	2,1598	0,4630	1,27	72,77	3,5609	0,2808
0,28	16,04	1,3231	0,7558	0,78	44,69	2,1815	0,4584	1,28	73,34	3,5966	0,2780
0,29	16,62	1,3364	0,7483	0,79	45,26	2,2034	0,4538	1,29	73,91	3,6328	0,2753
0,30	**17,19°**	**1,3499**	**0,7408**	**0,80**	**45,84°**	**2,2255**	**0,4493**	**1,30**	**74,48°**	**3,6693**	**0,2725**
0,31	17,76	1,3634	0,7334	0,81	46,41	2,2479	0,4449	1,31	75,06	3,7062	0,2698
0,32	18,33	1,3771	0,7261	0,82	46,98	2,2705	0,4404	1,32	75,63	3,7434	0,2671
0,33	18,91	1,3910	0,7189	0,83	47,56	2,2933	0,4360	1,33	76,20	3,7810	0,2645
0,34	19,48	1,4049	0,7118	0,84	48,13	2,3164	0,4317	1,34	76,78	3,8190	0,2618
0,35	20,05	1,4191	0,7047	0,85	48,70	2,3396	0,4274	1,35	77,35	3,8574	0,2592
0,36	20,63	1,4333	0,6977	0,86	49,27	2,3632	0,4232	1,36	77,92	3,8962	0,2567
0,37	21,20	1,4477	0,6907	0,87	49,85	2,3869	0,4190	1,37	78,50	3,9354	0,2541
0,38	21,77	1,4623	0,6839	0,88	50,42	2,4109	0,4148	1,38	79,07	3,9749	0,2516
0,39	22,35	1,4770	0,6771	0,89	50,99	2,4351	0,4107	1,39	79,64	4,0149	0,2491
0,40	**22,92°**	**1,4918**	**0,6703**	**0,90**	**51,57°**	**2,4596**	**0,4066**	**1,40**	**80,21°**	**4,0552**	**0,2466**
0,41	23,49	1,5068	0,6637	0,91	52,14	2,4843	0,4025	1,41	80,79	4,0960	0,2441
0,42	24,06	1,5220	0,6570	0,92	52,71	2,5093	0,3985	1,42	81,36	4,1371	0,2417
0,43	24,64	1,5373	0,6505	0,93	53,29	2,5345	0,3946	1,43	81,93	4,1787	0,2393
0,44	25,21	1,5527	0,6440	0,94	53,86	2,5600	0,3906	1,44	82,51	4,2207	0,2369
0,45	25,78	1,5683	0,6376	0,95	54,43	2,5857	0,3867	1,45	83,08	4,2631	0,2346
0,46	26,36	1,5841	0,6313	0,96	55,00	2,6117	0,3829	1,46	83,65	4,3060	0,2322
0,47	26,93	1,6000	0,6250	0,97	55,58	2,6379	0,3791	1,47	84,22	4,3492	0,2299
0,48	27,50	1,6161	0,6188	0,98	56,15	2,6645	0,3753	1,48	84,80	4,3929	0,2276
0,49	28,07	1,6323	0,6126	0,99	56,72	2,6912	0,3716	1,49	85,37	4,4371	0,2254
0,50	**28,65°**	**1,6487**	**0,6065**	**1,00**	**57,30°**	**2,7183**	**0,3679**	**1,50**	**85,94°**	**4,4817**	**0,2231**

Tabelle 1.18 (Fortsetzung)

x rad	Grad	e^x	e^{-x}	x rad	Grad	e^x	e^{-x}	x rad	Grad	e^x	e^{-x}
1,50	85,94°	4,4817	0,2231	**2,00**	114,59°	7,3891	0,1353	**2,50**	143,24°	12,182	0,0821
1,51	86,52	4,5267	0,2209	2,01	115,16	7,4633	0,1340	2,55	146,10	12,807	0,0781
1,52	87,09	4,5722	0,2187	2,02	115,74	7,5383	0,1327	2,60	148,97	13,464	0,0743
1,53	87,66	4,6182	0,2165	2,03	116,31	7,6141	0,1313	2,65	151,83	14,154	0,0707
1,54	88,24	4,6646	0,2144	2,04	116,88	7,6906	0,1300	2,70	154,70	14,880	0,0672
1,55	88,81	4,7115	0,2122	2,05	117,46	7,7679	0,1287	2,75	157,56	15,643	0,0639
1,56	89,38	4,7588	0,2101	2,06	118,03	7,8460	0,1275	2,80	160,43	16,445	0,0608
1,57	89,95	4,8066	0,2080	2,07	118,60	7,9248	0,1262	2,85	163,29	17,288	0,0578
1,58	90,53	4,8550	0,2060	2,08	119,18	8,0045	0,1249	2,90	166,16	18,174	0,0550
1,59	91,10	4,9037	0,2039	2,09	119,75	8,0849	0,1237	2,95	169,02	19,106	0,0523
1,60	91,67°	4,9530	0,2019	**2,10**	120,32°	8,1662	0,1225	**3,00**	171,89°	20,086	0,0498
1,61	92,25	5,0028	0,1999	2,11	120,89	8,2482	0,1212	3,10	177,62	22,198	0,0450
1,62	92,82	5,0531	0,1979	2,12	121,47	8,3311	0,1200	3,20	183,35	24,533	0,0408
1,63	93,39	5,1039	0,1959	2,13	122,04	8,4149	0,1188	3,30	189,08	27,113	0,0369
1,64	93,97	5,1552	0,1940	2,14	122,61	8,4994	0,1177	3,40	194,81	29,964	0,0334
1,65	94,54	5,2070	0,1920	2,15	123,19	8,5849	0,1165	3,50	200,54	33,115	0,0302
1,66	95,11	5,2593	0,1901	2,16	123,76	8,6711	0,1153	3,60	206,26	36,598	0,0273
1,67	95,68	5,3122	0,1883	2,17	124,33	8,7583	0,1142	3,70	211,99	40,447	0,0247
1,68	96,26	5,3656	0,1864	2,18	124,90	8,8463	0,1130	3,80	217,72	44,701	0,0224
1,69	96,83	5,4195	0,1845	2,19	125,48	8,9352	0,1119	3,90	223,45	49,402	0,0202
1,70	97,40°	5,4739	0,1827	**2,20**	126,05°	9,0250	0,1108	**4,00**	229,18°	54,598	0,0183
1,71	97,98	5,5290	0,1809	2,21	126,62	9,1157	0,1097	4,10	234,91	60,340	0,0166
1,72	98,55	5,5845	0,1791	2,22	127,20	9,2073	0,1086	4,20	240,64	66,686	0,0150
1,73	99,12	5,6407	0,1773	2,23	127,77	9,2999	0,1075	4,30	246,37	73,700	0,0136
1,74	99,69	5,6973	0,1755	2,24	128,34	9,3933	0,1065	4,40	252,10	81,451	0,0123
1,75	100,27	5,7546	0,1738	2,25	128,92	9,4877	0,1054	4,50	257,83	90,017	0,0111
1,76	100,84	5,8124	0,1720	2,26	129,49	9,5831	0,1044	4,60	263,56	99,484	0,0101
1,77	101,41	5,8709	0,1703	2,27	130,06	9,6794	0,1033	4,70	269,29	109,95	0,0091
1,78	101,99	5,9299	0,1686	2,28	130,63	9,7767	0,1023	4,80	275,02	121,51	0,0082
1,79	102,56	5,9895	0,1670	2,29	131,21	9,8749	0,1013	4,90	280,75	134,29	0,0074
1,80	103,13°	6,0496	0,1653	**2,30**	131,78°	9,9742	0,1003	**5,00**	286,48°	148,41	0,0067
1,81	103,71	6,1104	0,1637	2,31	132,35	10,074	0,0993	5,10	292,21	164,02	0,0061
1,82	104,28	6,1719	0,1620	2,32	132,93	10,176	0,0983	5,20	297,94	181,27	0,0055
1,83	104,85	6,2339	0,1604	2,33	133,50	10,278	0,0973	5,30	303,67	200,34	0,0050
1,84	105,42	6,2965	0,1588	2,34	134,07	10,381	0,0963	5,40	309,40	221,41	0,0045
1,85	106,00	6,3598	0,1572	2,35	134,65	10,486	0,0954	5,50	315,13	244,69	0,0041
1,86	106,57	6,4237	0,1557	2,36	135,22	10,591	0,0944	5,60	320,86	270,43	0,0037
1,87	107,14	6,4883	0,1541	2,37	135,79	10,697	0,0935	5,70	326,59	298,87	0,0033
1,88	107,72	6,5535	0,1526	2,38	136,36	10,805	0,0926	5,80	332,32	330,30	0,0030
1,89	108,29	6,6194	0,1511	2,39	136,94	10,913	0,0916	5,90	338,05	365,04	0,0027
1,90	108,86°	6,6859	0,1496	**2,40**	137,51°	11,023	0,0907	**6,00**	343,77°	403,43	0,0025
1,91	109,44	6,7531	0,1481	2,41	138,08	11,134	0,0898	6,25	358,10	518,01	0,0019
1,92	110,01	6,8210	0,1466	2,42	138,66	11,246	0,0889	6,50	372,42	665,14	0,0015
1,93	110,58	6,8895	0,1451	2,43	139,23	11,359	0,0880	6,75	386,75	854,06	0,0012
1,94	111,15	6,9588	0,1437	2,44	139,80	11,473	0,0872	7,00	401,07	1096,6	0,0009
1,95	111,73	7,0287	0,1423	2,45	140,37	11,588	0,0863	7,50	429,72	1808,0	0,0006
1,96	112,30	7,0993	0,1409	2,46	140,95	11,705	0,0854	8,00	458,37	2981,0	0,0003
1,97	112,87	7,1707	0,1395	2,47	141,52	11,822	0,0846	8,50	487,01	4914,8	0,0002
1,98	113,45	7,2427	0,1381	2,48	142,09	11,941	0,0837	9,00	515,66	8103,1	0,0001
1,99	114,02	7,3155	0,1367	2,49	142,67	12,061	0,0829	9,50	544,31	13360	0,0001
2,00	114,59°	7,3891	0,1353	**2,50**	143,24°	12,182	0,0821	**10,00**	572,96°	22026	0,0000

Tabelle 1.19: Umrechnung Neper-Dezibel

Np	dB	$a_1 : a_2$	Np	dB	$a_1 : a_2$	Np	dB	$a_1 : a_2$ $10^3 \times$	Np	dB	$a_1 : a_2$ $10^4 \times$
0,00	0,000	1,000	**3,00**	26,06	20,1	**6,00**	52,12	0,403	**9,0**	78,17	0,810
0,10	0,869	1,105	3,10	26,93	22,1	6,10	52,98	0,446	9,1	79,04	0,895
0,20	1,737	1,221	3,20	27,79	24,5	6,20	53,85	0,493	9,2	79,91	0,990
0,30	2,606	1,350	3,30	28,66	27,1	6,30	54,72	0,532	9,3	80,78	1,094
0,40	3,474	1,492	3,40	29,53	30,0	6,40	55,59	0,602	9,4	81,65	1,209
0,50	4,343	1,649	3,50	30,40	33,1	6,50	56,46	0,665	9,5	82,52	1,336
0,60	5,212	1,822	3,60	31,27	36,6	6,60	57,33	0,735	9,6	83,38	1,476
0,70	6,080	2,014	3,70	32,14	40,4	6,70	58,20	0,812	9,7	84,25	1,632
0,80	6,949	2,226	3,80	33,01	44,7	6,80	59,06	0,898	9,8	85,12	1,803
0,90	7,817	2,460	3,90	33,88	49,4	6,90	59,93	0,992	9,9	85,99	1,993
1,00	8,686	2,718	**4,00**	34,74	54,6	**7,00**	60,80	1,097	**10,0**	86,86	2,203
1,10	9,554	3,00	4,10	35,61	60,3	7,10	61,67	1,212	10,1	87,73	2,434
1,20	10,42	3,32	4,20	36,48	66,7	7,20	62,54	1,339	10,2	88,60	2,690
1,30	11,29	3,67	4,30	37,35	73,7	7,30	63,41	1,480	10,3	89,46	2,973
1,40	12,16	4,06	4,40	38,22	81,5	7,40	64,28	1,636	10,4	90,33	3,286
1,50	13,03	4,48	4,50	39,09	90,0	7,50	65,14	1,808	10,5	91,20	3,632
1,60	13,90	4,95	4,60	39,96	99,5	7,60	66,01	1,998	10,6	92,07	4,013
1,70	14,77	5,47	4,70	40,82	110	7,70	66,88	2,208	10,7	92,94	4,436
1,80	15,63	6,05	4,80	41,69	122	7,80	67,75	2,441	10,8	93,81	4,902
1,90	16,50	6,69	4,90	42,56	134	7,90	68,62	2,697	10,9	94,68	5,418
2,00	17,37	7,39	**5,00**	43,43	148	**8,00**	69,49	2,981	**11,0**	95,54	5,987
2,10	18,24	8,17	5,10	44,30	164	8,10	70,36	3,294	11,2	97,28	7,313
2,20	19,11	9,03	5,20	45,17	181	8,20	71,22	3,641	11,4	99,02	8,932
2,30	19,98	9,97	5,30	46,04	200	8,30	72,09	4,024	11,6	100,8	10,91
2,40	20,85	11,02	5,40	46,90	221	8,40	72,96	4,447	11,8	102,5	13,33
2,50	21,71	12,18	5,50	47,77	245	8,50	73,83	4,915	12,0	104,7	16,28
2,60	22,58	13,46	5,60	48,64	270	8,60	74,70	5,432	12,5	108,7	26,80
2,70	23,45	14,88	5,70	49,51	299	8,70	75,57	5,999	13,0	112,9	44,24
2,80	24,32	16,45	5,80	50,38	330	8,80	76,44	6,634	14,0	121,6	120,3
2,90	25,19	18,17	5,90	51,25	365	8,90	77,30	7,332	15,0	130,3	326,9
3,00	26,06	20,09	**6,00**	52,12	403	**9,00**	78,17	8,103	**20,0**	173,7	48 520

Die durch zwei Größen a_1, a_2 (z. B. Spannungen oder Ströme) gegebene *Verstärkung* oder *Dämpfung* wird entweder als natürlicher Logarithmus ihres Quotienten (Neper, Np) oder als 20facher dekadischer (Dezibel, dB) dargestellt: $\ln |a_1 : a_2|$ in Np, $20 \lg |a_1 : a_2|$ in dB. Die Umrechnungsbeziehung lautet: 1 Np = 8,686 dB, 1 dB = 0,1151 Np.
Die Verstärkung bzw. Dämpfung für $a_1 : a_2 < 1$ wird ermittelt, indem zu dem Kehrwert der Tabellenwert aufgesucht und mit -1 multipliziert wird, da $\ln (1 : x) = -\ln x$ bzw. $\lg (1 : x) = -\lg x$. Das Aufsuchen des Quotienten zu einem negativen Pegel erfolgt entsprechend umgekehrt.

Beispiel 1: Ein Kabel dämpft eine Spannung um 0,80 Np, ein nachgeschalteter Filter nochmals um 0,20 Np, die gesamte Dämpfung beträgt also 1,00 Np. Man liest ab: $U_1 : U_2 = a_1 : a_2 = 2{,}718$. Der Spannungspegel U_2 am Ausgang des Filters beträgt das (1 : 2,718)fache oder 0,368fache des Eingangspegels U_1.

Beispiel 2: Ein Kabel dämpft den elektrischen Strom um 3,474 dB, ein nachgeschalteter Verstärker weist dagegen eine Verstärkung von 12,16 dB auf. Damit steht am Verstärkerausgang ein Pegel von 3,474 dB − 12,16 dB = −8,686 dB an. Dem entspricht ein Verhältnis von 1 : 2,718. Die Gesamtdämpfung beträgt somit das 0,368fache bzw. die Gesamtverstärkung das 2,718fache.

1.2. Aus der Chemie

1.2.1. Die chemischen Elemente

1.2.1.1. Periodensystem

Im Periodensystem der chemischen Elemente (Tabelle 1.20) wird deren Reihenfolge durch die *Ordnungszahl* bestimmt. Sie steht vor dem Kurzzeichen und entspricht der Anzahl der Protonen im Atomkern, somit dessen Ladungszahl sowie der Anzahl der Elektronen in der Atomhülle. Die sieben Perioden (Reihen) entsprechen den sieben Elektronenschalen, die zur gleichen

Tabelle 1.20: Periodensystem der Elemente

Periode	Gruppe																	
	I a	II a	III b	IV b	V b	VI b	VII b	VIII b			I b	II b	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a
1	1 H 1,00797																	2 He 4,0026
2	3 Li 6,939	4 Be 9,0122											5 B 10,811	6 C 12,01115	7 N 14,0067	8 O 15,9994	9 F 18,9984	10 Ne 20,179
3	11 Na 22,9898	12 Mg 24,305											13 Al 26,9815	14 Si 28,086	15 P 30,9738	16 S 32,064	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948
4	19 K 39,102	20 Ca 40,08	21 Sc 44,956	22 Ti 47,90	23 V 50,942	24 Cr 51,996	25 Mn 54,9381	26 Fe 55,847	27 Co 58,9332	28 Ni 58,71	29 Cu 63,546	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,9216	34 Se 78,96	35 Br 79,904	36 Kr 83,80
5	37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,905	40 Zr 91,22	41 Nb 92,906	42 Mo 95,94	43 Tc (99)	44 Ru 101,07	45 Rh 102,905	46 Pd 106,4	47 Ag 107,868	48 Cd 112,40	49 In 114,82	50 Sn 118,69	51 Sb 121,75	52 Te 127,60	53 I (J) 126,9044	54 Xe 131,30
6	55 Cs 132,905	56 Ba 137,34	57 La[1]) 138,91	72 Hf 178,49	73 Ta 180,948	74 W 183,85	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,09	79 Au 196,967	80 Hg 200,59	81 Tl 204,37	82 Pb 207,19	83 Bi 208,98	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac[2]) (227)															
[1]) Lanthaniden				58 Ce 140,12	59 Pr 140,907	60 Nd 144,24	61 Pm (147)	62 Sm 150,35	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,924	66 Dy 162,50	67 Ho 164,93	68 Er 167,26	69 Tm 168,934	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97	
[2]) Aktiniden				90 Th 232,038	91 Pa (231)	92 U 238,03	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (245)	97 Bk (247)	98 Cf (250)	99 Es (254)	100 Fm (255)	101 Md (255)	102 No (254)	103 Lr (257)	104 Ku (258)
				105 (Bo) (260)	106	107												

Gruppe (Spalte) gehörenden Elemente haben einander ähnliche chemische Eigenschaften.
Beispiel: Das Element Neon (Ne) hat einen Atomkern mit 10 Protonen, in den beiden Schalen der Hülle befinden sich insgesamt 10 Elektronen. Neon gehört zur Gruppe 0, den Edelgasen.

1.2.1.2. Relative Atommassen

Die relativen Atommassen (Tabelle 1.21) beziehen sich auf das Kohlenstoffisotop ^{12}C. Die eckige Klammer in der Tabelle bedeutet, daß die Massenzahl des langlebigsten Isotops angegeben ist.

Tabelle 1.21: Relative Atommassen A_r

Name	Symbol	$Z^1)$	A_r	Wertigkeit
Aktinium	Ac	89	[227]	3
Aluminium	Al	13	26,9815	3, (1)
Amerizium	Am	95	[243]	2, 3, 4, 5, 6
Antimon	Sb	51	121,75	3, 5, (−3)
Argon	Ar	18	39,948	0
Arsen	As	33	74,9216	3, 5, (−3)
Astatin	At	85	[210]	5, 7
Barium	Ba	56	137,34	2
Berkelium	Bk	97	[247]	3, 4
Beryllium	Be	4	9,0122	2
Blei	Pb	82	207,19	2, 4
Bohrium[2])	Bo	105	[260]	
Bor	B	5	10,811	3
Brom	Br	35	79,904	−1, 1, 5
Chlor	Cl	17	35,453	−1, 1, 3, 5, 7
Chrom	Cr	24	51,996	2, 3, 6, (1, 4, 5)
Curium	Cm	96	[245]	3
Dysprosium	Dy	66	162,50	3
Einsteinium	Es	99	[254]	
Eisen	Fe	26	55,847	2, 3, (6)
Erbium	Er	68	167,26	3
Europium	Eu	63	151,96	3, (2)
Fermium	Fm	100	[255]	
Fluor	F	9	18,9984	−1
Frankium	Fr	87	[223]	1
Gadolinium	Gd	64	157,25	3
Gallium	Ga	31	69,72	3, (1, 2)
Germanium	Ge	32	72,59	2, 4
Gold	Au	79	196,967	1, 3
Hafnium	Hf	72	178,49	4
Helium	He	2	4,0026	0
Holmium	Ho	67	164,930	3
Indium	In	49	114,82	3, (1, 2)
Jod (Jod)	I (J)	53	126,9044	−1, 1, 3, 5, 7
Iridium	Ir	77	192,2	3, 4, (1, 2, 6)
Kadmium	Cd	48	112,40	2
Kalifornium	Cf	98	[250]	
Kalium	K	19	39,102	1
Kalzium	Ca	20	40,08	2
Kobalt	Co	27	58,9332	2, 3, (4)
Kohlenstoff	C	6	12,01115	4
Krypton	Kr	36	83,80	0, (2, 4)
Kupfer	Cu	29	63,546	1, 2
Kurtschatovium	Ku	104	[258]	
Lanthan	La	57	138,91	3
Lawrenzium	Lr	103	[257]	
Lithium	Li	3	6,939	1
Lutetium	Lu	71	174,97	3
Magnesium	Mg	12	24,305	2
Mangan	Mn	25	54,9381	2, 4, 7, (1, 3, 5, 6)
Mendelevium	Md	101	[255]	
Molybdän	Mo	42	95,94	6, (2...5)
Natrium	Na	11	22,9898	1
Neodym	Nd	60	144,24	3, (4)
Neon	Ne	10	20,179	0
Neptunium	Np	93	[237]	
Nickel	Ni	28	58,71	2, (3, 4)
Niob	Nb	41	92,906	5, (2, 3, 4)
Nobelium	No	102	[254]	

Tabelle 1.21 (Fortsetzung)

Name	Symbol	$Z^1)$	A_r	Wertigkeit
Osmium	Os	76	190,2	6, 8, (2, 3, 4)
Palladium	Pd	46	106,4	2, 4, (3)
Phosphor	P	15	30,9738	−3, 3, 5
Platin	Pt	78	195,09	2, 4, (1, 3, 6)
Plutonium	Pu	94	[242]	3, 4, 5, 6
Polonium	Po	84	[210]	4
Praseodym	Pr	59	140,907	3, (4)
Promethium	Pm	61	[147]	3
Protaktinium	Pa	91	[231]	5
Quecksilber	Hg	80	200,59	1, 2
Radium	Ra	88	[226]	2
Radon	Rn	86	[222]	0
Rhenium	Re	75	186,2	4, 7, (3, 5, 6)
Rhodium	Rh	45	102,905	3, 4, (1, 2, 6)
Rubidium	Rb	37	85,47	1
Ruthenium	Ru	44	101,07	4, 8, (2, 3, 5...7)
Samarium	Sm	62	150,35	3, (2)
Sauerstoff	O	8	15,9994	−2
Skandium	Sc	21	44,956	3
Schwefel	S	16	32,064	−2, 4, 6
Selen	Se	34	78,96	−2, 4, 6
Silber	Ag	47	107,868	1, (2)
Silizium	Si	14	28,086	4
Stickstoff	N	7	14,0067	−3, 3, 5, (2, 4)
Strontium	Sr	38	87,62	2
Tantal	Ta	73	180,948	5, (2, 3, 4)
Technetium	Tc	43	[99]	7, (2...6)
Tellur	Te	52	127,60	4, 6, (−2)
Terbium	Tb	65	158,924	3, 4
Thallium	Tl	81	204,37	1, 3
Thorium	Th	90	232,038	4
Thulium	Tm	69	168,934	3
Titan	Ti	22	47,90	2, 4, (3)
Uran	U	92	238,03	2, 3, 4
Vanadin	V	23	50,942	5, (2, 3, 4)
Wasserstoff	H	1	1,00797	1, (−1)
Wismut	Bi	83	208,980	3, (−3, −5)
Wolfram	W	74	183,85	6, (2...5)
Xenon	Xe	54	131,30	0, (2, 4, 6, 8)
Ytterbium	Yb	70	173,04	3, (2)
Yttrium	Y	39	88,905	3
Zäsium	Cs	55	132,905	1
Zer	Ce	58	140,12	3, 4
Zink	Zn	30	65,37	2
Zinn	Sn	50	118,69	2, 4
Zirkon	Zr	40	91,22	4, (2, 3)

[1]) Z Kernladungszahl (Ordnungszahl)
[2]) auch Hahnium Ha oder Nielsbohrium Ns

1.2.2. Trivialname und chemische Benennung technisch wichtiger Stoffe

Tabelle 1.22 enthält Angaben zu technisch wichtigen Stoffen.

Tabelle 1.22: Trivialnamen und chemische Benennung

Trivialname	Chemische Formel	Chemischer Name bzw. Erläuterung
Äther	$C_4H_{10}O$	Diäthyläther
Ätzkali	KOH	Kaliumhydroxid
Ätzkalk	$Ca(OH)_2$	Kalziumhydroxid
Ätznatron	NaOH	Natriumhydroxid
Amalgame		Hg-Legierungen von Metallen
Anilin	C_6H_7N	Aminobenzol
Antichlor	$Na_2S_2O_3$	Natriumthiosulfat
Asbest		Ca-Mg-Silikate
Azeton	C_3H_6O	Propanon

Tabelle 1.22 (Fortsetzung)

Trivialname	Chemische Formel	Chemischer Name bzw. Erläuterung
Azetylen	C_2H_2	Äthin
Bleiglätte	PbO	Blei(II)-oxid
Bleiweiß	$PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$	basisches Bleikarbonat
Blutlaugensalz, gelbes	$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$	Kaliumhexazyanoferrat(II)
–, rotes	$K_3Fe(CN)_6$	Kaliumhexazyanoferrat(III)
Borax	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	Natriumtetraboratdekahydrat
Braunstein	MnO_2	Mangandioxid
Chlorkalk	CaCl(OCl)	Kalziumchloridhypochlorit
Eisenchlorid	$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	Eisen(II)-chloridtetrahydrat
Eisenrost	$FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot xH_2O$	Eisenoxidhydrat
Eisessig, Essig, Essigsäure	$C_2H_4O_2$	Äthansäure
Fixiersalz	$Na_2S_2O_3$	Natriumthiosulfat
Flußsäure	HF	Fluorwasserstoffsäure
Gips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Kalziumsulfatdihydrat
Glaubersalz	$NaSO_4 \cdot 10H_2O$	Natriumsulfatdekahydrat
Glyzerin	$C_3H_8O_3$	Propantriol
Grubengas, Sumpfgas	CH_4	Methan
Grünspan	$x\,Cu(CH_3CO_2)_2 \cdot y\,Cu(OH)_2$ $C_2H_4O_2$	Gemisch basischer Kupferazetate
Holzessig	CH_4O	Äthansäure
Holzgeist		Methanol
Kalk, gebrannter	CaO	Kalziumoxid
–, gelöschter	$Ca(OH)_2$	Kalziumhydroxid
Kalkstein s. Kreide		
Karbid	CaC_2	Kalziumkarbid
Karborundum	SiC	Siliziumkarbid
Kochsalz, Steinsalz	NaCl	Natriumchlorid
Königswasser		Gemisch aus 3 Teilen konz. HCl und 1 Teil konz. HNO_3
Kohlenoxid	CO	Kohlenmonoxid
Kohlenstofftetrachlorid	CCl_4	Tetrachlormethan
Korund, Schmirgel	Al_2O_3	Aluminiumoxid
Kreide, Kalkstein	$CaCO_3$	Kalziumkarbonat
Kupfersulfat	$CuSO_4$	Kupfer(II)-sulfat
Kupfervitriol	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Kupfer(II)-sulfatpentahydrat
Lötsalz (in Lösung), Lötwasser	$ZnCl_2 \cdot 2NH_4Cl$	Lösung von Zinkchlorid und Ammoniumchlorid
Lachgas	N_2O	Distickstoffoxid
Magnesia	MgO	Magnesiumoxid
Mennige	Pb_3O_4	Blei(III, IV)-oxid
Nitroglyzerin	$C_3H_5O_9N_3$	Propantrioltrinitrat
Oleum		Lösung von Schwefeltrioxid in konz. H_2SO_4
Oxalsäure	$C_2H_2O_4$	Äthandisäure
Pottasche	K_2CO_3	Kaliumkarbonat
Salmiak	NH_4Cl	Ammoniumchlorid
Salmiakgeist	NH_4OH	Ammoniumhydroxid
Salzsäure	HCl	Chlorwasserstoffsäure
Schmirgel s. Korund		
Soda	$NaCO_3 \cdot 10H_2O$	Natriumkarbonatdekahydrat
Spiritus	C_2H_6O	Äthanol
Tetra	CCl_4	Kohlenstofftetrachlorid
Toluol	C_7H_8	Methylbenzol
Tonerde	A_2O_3	Aluminiumoxid
Tri	C_2HCl_3	Trichloräthen
Wasser	H_2O	Wasserstoffoxid
Wasserglas		Lösung von Natrium- und Kaliumsilikaten
Weingeist	C_2H_6O	Äthanol

1.2.3. Elektrochemische Äquivalente

Für die Elektrolyse gilt das *1.* FARADAY*sche Gesetz:*

Die abgeschiedene Stoffmenge ist der Stromstärke I und der Zeit t proportional. Der diese Proportion in eine Gleichung verwandelnde Proportionalitätsfaktor heißt *elektrochemisches Äquivalent*, Formelzeichen c (Tabelle 1.23).

Definiert man als Äquivalentmasse den Quotienten aus relativer Atommasse und Wertigkeit, so läßt sich das *2.* FARADAY*sche Gesetz* formulieren:

Die von einer bestimmten Elektrizitätsmenge abgeschiedenen Mengen verschiedener Stoffe verhalten sich wie deren Äquivalentmassen. Um ein Grammäquivalent auszuscheiden, benötigt man für alle Stoffe die gleiche Elektrizitätsmenge, und zwar 96490 A · s. Es ist

$$m = cIt$$

m abgeschiedene Stoffmenge, c elektrochemisches Äquivalent, I Stromstärke, t Zeit.

Beispiel: Die Silbermenge, die vom elektrischen Strom der Stärke 30 A in 2 h abgeschieden wird, beträgt

$$m = 1{,}118\ \text{mg/(A} \cdot \text{s)} \cdot 30\ \text{A} \cdot 2\ \text{h} = 241{,}5\ \text{g}.$$

Tabelle 1.23: Elektrochemische Äquivalente c

Stoff	Wertigkeit	c mg/As
Kationen		
Aluminium	III	0,093
Barium	II	0,712
Blei	II	1,074
Chrom	III	0,180
Eisen	II	0,289
Eisen	III	0,193
Gold	III	0,681
Kalium	I	0,405
Kalzium	II	0,208
Kupfer	II	0,329
Magnesium	II	0,126
Mangan	II	0,285
Mangan	III	0,190
Natrium	I	0,233
Nickel	II	0,304
Nickel	III	0,203
Platin	IV	0,505
Quecksilber	I	2,079
Silber	I	1,118
Wasserstoff	I	0,010
Wismut	III	0,722
Zink	II	0,339
Zinn	II	0,615
Zinn	IV	0,308
Anionen		
Brom	I	0,828
Chlor	I	0,367
Fluor	I	0,197
Sauerstoff	II	0,083

1.2.4. Physikalische Konstanten

BOLTZMANNsche Konstante	k	$= 1{,}3807 \cdot 10^{-23}$ J/K
Elektrisches Elementarquantum	e	$= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
Elektron, Ruhmasse	m_e	$= 9{,}1095 \cdot 10^{-31}$ kg
Elektron, spezifische Ladung	e/m_e	$= 1{,}759 \cdot 10^{11}$ C/kg
Energieäquivalent der Masse	1 g	$\triangleq 5{,}61 \cdot 10^{26}$ MeV
Normfallbeschleunigung (bei 45° geographischer Breite und NN)	g_n	$= 9{,}80665$ m/s^2
Gaskonstante, allgemeine	R_0	$= 8314{,}4$ J/(kmol · K)
Gravitationskonstante	γ	$= 6{,}672 \cdot 10^{-11}$ N · m^2 · kg^{-2}
Lichtgeschwindigkeit im masseleeren Raum	c_0	$= 2{,}99792 \cdot 10^8$ m/s
LOSCHMIDT-Konstante	N_L	$= 2{,}687 \cdot 10^{25}$/m^3
Molares Normvolumen idealer Gase	V_m	$= 22{,}414$ m^3/kmol
Neutron, Ruhmasse	m_n	$= 1{,}67495 \cdot 10^{-27}$ kg
Nullpunkt, absoluter	t	$= -273{,}16$ °C $= 0$ K
PLANCKsches Wirkungsquantum	h	$= 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J · s
Proton, Ruhmasse	m_p	$= 1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ kg
Wellenlänge der roten Cd-Linie bei 15 °C und normalem Luftdruck	λ	$= 643{,}8470$ nm

1.3. Aus der Physik

1.3.1. Einheiten

1.3.1.1. Internationales Einheitensystem (SI)

Zum Internationalen Einheitensystem (Système International d'Unités, abgekürzt SI) gehören
die sieben *Basiseinheiten* des SI (durch Fettdruck hervorgehoben),
die *ergänzenden SI-Einheiten* Radiant und Steradiant,
die aus ihnen *kohärent* abgeleiteten Einheiten (einfach zusammenhängend, wobei nur der Faktor 1 auftritt), z. B. Newton, Pascal, Joule.

Einheiten, die unter Verwendung der Vorsätze (Tabelle 1.24) gebildet sind, bei denen als Zahlenfaktor also lediglich Zehnerpotenzen auftreten, werden *Vielfache* und *Teile von SI-Einheiten* genannt. Unter *nichtkohärenten* Einheiten versteht man solche, die sich aus den Basiseinheiten des SI nur unter Verwendung eines von 1 oder einer Zehnerpotenz verschiedenen Umrechnungsfaktors ableiten lassen, z. B. Kilopond, Kalorie, Torr. Nur ganz wenige nichtkohärente Einheiten sind nach Einführung des SI noch in Gebrauch, z. B. Grad, Minute, Sekunde für den ebenen Winkel, Grad Celsius für die Celsiustemperatur, Minute, Stunde, Tag für die Zeit. In Tabelle 1.25 sind die wichtigsten Einheiten physikalischer Größen zusammengefaßt, und in Tabelle 1.26 sind die standardisierten Formelzeichen angegeben.

Tabelle 1.24: Vorsätze

Vorsatz	Kurzzeichen	Faktor	Beispiel
Exa	E	10^{18}	1 Emol = 10^{18} mol
Peta	P	10^{15}	1 PHz = 10^{15} Hz
Tera	T	10^{12}	1 TV = 10^{12} V
Giga	G	10^{9}	1 GW = 10^{9} W
Mega	M	10^{6}	1 MN = 10^{6} N
Kilo	k	10^{3}	1 kHz = 10^{3} Hz
Hekto	h	10^{2}	1 hl = 100 l
Deka	da	10^{1}	1 dag = 10 g
Dezi	d	10^{-1}	1 dt = 0,1 t
Zenti	c	10^{-2}	1 cm = 0,01 m
Milli	m	10^{-3}	1 mA = 10^{-3} A
Mikro	µ	10^{-6}	1 µbar = 10^{-6} bar
Nano	n	10^{-9}	1 nm = 10^{-9} m
Piko	p	10^{-12}	1 pF = 10^{-12} F
Femto	f	10^{-15}	1 fm = 10^{-15} m
Atto	a	10^{-18}	1 ag = 10^{-18} g

Tabelle 1.25: Einheiten physikalischer Größen

Größe	Name der Einheit	Einheitenzeichen	Definition Definitionsgleichung	Bemerkungen
Raum und Zeit				
Länge	**Meter**	**m**	Das Meter ist gleich 1650763,73 Vakuum-Wellenlängen der Strahlung, die dem Übergang zwischen den Niveaus $2p_{10}$ und $5d_5$ des Atoms Krypton $\beta 6$ entspricht.	**Basiseinheit**
	Seemeile[1])	sm	1 sm = 1852 m	beschränkt auf Seefahrt
	Astronomische Einheit	AE	1 AE = $1{,}49600 \cdot 10^{11}$ m	beschränkt auf Astronomie
	Parsec	pc	1 pc = $3{,}0857 \cdot 10^{16}$ m	
	Lichtjahr	ly	1 ly = $0{,}94605 \cdot 10^{16}$ m	
Fläche	Quadratmeter	m^2	$1\ m^2 = 1\ m \cdot 1\ m$	desgl. cm^2, mm^2, km^2 u. a.
	Hektar	ha	$1\ ha = 10^4\ m^2$	beschränkt auf Flur- und Grundstücke
Volumen	Kubikmeter	m^3	$1\ m^3 = 1\ m \cdot 1\ m \cdot 1\ m$	desgl. cm^3, mm^3, km^3 u. a.
	Liter	l	$1\ l = 1\ dm^3 = 1 \cdot 10^{-3}\ m^3$	nicht für Angaben mit einer relativen Unsicherheit $< 5 \cdot 10^{-5}$
Ebener Winkel	Radiant	rad	1 rad = 1 m/1 m	Der Radiant ist der Winkel zwischen zwei Kreisradien, die aus dem Kreisumfang einen Bogen ausschneiden, dessen Länge gleich dem Radius ist.
	Grad		$1° = 1{,}745329 \cdot 10^{-2}$ rad	Der Grad (°) ist der 360ste Teil des Vollwinkels; $1° = \frac{\pi}{180}$ rad.
	Minute		1′ = 1°/60	
	Sekunde		1″ = 1′/60 = 1°/3600	
	Gon	gon	$1\ gon = 1{,}570796 \cdot 10^{-2}$ rad	Das Gon ist der 400ste Teil des Vollwinkels; Geodäsie
Raumwinkel	Steradiant	sr	$1\ sr = 1\ m^2/1\ m^2$	Der Steradiant ist der Raumwinkel, dessen Scheitelpunkt im Mittelpunkt einer Kugel liegt und der aus der Oberfläche dieser Kugel eine Fläche ausschneidet, die gleich der eines Quadrates ist, dessen Seite mit dem Kugelradius übereinstimmt.
Zeit	**Sekunde**	**s**	Die Sekunde ist die Dauer von 9192631770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands des Atoms Zäsium 133 entspricht.	**Basiseinheit**
	Minute	min	1 min = 60 s	
	Stunde	h	1 h = 60 min = 3600 s	
	Tag	d	1 d = 24 h = 86400 s	

[1]) vorläufig noch gültig

Tabelle 1.25 (Fortsetzung)

Größe	Name der Einheit	Einheiten-zeichen	Definition Definitionsgleichung	Bemerkungen
Frequenz	Hertz	Hz	$1\ \mathrm{Hz} = 1\ \mathrm{s^{-1}}$	bei Umlauffrequenzen auch U/s, U/min, U/h (besser: Umdr. f. U)
Geschwindigkeit	Meter je Sekunde Knoten[1])	m/s kn	$1\ \mathrm{m/s} = 1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ 1 kn = 1 sm/h = 1852 m/3600 s = 0,5144 m/s	desgl. cm/s, cm/min u. a. beschränkt auf Seefahrt
Winkelgeschwindigkeit	Radiant je Sekunde	rad/s	$1\ \mathrm{rad/s} = 1\ \mathrm{s^{-1}}$	
Beschleunigung	Meter je Quadratsekunde	$\mathrm{m/s^2}$	$1\ \mathrm{m/s^2} = 1\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$	desgl. $\mathrm{cm/s^2}$, $\mathrm{mm/s^2}$ u. a.
Winkelbeschleunigung	Radiant je Quadratsekunde	$\mathrm{rad/s^2}$	$1\ \mathrm{rad/s^2} = 1\ \mathrm{s^{-2}}$	
Volumenstrom	Kubikmeter je Sekunde	$\mathrm{m^3/s}$	$1\ \mathrm{m^3/s} = 1\ \mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}$	Volumendurchfluß
Mechanik				
Masse	**Kilogramm**	**kg**	Das Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps.	**Basiseinheit**
	Gramm	g	$1\ \mathrm{g} = 1 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg}$	
	Tonne	t	$1\ \mathrm{t} = 1 \cdot 10^{3}\ \mathrm{kg}$	1 dt = 100 kg
	Karat[1])	k	$1\ \mathrm{k} = 2 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{kg}$	Edelsteine, Perlen, Edelmetalle
	Atomare Masseeinheit	u	$1\ \mathrm{u} = 1{,}66057 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$	Atom- und Kernphysik
Dichte	Kilogramm je Kubikmeter	$\mathrm{kg/m^3}$	$1\ \mathrm{kg/m^3} = 1\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$	auch $\mathrm{g/m^3}$ $\mathrm{t/m^3}$ u. a.
Impuls	Kilogrammeter je Sekunde	$\mathrm{kg \cdot m/s}$	$1\ \mathrm{kg \cdot m/s} = 1\ \mathrm{m \cdot kg \cdot s^{-1}}$	
Massenträgheitsmoment	Kilogramm mal Quadratmeter	$\mathrm{kg \cdot m^2}$	$1\ \mathrm{kg \cdot m^2} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg}$	
Kraft	Newton	N	$1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{m \cdot kg \cdot s^{-2}}$	1 N ist die Kraft, die der Masse 1 kg in Kraftrichtung die Beschleunigung 1 $\mathrm{m/s^2}$ erteilt.
Kraftmoment	Newtonmeter	$\mathrm{N \cdot m}$	$1\ \mathrm{N \cdot m} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}}$	
Kraftimpuls	Newtonsekunde	$\mathrm{N \cdot s}$	$1\ \mathrm{N \cdot s} = 1\ \mathrm{m \cdot kg \cdot s^{-1}}$	
Druck	Pascal	$\mathrm{Pa = N/m^2}$	$1\ \mathrm{Pa} = 1\ \mathrm{N/m^2} = 1\ \mathrm{m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}}$	
Spannung, Elastizitätsmodul, Schubmodul	Pascal	Pa	$1\ \mathrm{Pa} = 1\ \mathrm{N/m^2} = 1\ \mathrm{m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}}$ $1\ \mathrm{N/mm^2} = 1\ \mathrm{MPa}$ $1\ \mathrm{N/cm^2} = 10\ \mathrm{kPa}$	
Dynamische Viskosität	Pascalsekunde	$\mathrm{Pa \cdot s}$	$1\ \mathrm{Pa \cdot s} = 1\ \mathrm{N \cdot s/m^2} = 1\ \mathrm{m^{-1}\ kg \cdot s^{-1}}$	
Kinematische Viskosität	Quadratmeter je Sekunde	$\mathrm{m^2/s}$	$1\ \mathrm{m^2/s} = \frac{1\ \mathrm{Pa \cdot s}}{1\ \mathrm{kg/m^3}}$ $= 1\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$	
Arbeit, Energie	Joule	J	$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N \cdot m}$ $= 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}}$	für Joule auch Newtonmeter oder Wattsekunde; $1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N \cdot m} = 1\ \mathrm{W \cdot s}$
	Elektronenvolt	eV	$1\ \mathrm{eV} = 1{,}60219 \cdot 19^{-19}\ \mathrm{J}$	beschränkt auf Atom- und Kernphysik
Leistung	Watt	W	$1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{J/s}$ $= 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}}$	
Elektrizität und Magnetismus				
Elektrische Stromstärke	**Ampere**	**A**	Das Ampere ist die Stärke des zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die den Abstand 1 m haben und zwischen denen die durch den Strom elektrodynamisch hervorgerufene Kraft im leeren Raum je 1 m Länge der Doppelleitung $2 \cdot 10^{-7}$ N beträgt.	**Basiseinheit**; auch Einheit der magnetischen Spannung
Elektrizitätsmenge (Elektrische Ladung)	Coulomb	C	$1\ \mathrm{C} = 1\ \mathrm{s \cdot A}$	Die Einheit der Elektrizitätsmenge wird auch Amperesekunde (A · s) genannt.
Elektrische Verschiebung (Verschiebungsdichte)	Coulomb je Quadratmeter	$\mathrm{C/m^2}$	$1\ \mathrm{C/m^2} = 1\ \mathrm{m^{-2} \cdot s \cdot A}$	
Elektrischer Verschiebungsfluß	Coulomb	C	$1\ \mathrm{C} = 1\ (\mathrm{C/m^2}) \cdot \mathrm{m^2}$ $= 1\ \mathrm{s \cdot A}$	

[1]) vorläufig noch gültig

Tabelle 1.25 (Fortsetzung)

Größe	Name der Einheit	Einheitenzeichen	Definition Definitionsgleichung	Bemerkungen
Elektrische Leistung	Watt	W	$1\ W = 1\ J/s = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	Die Einheit der elektrischen Leistung wird zur Angabe von Scheinleistungen auch Voltampere (VA), zur Angabe von Blindleistungen auch Var (var) genannt.
Elektrische Spannung	Volt	V	$1\ V = 1\ W/A = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	
Elektrische Feldstärke	Volt je Meter	V/m	$1\ V/m = 1\ m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	
Elektrische Kapazität	Farad	F	$1\ F = 1\ C/V = 1\ A \cdot s/V = 1\ m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
Elektrisches Dipolmoment	Coulombmeter	C · m	$1\ C \cdot m = 1\ m \cdot s \cdot A$	Das Coulombmeter ist das Moment eines elektrischen Dipols, dessen Ladungen vom absoluten Betrag 1 C den Abstand 1 m haben.
Elektrische Polarisation	Coulomb je Quadratmeter	C/m^2	$1\ C/m^2 = 1\ m^{-2} \cdot s \cdot A$	Das Coulomb je Quadratmeter ist die elektrische Polarisation, durch die in dem Volumen 1 m^3 das elektrische Dipolmoment 1 C · m hervorgerufen wird.
Elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	$1\ \Omega = 1\ V/A = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	Das Ohm ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, durch den bei der Spannung 1 V zwischen den beiden Punkten ein zeitlich unveränderlicher Strom der Stärke 1 A fließt.
Spezifischer elektrischer Widerstand	Ohmmeter	Ω · m	$1\ \Omega \cdot m = 1\ m^3 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	
Elektrischer Leitwert	Siemens	S	$1\ S = 1/\Omega = 1\ m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	wird auch Eins je Ohm (1/Ω) genannt
Elektrische Leitfähigkeit	Siemens je Meter	S/m	$1\ S/m = 1\ m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	wird auch Eins je Ohmmeter, 1/(Ω · m), genannt
Magnetischer Fluß	Weber	Wb	$1\ Wb = 1\ V \cdot s = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	wird auch Voltsekunde (V · s) genannt
Magnetische Induktion (Magnetische Flußdichte)	Tesla	T	$1\ T = 1\ Wb/m^2 = 1\ kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	wird auch Weber je Quadratmeter (Wb/m^2) genannt
Magnetische Feldstärke	Ampere je Meter	A/m	$1\ A/m = 1\ m^{-1} \cdot A$	
Magnetische Spannung	Ampere	A	$1\ A = 1\ (A/m) \cdot m$	Das Ampere ist die magnetische Spannung zwischen zwei Punkten im Abstand 1 m in Richtung des Vektors eines magnetischen Feldes mit der Feldstärke 1 A/m.
Induktivität	Henry	H	$1\ H = 1\ Wb/A = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	
Magnetische Polstärke nach COULOMB	Weber	Wb	$1\ Wb = 1\ N \cdot m/A = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	Das Weber ist die COULOMBsche magnetische Polstärke eines Pols, auf den in einem magnetischen Feld mit der Feldstärke 1 A/m die Kraft 1 N ausgeübt wird.
Magnetisches Moment nach COULOMB	Webermeter	Wb · m	$1\ Wb \cdot m = 1\ m^3 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	
Magnetische Polarisation	Tesla	T	$1\ T = 1\ Wb/m^2 = 1\ kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	wird auch Weber je Quadratmeter (Wb/m^2) genannt
Magnetischer Leitwert	Henry	H	$1\ H = 1\ Wb/A = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	wird auch Weber je Ampere (Wb/A) genannt
Wärmelehre				
Temperatur (thermodynamische)	**Kelvin**	**K**	Das Kelvin ist der 273,16te Teil der (thermodynamischen) Temperatur des Tripelpunktes von Wasser	**Basiseinheit**
CELSIUS-*Temperatur*	Grad Celsius	°C	Die Celsius-Temperatur t ist die Differenz einer Temperatur T (in K) und der Temperatur $T_0 = 273{,}15$ K; $t = T - T_0$	Temperaturdifferenzen in Kelvin (K)
Wärmemenge	Joule	J	$1\ J = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	$1\ J = 1\ N \cdot m = 1\ W \cdot s$

Tabelle 1.25 (Fortsetzung)

Größe	Name der Einheit	Einheitenzeichen	Definition Definitionsgleichung	Bemerkungen
Spezifische Wärmemenge	Joule je Kilogramm	J/kg	$1\ \mathrm{J/kg} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}$	z. B. bei Phasenumwandlung
Wärmekapazität	Joule je Kelvin	J/K	$1\ \mathrm{J/K} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$	
Spezifische Wärmekapazität	Joule je Kilogramm mal Kelvin	J/(kg · K)	$1\ \mathrm{J/(kg \cdot K)} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$	
Entropie	Joule je Kelvin	J/K	$1\ \mathrm{J/K} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$	
Spezifische Entropie	Joule je Kilogramm mal Kelvin	J/(kg · K)	$1\ \mathrm{J/(kg \cdot K)} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$	
Wärmestrom	Watt	W	$1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{J/s} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}}$	
Wärmestromdichte	Watt je Quadratmeter	W/m²	$1\ \mathrm{W/m^2} = 1\ \mathrm{kg \cdot s^{-3}}$	
Wärmeübergangskoeffizient	Watt je Quadratmeter mal Kelvin	W/(m² · K)	$1\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)} = 1\ \mathrm{kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}}$	1 W/(m² · K) ist der Wärmeübergangs- oder der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen zwei geeignet gewählten isothermen Flächen, zwischen denen beim Fließen eines Wärmestroms der Dichte 1 W/m² die Temperaturdifferenz 1 K herrscht.
Wärmedurchgangskoeffizient	Watt je Quadratmeter mal Kelvin	W/(m² · K)	$1\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)} = 1\ \mathrm{kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}}$	
Wärmeleitfähigkeit	Watt je Meter mal Kelvin	W/(m · K)	$1\ \mathrm{W/(m \cdot K)} = 1\ \mathrm{m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}}$	1 W/(m · K) ist die Wärmeleitfähigkeit eines homogenen Stoffes, in dem sich beim Fließen eines Wärmestroms der Dichte 1 W/m² die Temperatur in Richtung des Wärmestroms auf 1 m um 1 K ändert.
Temperaturleitfähigkeit	Quadratmeter je Sekunde	m²/s	$1\ \mathrm{m^2/s} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$	1 m²/s ist die Temperaturleitfähigkeit eines Stoffes mit der Wärmeleitfähigkeit 1 W/(m · K), der spezifischen Wärmekapazität 1 J/(kg · K) (bei konstantem Druck) und der Dichte 1 kg/m³.
	Quadratmeter je Stunde	m²/h	$1\ \mathrm{m^2/h} = 2{,}7778 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$	
Physikalische Chemie				
Stoffmenge	**Mol**	**mol**	Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das so viele Elementarteilchen enthält, wie Atome in 12 g des Kohlenstoffs 12 enthalten sind.	**Basiseinheit**
Molare Masse	Kilogramm je Mol	kg/mol	$1\ \mathrm{kg/mol} = 1\ \mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$	
Molares Volumen	Kubikmeter je Mol	m³/mol	$1\ \mathrm{m^3/mol} = 1\ \mathrm{m^3 \cdot mol^{-1}}$	
Molare innere Energie	Joule je Mol	J/mol	$1\ \mathrm{J/mol} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}}$	
Molare Wärmekapazität (Molwärme)	Joule je Mol mal Kelvin	J/(mol · K)	$1\ \mathrm{J/(mol \cdot K)} = 1\ \mathrm{m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$	
Stoffmengenkonzentration, Molarität	Mol je Kubikmeter	mol/m³	$1\ \mathrm{mol/m^3} = 1\ \mathrm{m^{-3} \cdot mol}$	
Optische Strahlung				
Lichtstärke	**Candela**	**cd**	Die Candela ist die Lichtstärke, die $\frac{1}{600000}$ m² der Fläche eines schwarzen Körpers bei der Erstarrungstemperatur des Platins beim Druck 101 325 Pa senkrecht zu seiner Oberfläche ausstrahlt.	**Basiseinheit**
Leuchtdichte	Candela je Quadratmeter	cd/m²	$1\ \mathrm{cd/m^2} = 1\ \mathrm{m^{-2} \cdot cd}$	
Lichtstrom	Lumen	lm	$1\ \mathrm{lm} = 1\ \mathrm{cd \cdot sr}$	Das Lumen ist der Lichtstrom, den eine punktartige Lichtquelle der Lichtstärke 1 cd gleichmäßig in den Raumwinkel 1 sr aussendet.
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	$1\ \mathrm{lx} = 1\ \mathrm{lm/m^2} = 1\ \mathrm{m^{-2} \cdot cd \cdot sr}$	
Lichtmenge	Lumensekunde	lm · s	$1\ \mathrm{lm \cdot s} = 1\ \mathrm{s \cdot cd \cdot sr}$	Die Lumensekunde ist die ausgesandte oder aufgefangene Lichtmenge des 1 s dauernden Lichtstroms 1 lm.

Tabelle 1.25 (Fortsetzung)

Größe	Name der Einheit	Einheiten-zeichen	Definition Definitionsgleichung	Bemerkungen
Strahlungsenergie	Joule	J	$1\ J = 1\ W \cdot s = 1\ N \cdot m = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
Strahlungsfluß	Watt	W	$1\ W = 1\ J/s = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
Strahlstärke	Watt je Steradiant	W/sr	$1\ W/sr = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot sr^{-1}$	Das Watt je Steradiant ist die Strahlstärke, die im Raumwinkel 1 sr den Strahlungsfluß 1 W erzeugt.
Strahldichte	Watt je Quadratmeter mal Steradiant	$W/(m^2 \cdot sr)$	$1\ W/(m^2 \cdot sr) = 1\ kg \cdot s^{-3} \cdot sr^{-1}$	
Strahlungsflußdichte	Watt je Quadratmeter	W/m^2	$1\ W/m^2 = 1\ kg \cdot s^{-3}$	
Akustik				
Schallschnelle	Meter je Sekunde	m/s	$1\ m/s = 1\ m \cdot s^{-1}$	
Schalldruck	Pascal = Newton je Quadratmeter	Pa = N/m^2	$1\ Pa = 1\ N/m^2 = 1\ m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
Schallenergie	Joule	J	$1\ J = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
Schalleistung	Watt	W	$1\ W = 1\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
Schallintensität	Watt je Quadratmeter	W/m^2	$1\ W/m^2 = 1\ kg \cdot s^{-3}$	
Ionisierende Strahlung				
Teilchenfluenz	Eins je Quadratmeter	$1/m^2$	$1/m^2 = 1\ m^{-2}$	Unter ionisierender Strahlung ist sowohl direkt (z.B. Elektronen, Protonen, Deuteronen, α-Teilchen) als auch indirekt (z.B. Neutronen, Photonen) ionisierende Strahlung zu verstehen.
Teilchenflußdichte	Eins je Quadratmeter mal Sekunde	$1/(m^2 \cdot s)$	$1/(m^2 \cdot s) = 1\ m^{-2} \cdot s^{-1}$	
Energiefluenz	Joule je Quadratmeter	J/m^2	$1\ J/m^2 = 1\ kg \cdot s^{-2}$	
Energieflußdichte	Watt je Quadratmeter	W/m^2	$1\ W/m^2 = 1\ kg \cdot s^{-3}$	
Energiedosis	Gray	Gy	$1\ Gy = 1\ J/kg = 1\ m^2 \cdot s^{-2}$	Das Gray ist die Energiedosis, bei der durch die ionisierende Strahlung einer homogen verteilten Materie der Masse 1 kg die Energie 1 J gleichmäßig zugeführt wird.
Energiedosisleistung	Gray je Sekunde	Gy/s	$1\ Gy/s = 1\ m^2 \cdot s^{-3}$	
Aktivität	Becquerel	Bq	$1\ Bq = 1\ s^{-1}$	Das Becquerel ist die Aktivität einer radioaktiven Strahlungsquelle, bei der sich in 1 s im Mittel 1 Atomkern eines radioaktiven Nuklids umwandelt. Beziehung zur bisherigen Einheit Curie (Ci): $1\ Ci = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ Bq$.

Tabelle 1.26: Allgemeine Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung
Länge, Fläche, Raum, Winkel	
l, L	Länge
b, B	Breite
r, R	Halbmesser, Radius
d, D	Durchmesser
λ	Wellenlänge
h, H	Höhe
s	Weglänge, Wanddicke
A	Fläche (Querschnitt, Oberfläche)
α, β, γ	Winkel, ebene Winkel
Ω	Raumwinkel
V	Volumen, Rauminhalt
I	Flächen-Trägheitsmoment
Masse	
m	Masse
ϱ, d	Dichte
J	Massen-Trägheitsmoment
A_r	relative Atommasse (früher Atomgewicht)
M_r	relative Molekularmasse (früher Molekulargewicht)
n	Wertigkeit
Zeit	
t, τ	Zeitpunkt, Zeitdauer
T	Umlaufzeit, Periodendauer
φ	Vor-, Nacheilwinkel, Phasenverschiebung
n	Umlaufzahl, Drehzahl
a	Beschleunigung
f, ν	Frequenz
v, u	Geschwindigkeit
g	Fallbeschleunigung
ω	Winkelgeschwindigkeit
Kraft, Druck	
F	Kraft
M	Moment einer Kraft
p	Druck
σ	Zug-, Druckspannung
τ	Schub-, Scherspannung
E	Elastizitätsmodul
G	Schubmodul
μ	Reibungszahl
η	dynamische Viskosität
Wärmemenge, Arbeit, Energie	
W, Q	Wärmemenge
W, A	Arbeit
W, E	Energie
λ	Wärmeleitfähigkeit
S	Entropie

Tabelle 1.26 (Fortsetzung)

Zeichen	Bedeutung
σ	Oberflächenspannung
c	spezifische Wärmekapazität
c_p	bei konstantem Druck
c_v	bei konstantem Volumen
P	Leistung
η	Wirkungsgrad
R	Gaskonstante
Temperatur	
t	Temperatur, vom Eispunkt aus gerechnet
T	absolute Temperatur
α	Längenausdehnungskoeffizient
γ	Raumausdehnungskoeffizient
Elektrizität, Magnetismus	
Q, q	Elektrizitätsmenge
E	elektrische Feldstärke
U	elektrische Spannung
I	elektrische Stromstärke
R	elektrischer Widerstand
ϱ	spezifischer elektrischer Widerstand
C	elektrische Kapazität
H	magnetische Feldstärke
z	Leiterzahl
N, w	Windungszahl
B	magnetische Induktion
μ_r	Permeabilitätszahl
L	Induktivität
Licht	
c	Lichtgeschwindigkeit
E_v, E	Beleuchtungsstärke
Φ_v, Φ	Lichtstrom
I_v, I	Lichtstärke

1.3.1.2. Beziehungen und Umrechnungen

Der Faktor für die Beziehung zwischen SI-Einheiten und bisheriger Einheit ist angegeben in Tabelle 1.27 für Einheiten der Arbeit und Energie, in Tabelle 1.28 für Einheiten der Leistung und in Tabelle 1.29 für Einheiten des Druckes. Zur Umrechnung von bisherigen Einheiten in SI-Einheiten dienen die Tabellen 1.30 bis 1.35. Tabelle 1.36 stellt Angaben in Zoll und Millimeter einander gegenüber.

Tabelle 1.27: Beziehungen zwischen den Einheiten von Arbeit und Energie

Arbeit bzw. Energie	J (W·s, N·m)	kW · h	kcal	kp · m	PS · h	MeV
1 J (W·s, N·m)	1	$2{,}778 \cdot 10^{-7}$	$2{,}388 \cdot 10^{-4}$	$1{,}0197 \cdot 10^{-1}$	$3{,}78 \cdot 10^{-7}$	$6{,}242 \cdot 10^{12}$
1 kW · h	$3{,}6 \cdot 10^{6}$	1	$8{,}598 \cdot 10^{2}$	$3{,}671 \cdot 10^{5}$	1,359	$2{,}247 \cdot 10^{19}$
1 kcal	$4{,}1868 \cdot 10^{3}$	$1{,}163 \cdot 10^{-3}$	1	$4{,}269 \cdot 10^{2}$	$1{,}581 \cdot 10^{-3}$	$2{,}613 \cdot 10^{16}$
1 kp·m	9,80665	$2{,}724 \cdot 10^{-6}$	$2{,}342 \cdot 10^{-3}$	1	$3{,}704 \cdot 10^{-6}$	$6{,}121 \cdot 10^{13}$
1 PS·h	$2{,}648 \cdot 10^{6}$	$7{,}355 \cdot 10^{-1}$	$6{,}325 \cdot 10^{2}$	$2{,}7 \cdot 10^{5}$	1	$1{,}653 \cdot 10^{19}$
1 MeV	$1{,}602 \cdot 10^{-13}$	$4{,}45 \cdot 10^{-20}$	$3{,}826 \cdot 10^{-17}$	$1{,}634 \cdot 10^{-14}$	$6{,}049 \cdot 10^{-20}$	1

Tabelle 1.28: Beziehungen zwischen den Einheiten der Leistung

Leistung	kW	kcal/s	kp · m/s	PS
1 kW	1	$2{,}388 \cdot 10^{-1}$	$1{,}0197 \cdot 10^{2}$	1,359
1 kcal/s	4,1868	1	$4{,}269 \cdot 10^{2}$	5,692
1 kp · m/s	$9{,}80665 \cdot 10^{-3}$	$2{,}342 \cdot 10^{-3}$	1	$1{,}333 \cdot 10^{-2}$
1 PS	$7{,}355 \cdot 10^{-1}$	$1{,}757 \cdot 10^{-1}$	75	1

Tabelle 1.29: Beziehungen zwischen den Einheiten des Druckes

Druck	Pa = N/m²	bar (10^3 mbar)	at (kp/cm²)	atm	Torr
1 Pa = 1 N/m²	1	10^{-5}	$1{,}0197 \cdot 10^{-5}$	$9{,}869 \cdot 10^{-6}$	$7{,}5 \cdot 10^{-3}$
1 bar (10^3 mbar)	10^{5}	1	1,0197	$9{,}8692 \cdot 10^{-1}$	$7{,}5 \cdot 10^{2}$
1 at (kp/cm²)	$9{,}80665 \cdot 10^{4}$	$9{,}80665 \cdot 10^{-1}$	1	$9{,}6784 \cdot 10^{-1}$	$7{,}3556 \cdot 10^{2}$
1 atm	$1{,}01325 \cdot 10^{5}$	1,01325	1,0332	1	$7{,}6 \cdot 10^{2}$
1 Torr	$1{,}3332 \cdot 10^{2}$	$1{,}3332 \cdot 10^{-3}$	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	$1{,}316 \cdot 10^{-3}$	1

Tabelle 1.30: Umrechnungsfaktor 9,80665
(z. B. 1 kp ≈ 9,81 N, 1 kp/mm² ≈ 0,00981 kN/mm² ≈ 9,81 MPa, 1 at ≈ 0,0981 MPa)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0000	9,8067	19,613	29,420	39,227	49,033	58,840	68,647	78,453	88,260
1	98,067	107,87	117,68	127,49	137,29	147,10	156,91	166,71	176,52	186,33
2	196,13	205,94	215,75	225,55	235,36	245,17	254,97	264,78	274,59	284,39
3	294,20	304,01	313,81	323,62	333,43	343,23	353,04	362,85	372,65	382,46
4	392,27	402,07	411,88	421,69	431,49	441,30	451,11	460,91	470,72	480,53
5	490,33	500,14	509,95	519,75	529,56	539,37	549,17	558,98	568,79	578,59
6	588,40	598,21	608,01	617,82	627,63	637,43	647,24	657,05	666,85	676,66
7	686,47	696,27	706,08	715,89	725,69	735,50	745,31	755,11	764 92	774,73
8	784,53	794,34	804,15	813,95	823,76	833,57	843,37	853,18	862,99	872,79
9	882,60	892,41	902,21	912,02	921,83	931,63	941,44	951,25	961,05	970,86

Beispiele: F = 28 kp = 274,6 N; E = 6600 kp/mm² = 64,7 kN/mm² ≈ 64723,89 MPa; p = 75 at = 7,36 MPa.

Tabelle 1.31: Umrechnungsfaktor 0,1333224
(z. B. 1 Torr ≈ 0,1333 kPa = 1,333 mbar)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0000	0,1333	0,2666	0,4000	0,5333	0,6666	0,7999	0,9333	1,0666	1,1999
1	1,3332	1,4665	1,5999	1,7332	1,8665	1,9998	2,1332	2,2665	2,3998	2,5331
2	2,6664	2,7998	2,9331	3,0664	3,1997	3,3331	3,4664	3,5997	3,7330	3,8663
3	3,9997	4,1330	4,2663	4,3996	4,5330	4,6663	4,7996	4,9329	5,0663	5,1996
4	5,3329	5,4662	5,5995	5,7329	5,8662	5,9995	6,1328	6,2662	6,3995	6,5328
5	6,6661	6,7994	6,9328	7,0661	7,1994	7,3327	7,4661	7,5994	7,7327	7,8660
6	7,9993	8,1327	8,2660	8,3993	8,5326	8,6660	8,7993	8,9326	9,0659	9,1992
7	9,3326	9,4659	9,5992	9,7325	9,8659	9,9992	10,133	10,266	10,399	10,532
8	10,666	10,799	10,932	11,066	11,199	11,332	11,466	11,599	11,732	11,866
9	11,999	12,132	12,266	12,399	12,532	12,666	12,799	12,932	13,066	13,199

Beispiele: p = 760 Torr = 101,3 kPa = 1013 mbar; p_s = 17,5 Torr = 2,33 kPa.

Tabelle 1.32: Umrechnungsfaktor 0,73549875
(z. B. 1 PS ≈ 0,735 kW)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0000	0,7355	1,4710	2,2065	2,9420	3,6775	4,4130	5,1485	5,8840	6,6195
1	7,3550	8,0905	8,8260	9,5615	10,297	11,032	11,768	12,503	13,239	13,974
2	14,710	15,445	16,181	16,916	17,652	18,387	19,123	19,858	20,594	21,329
3	22,065	22,800	23,536	24,271	25,007	25,742	26,478	27,213	27,949	28,684
4	29,420	30,155	30,891	31,626	32,362	33,097	33,833	34,568	35,304	36,039
5	36,775	37,510	38,246	38,981	39,717	40,452	41,188	41,923	42,659	43,394
6	44,130	44,865	45,601	46,336	47,072	47,807	48,543	49,278	50,014	50,749
7	51,485	52,220	52,956	53,691	54,427	55,162	55,898	56,633	57,369	58,104
8	58,840	59,575	60,311	61,046	61,782	62,517	63,253	63,988	64,724	65,459
9	66,195	66,930	67,666	68,401	69,137	69,872	70,608	71,343	72,079	72,814

Beispiele: P = 25 PS = 18,4 kW; W = 150 PS · h = 110,3 kW · h.

Tabelle 1.33: Umrechnungsfaktor 4,1868
(z. B. 1 cal ≈ 4,187 W · s, 1 kcal ≈ 4187 W · s)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0000	4,1868	8,3736	12,560	16,747	20,934	25,121	29,308	33,494	37,681
1	41,868	46,055	50,242	54,428	58,615	62,802	66,989	71,176	75,362	79,549
2	83,736	87,923	92,110	96,296	100,48	104,67	108,86	113,04	117,23	121,42
3	125,60	129,79	133,98	138,16	142,35	146,54	150,72	154,91	159,10	163,29
4	167,47	171,66	175,85	180,03	184,22	188,41	192,59	196,78	200,97	205,15
5	209,34	213,53	217,71	221,90	226,09	230,27	234,46	238,65	242,83	247,02
6	251,21	255,39	259,58	263,77	267,96	272,14	276,33	280,52	284,70	288,89
7	293,08	297,26	301,45	305,64	309,82	314,01	318,20	322,38	326,57	330,76
8	334,94	339,13	343,32	347,50	351,69	355,88	360,06	364,25	368,44	372,63
9	376,81	381,00	385,19	389,37	393,56	397,75	401,93	406,12	410,31	414,49

Beispiele: Q = 32,5 kcal = 136,1 kW · s; c = 0,25 kcal/(kg · K) = 1047 W · s/(kg · K).

Tabelle 1.34: Umrechnungsfaktor 1,1630
[z. B. 1 kcal/(m · h · K) ≈ 1,163 W/(m · K), 1 kcal/(m² · h) ≈ 1,163 W/m²]

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0000	1,1630	2,3260	3,4890	4,6520	5,8150	6,9780	8,1410	9,3040	10,467
1	11,630	12,793	13,956	15,119	16,282	17,445	18,608	19,771	20,934	22,097
2	23,260	24,423	25,586	26,749	27,912	29,075	30,238	31,401	32,564	33,727
3	34,890	35,053	37,216	38,379	39,542	40,705	41,868	43,031	44,194	45,357
4	46,520	47,683	48,846	50,009	51,172	52,335	53,498	54,661	55,824	56,987
5	58,150	59,313	60,476	61,639	62,802	63,965	65,128	66,291	67,454	68,617
6	69,780	70,943	72,106	73,269	74,432	75,595	76,758	77,921	79,084	80,247
7	81,410	82,573	83,736	84,899	86,062	87,225	88,388	89,551	90,714	91,877
8	93,040	94,203	95,366	96,529	97,692	98,855	100,02	101,18	102,34	103,51
9	104,67	105,83	107,00	108,16	109,32	110,49	111,65	112,81	113,97	115,14

Beispiele: λ = 0,85 kcal/(m · h · K) = 0,99 W/(m · K); q = 26,4 kcal/(m² · h) = 30,7 W/m².

Tabelle 1.35: Umrechnungsfaktor 0,8598
(z. B. 1 $m^2 \cdot h \cdot K/kcal \approx 0{,}860\ m^2 \cdot K/W$)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0000	0,8598	1,7196	2,5794	3,4392	4,2990	5,1588	6,0186	6,8784	7,7382
1	8,5980	9,4580	10,318	11,177	12,037	12,897	13,757	14,617	15,476	16,336
2	17,196	18,056	18,916	19,775	20,635	21,495	22,355	23,215	24,074	24,934
3	25,794	26,654	27,514	28,373	29,233	30,093	30,953	31,813	32,672	33,532
4	34,392	35,252	36,112	36,971	37,831	38,691	39,551	40,411	41,270	42,130
5	42,990	43,850	44,710	45,569	46,429	47,289	48,149	49,009	49,868	50,728
6	51,588	52,448	53,308	54,167	55,027	55,887	56,747	57,607	58,466	59,326
7	60,186	61,046	61,906	62,765	63,625	64,485	65,345	66,205	67,064	67,924
8	68,784	69,644	70,504	71,363	72,223	73,083	73,943	74,803	75,662	76,522
9	77,382	78,242	79,102	79,961	80,821	81,681	82,541	83,401	84,260	85,120

Beispiele: $R = 0{,}60\ m^2 \cdot h \cdot K/kcal = 0{,}52\ m^2 \cdot K/W$; $R_i = 0{,}15\ m^2 \cdot h \cdot K/kcal = 0{,}13\ m^2 \cdot K/W$.

Tabelle 1.36: Umrechnung von englisch Zoll in Millimeter
(1'' = 25,400 mm)

Zoll Bruch	Dezimalbruch	mm	Zoll Bruch	Dezimalbruch	mm
1/32	0,031250	0,794	17/32	0,531250	13,494
1/16	0,062500	1,588	9/16	0,562500	14,288
3/32	0,093750	2,381	19/32	0,593750	15,081
1/8	0,125000	3,175	5/8	0,625000	15,875
5/32	0,156250	3,969	21/32	0,656250	16,669
3/16	0,187500	4,763	11/16	0,687500	17,463
7/32	0,218750	5,556	23/32	0,718750	18,256
1/4	0,250000	6,350	3/4	0,750000	19,050
9/32	0,281250	7,144	25/32	0,781250	19,844
5/16	0,312500	7,938	13/16	0,812500	20,638
11/32	0,343750	8,731	27/32	0,843750	21,431
3/8	0,375000	9,525	7/8	0,875000	22,225
13/32	0,406250	10,319	29/32	0,906250	23,019
7/16	0,437500	11,113	15/16	0,937500	23,813
15/32	0,468750	11,906	31/32	0,968750	24,606
1/2	0,500000	12,700	1	1,000000	25,400

1.3.2. Aus der Mechanik

1.3.2.1. Einfache Maschinen

Hebelgesetz (Bild 1.35)
Kraft mal Kraftarm = Last mal Lastarm.
$Fa = F_L b$.
F Kraft, a Kraftarm, F_L Last, b Lastarm.

Beispiel (Bild 1.36): An einem Hebebaum wird gemessen
$a = 1400$ mm, $b = 350$ mm.
Gehoben wird mit der Kraft $F = 620$ N.



Bild 1.35. Hebel, a) einarmiger, b) zweiarmiger

Mit welcher Kraft F_L ruht die Platte auf dem Hebebaum?

Lösung: $F_L = \frac{Fa}{b}$;

$$F_L = \frac{620\ \text{N} \cdot 1400\ \text{mm}}{350\ \text{mm}} = 2{,}48\ \text{kN}.$$

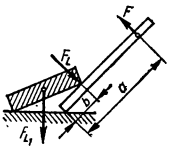


Bild 1.36. Beispiel zum Hebelgesetz

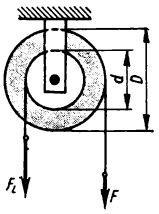


Bild 1.37. Seiltrommel

Seil- und Kettentrommel (Bild 1.37)
$F = \frac{F_L d}{D}$;
d, D Rollendurchmesser.

Lose Rolle (Bild 1.38)
(Wirkungsgrad für jede Rolle $\eta \approx 0{,}95$)
$F = \frac{F_L}{2}$.
Kraft mal Kraftweg = Last mal Lastweg.
$FS = F_L s$.

Faktorenflaschenzug (Bild 1.39)
n Rollenzahl, S Kraftweg, s Lastweg.

Differentialflaschenzug (Bild 1.40)
d, D Durchmesser der oberen Rollen.
$F = F_L \cdot \frac{D - d}{2D}$; $s = S \cdot \frac{D - d}{2D}$.
Wirkungsgrad im Mittel: $\eta \approx 0{,}5$.

Schiefe Ebene (Bild 1.41)
Kraft mal Kraftweg = Last mal Lastweg.
h/l Steigung.
$Fl = F_L h$.
Normalkraft $F_N = \sqrt{F_L^2 - F^2}$

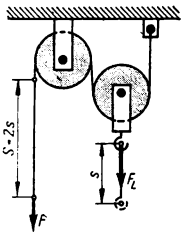


Bild 1.38. Lose Rolle

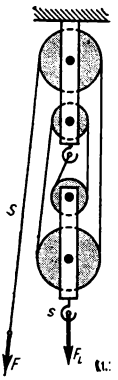


Bild 1.39. Faktoren-flaschenzug

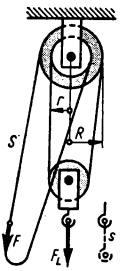


Bild 1.40 Differential-flaschenzug

Beispiel: $F_L = 10{,}5$ kN. Steigung 1 : 21; F = ?

Lösung: $F = \frac{F_L h}{l} = \frac{10{,}5\text{ kN} \cdot 1}{21} = 0{,}5$ kN

(ohne Berücksichtigung der Reibung).

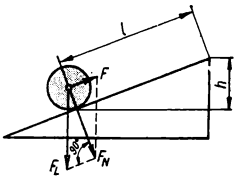


Bild 1.41. Schiefe Ebene

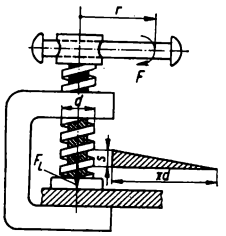


Bild 1.42. Schraube

Schraube (eingängig) (Bild 1.42)

Jeder Schraubengang stellt eine gewundene schiefe Ebene dar. Ganghöhe s ist Lastweg, $\pi d = S$ ist Kraftweg.

Kraft mal Kraftweg = Last mal Lastweg.

$F \cdot \pi d = F_L \cdot s$.

Beispiel: Gegeben $F = 200$ N, $r = 240$ mm, $s = 8$ mm; gesucht F_L.

Lösung: $F_L = \frac{F \cdot S}{s} = \frac{F \cdot \pi d}{s}$;

$F_L = \frac{200\text{ N} \cdot 2 \cdot 240\text{ mm} \cdot \pi}{8\text{ mm}} = 12{,}0\,\pi\text{ kN} \approx 37{,}7$ kN.

Bei Wirkungsgrad $\eta = 0{,}5$ wird $F_L = 37{,}7\text{ kN} \cdot 0{,}5 = 18{,}85$ N.

1.3.2.2. Arbeit und Leistung

Arbeit = Kraft mal Weg.

$W = Fs$.

Leistung = Arbeit durch Zeit.

$P = W/t$.

1. *Beispiel:* Ein Kran hebt in 25 s eine Last von 90 kN 4 m hoch. Welche Leistung entwickelt der Hubmotor (ohne Reibungsverluste)?

Lösung: $W = 90\text{ kN} \cdot 4$ m;

$P = \frac{90\text{ kN} \cdot 4\text{ m}}{25\text{ s}} = 14{,}4$ kW.

Ohne Berücksichtigung der Reibungsverluste leistet der Hubmotor $P = 14{,}4$ kW. Bei einem Wirkungsgrad von $\eta = 75\,\%$ für die Anlage wären $14{,}4\text{ kW} : 0{,}75 = 19{,}2$ kW erforderlich.

2. *Beispiel:* Eine Kolbenpumpe fördert stündlich $Q = 540$ m³ Wasser bei einer Förderhöhe $H = 38$ m.

Wie groß ist die Antriebsleistung P?

Lösung: 1 m³ ≙ 10 kN;

540 m³ ≙ 10 kN · 540 = 5,4 MN.

$P = \frac{5{,}4\text{ MN} \cdot 38\text{ m}}{3600\text{ s}} = 57$ kW.

Mit Rücksicht auf einen mittleren Wirkungsgrad der Pumpenanlagen von $\eta = 85\,\%$ berechnet man die effektive Antriebsleistung zu

$P_{eff} = 57\text{ kW} : 0{,}85 \approx 67$ kW.

1.3.2.3. Reibung

Gleitreibung. Zur Überwindung des Widerstandes, der durch Reibung zweier aufeinander gleitender Körper entsteht, benötigt man die *Reibungskraft.* Sie ist bei Beginn der Bewegung am größten (Gleitreibung aus der Ruhe) und nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit der aufeinander gleitenden Körper ab. Drückt eine Last F_L senkrecht auf eine Unterlage (Bild 1.43a), so ist die Reibungskraft

$F = F_L \mu$.

Hierbei ist μ die *Reibungszahl* der Gleitreibung. Sie ist je nach Oberflächenbeschaffenheit der aufeinander gleitenden Körper verschieden, aber immer kleiner als 1 (vgl. Tabelle 1.37). Die *Reibungsarbeit* längs des Reibungsweges s ist

$W_r = Fs = F_L \mu s$.

Im Gleitlager (Bild 1.43b) ist beim Drehen zu überwinden Reibungsmoment = Reibungskraft mal Hebelarm:

$M_G = F_L \mu r$.

Die durch Reibung verlorene Leistung P_{r1} ist Reibungskraft mal Weg durch Zeit:

$P_{r1} = \frac{F \cdot \pi d \cdot n}{60} = \frac{F_L \mu r n}{30}$;

r in m, F_L in N, n in Umdr./min, P_{r1} in $\frac{\text{Nm}}{\text{s}}$.

Rollreibung

Die Reibungskraft ist

$F = \frac{F_L f}{r}$;

f Reibungszahl (Hebelarm) der Rollreibung (Bild 1.43 c) in cm.

Das Rollreibungsmoment beträgt $M_r = \frac{F_L f r}{r} = F_L f$.

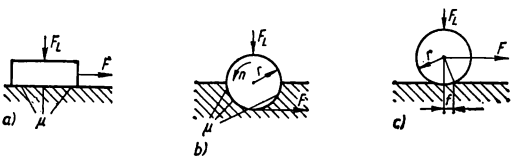


Bild 1.43. Reibung
a) Gleitreibung, b) Reibung in Gleitlager, c) Rollreibung

Beispiel: Der Rollwiderstand eines mit 5 kN belasteten Stahlrades vom Radius $r = 40$ cm auf Stahlschienen ($f = 0{,}05$ cm) ist bei $v \approx 100$ km/h

$F = \frac{F_L f}{d/2} = \frac{5\text{ kN} \cdot 0{,}05\text{ cm}}{40\text{ cm}} = 6{,}25$ N.

Die durch Reibung verlorene Leistung ist $P_{r1} = F \cdot \frac{\pi d n}{60}$

$= \frac{F_L f}{d/2} \cdot \frac{\pi d n}{60} = \frac{F_L f \pi n}{30}\left(\text{in } \frac{\text{N} \cdot \text{cm}}{\text{s}}\right) = \frac{F_L f \pi n}{3000}\left(\text{in } \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}\right)$.

Aus $F = \frac{F_L f}{r}$ ist ersichtlich: Je größer r, desto kleiner F.

Handkarren, Rennwagen z. B. haben große Räder, um den Arbeitsaufwand möglichst niedrig zu halten.

Für Stahl auf Stahl ist Reibungszahl $f = 0{,}01$ cm bei $v = 10$ km/h; 0,02 cm bei 25 km/h; 0,03 cm bei 50 km/h und 0,04 cm bei $v = 75$ km/h.

Der Reibungswiderstand bei Kugel- und Rollenlagern wird der Einfachheit halber mit Hilfe der *ideellen Reibungszahl* μ_1 errechnet.

$F = F_L \mu_1$ (vgl. Tabelle 1.37).

Verlorene Leistung in N · m/s (= W) ist $P_r = \frac{F_L \mu_1 r_r \pi n}{30}$;

r_r (in m) ist Abstand von Mitte Welle bis Mitte Kugel oder Rolle.

Beispiel: Ein Transmissionslager ist durch Riemenzug bei $n = 250$ Umdr./min mit $F_L = 2$ kN belastet. Gesucht ist die

durch Reibung verlorene Leistung a) bei Anwendung von Gleitlagern, b) bei Anwendung von Kugellagern.

a) *Gleitlager* mit $\mu = 0{,}04$, Wellendurchmesser $d = 6$ cm, $r = 0{,}03$ m.

$$P_L = \frac{F_L \mu r \pi n}{30} = \frac{2\text{ kN} \cdot 0{,}04 \cdot 0{,}03\text{ m} \cdot \pi \cdot 250\text{ min}^{-1}}{30}$$

$$= 63\text{ N} \cdot \text{m/s} = 63\text{ W}.$$

b) *Kugellager* mit $\mu_l = 0{,}003$, Kugeldurchmesser $d = 1$ cm, Abstand von Mitte Welle bis Mitte Kugel $r_1 = 4\text{ cm} = 0{,}04$ m

$$P_r = \frac{2\text{ kN} \cdot 0{,}003 \cdot 0{,}04\text{ m} \cdot \pi \cdot 250\text{ min}^{-1}}{30}$$

$$= 6{,}3\text{ N} \cdot \text{m/s} = 6{,}3\text{ W}.$$

Tabelle 1.37: Reibungszahlen

Werkstoff	Zustand	μ
Grauguß auf Grauguß	etwas fettig	≈0,15
Grauguß auf Stahl	etwas fettig	0,16...0,30
Grauguß auf Hartholz	etwas fettig	0,30...0,37
Flußstahl auf Hartholz	etwas fettig	0,4 ...0,5
Stahl auf feinem Sandstein	naß	0,9 ...1,0
Leder auf Grauguß	trocken	0,30...0,36

In Gleit- und Kugellagern ist μ stark abhängig von Belastung und Umfangsgeschwindigkeit der Welle. Für überschlägliche Rechnung kann mit Sicherheit gesetzt werden:

Stahl in Weißmetall oder Bronze	gut geschmiert	0,02...0,06
	schlecht geschmiert	0,08...0,10
Zapfen in Grauguß-lagern	Fettschmierung	0,1
Kugel- und Rollenlager	gut geschmiert	$\mu_l = 0{,}001...0{,}003$
Rollreibung für Stahlräder		$f = 0{,}01...0{,}08$ cm

Der Reibungswiderstand F_r bei *Fahrzeugen* setzt sich zusammen aus dem Gleitwiderstand in der Nabe und dem Rollwiderstand des Rades. Es ist

$$F_r = \frac{M_g + M_r}{R};$$

M_g Gleitreibungsmoment in N · m,
M_r Rollreibungsmoment in N · m,
R Radhalbmesser in m.

F_r gibt die Kraft an, die zur Fortbewegung des Fahrzeugs in der Ebene aufzuwenden ist. Unter Berücksichtigung durchschnittlich auftretender Reibungszahlen und normaler Räder sind für Straßenfahrzeuge mit stählernen Radreifen und Schienenfahrzeuge Gesamtreibungszahlen μ_1 aufgestellt für überschlägliche Berechnung des Gesamtwiderstands F_r (Tabelle 1.38). Es gilt $F_r = F_L \mu_1$ in der Ebene und $F_r = F_L(\mu_1 + s)$ bei Steigungen. Dabei ist s die Steigung in m auf 1 km Weglänge (≙ ‰); z. B. bedeutet $s = 0{,}004$ die Steigung von 4 m auf 1 km Weglänge.

1. Beispiel: Ein 0,2 MN schwerer Güterwagen braucht auf einer Steigung von 3 ‰ eine Zugkraft von

$F_z = 0{,}2\text{ MN } (0{,}0025 + 0{,}003) = 1{,}1\text{ kN}.$

Tabelle 1.38: Gesamtreibung für Straßenfahrzeuge und Eisenbahn

Fahrweg	μ_1
Eisenbahngleise (geringe Geschwindigkeit)	0,0025
gute Asphaltstraße	0,010
gutes Steinpflaster	0,018
schlechtes Steinpflaster (Kopfsteinpflaster)	0,040
gute Schotter-Landstraße	0,030
schlechte, ausgefahrene Schotter-Landstraße (bei Regen)	0,050
trockener, fester und guter Erdweg	0,050
gewöhnlicher Erdweg	0,100
Sandweg (loser Sand)	0,150
Asphalt (Gummibereifung auf)	0,021...0,031

2. Beispiel: Ein 20 kN schweres Fahrzeug braucht auf ebener, guter Schotterstraße eine Zugkraft von

$F_z = 20\text{ kN} \cdot 0{,}03 = 600\text{ N}.$

Bei einer Geschwindigkeit $v = 4$ km/h = 1,1 m/s ist die aufzuwendende Leistung

$P = Fv = 600\text{ N} \cdot 1{,}1\text{ m/s} = 660\text{ N} \cdot \text{m/s} = 660\text{ W}.$

1.3.2.4. Dichte

Die Dichte ϱ ist das Verhältnis der Masse m eines Stoffes zu seinem Volumen V; $\varrho = m/V$. Sie wird gemessen in kg/m³, g/cm³ bzw. kg/dm³ u. a. Im Gegensatz zur Wichte ist die Dichte eines Stoffes unabhängig vom Ort.

Bei porenlosen Stoffen, wie Metallen, spricht man von *Reindichte*, bei porenenthaltenden Stoffen, wie Beton, von *Rohdichte*. Die Reindichte eines Stoffes ist größer als seine Rohdichte.

Bei der Rohdichte unterscheidet man wiederum zwischen Trockenrohdichte und Feuchtrohdichte. Die *Trockenrohdichte* eines Stoffes ermittelt man, wenn man den Probekörper nach Austrocknung bis zur Massekonstanz wägt.

Bei Gasen ist der Wert der Dichte vom Druck abhängig, und Zahlenangaben sind nur eindeutig, wenn der Druck angegeben ist, unter dem sie ermittelt sind (Tabelle 1.39).

Die Massen von geschichteten Materialien (je m³) sind in Tabelle 1.40 zusammengestellt.

Tabelle 1.39: Dichte einiger Stoffe

Stoff	Dichte kg/m³
Feste Stoffe	
Aluminium	2700
Aluminiumbronze	7700
Anthrazit	1400...1700
Antimon	6700
Asbest	2100...2800
Asbestpappe	1200
Asphalt	1100...1400
Baustoffe	≈
Basalt	3000
Beton, Leicht-	400...1400
Beton, Schwer-	1800...2500
Dolomit	2800
Feldstein	2600
Granit	2800
Kalkstein	2600
Sandstein	2600
Schamottestein	1800
Syenit	2800
Tuffstein	2000
Ziegel, Klinker-	1900
Ziegel, Mauer-	1600
Bimsstein	400... 900
Blei	11300
Bleibronze	9500
Brauneisenstein	3400...4000
Braunkohle	1200...1500
Bronze	8500
Chrom	7100
Diamant	3500
Eis	900
Erde	1300...2000
Flußstahl	7800
Germanium	5460
Gips, gebrannt	1800
Glas, Fenster-	2600
Glas, Spiegel-	2500
Glas, Kristall-	2900
Gold	19300
Graphit	2200
Grauguß	7250
Gummi	≈1450
Guttapercha	1020

Stoff	Dichte kg/m³	
Hölzer	luft-trocken	frisch
Ahorn	660	950
Birke	650	960
Buchsbaum	950	1200
Ebenholz	1330	–
Eiche	690	1040
Erle	530	820
Esche	690	800
Fichte	470	740
Hickory	810	–
Kiefer	520	700
Linde	530	740
Nußbaum	680	920
Pappel	450	850
Pockholz	1230	–
Rotbuche	720	1070
Tanne	450	1000
Ulme	680	960
Weide	560	850
Weißbuche	830	1050

Tabelle 1.39 (Fortsetzung)

Stoff	Dichte kg/m³
Kalk, gelöscht	1200
Kalkmörtel	1600
Kalziumkarbid	2270
Kautschuk	940
Kies, naß	2000
Kies, erdfeucht	1800
Kochsalz	2150
Koks	1600...1900
Koks, in Stücken	500
Kork	250... 350
Kreide	1800...2600
Kupfer	8900
Leder	800...1000
Lehm, frisch	2100
Lehm, trocken	1500
Magnesium-Gußlegierung	1800
Marmor	≈2800
Mauerwerk	≈
Bruchstein, frisch	2600
Bruchstein, trocken	2400
Klinker	1900
Mauerziegel	2600
Sandstein, frisch	2600
Sandstein, trocken	1950
Stahlbeton	2400
Messing	≈8500
Neusilber	8700
Nickel	8900
Phosphorbronze	≈8600
Papier	700...1200
Pech	1250...1330
Plaste	
Anilin-Formaldehyd-Harz	1200
Zelluloseazetat	1300
Chlorkautschuk	1400...1700
Phenoplast	1200...1300
Polyäthylen	920...1000
Polyesterharz	1200...1400
Polystyrol	1100
Polyvinylchlorid (PVC)	1380
Vulkanfiber	1200...1400
Platin	21400
Porzellan	2450
Preßkohle	≈1250
Roheisen, weiß	≈7400
Roheisen, grau	7200
Roteisenstein	≈5200
Sand, naß	2000
Sand, erdfeucht	1800
Schamottesteine	2500...2700
Schiefer	2800
Schlacke (Hochofen)	2500...3000
Schmirgel	4000
Schnee, lose, trocken	125
Schnee, lose, naß	< 950
Schwerspat	4250
Selen	4460
Silber	10500
Silizium	2500
Spateisenstein	3800
Stahl	≈7850
Steinkohle, in Stücken	1200...1500
Steinkohle, geschichtet	≈ 900
Ton, trocken	1800
Ton, naß	2100
Torf	600
Weißmetall	≈8900
Wismut	9800
Wolfram	19100
Zement, frisch	3200
Zement, erhärtet	2300
Zementmörtel	2100
Zink	7100
Zinn	7300
Flüssige Stoffe (bei 15 °C)	
Äther	730
Alkohol	790
Benzin	680... 810
Benzol	870
Glyzerin	1260
Leinöl, gekocht	940
Mineralschmieröl	≈ 930
Petroleum	≈ 800
Quecksilber	13550
Wasser	999
Gase (bei 0 °C und normalem Luftdruck)	
Ammoniak	0,8
Azetylen	1,171
Chlor	3,22
Generatorgas	1,14
Gichtgas	1,28
Kohlendioxid	1,977
Kohlenoxid	1,25
Leuchtgas	0,49
Luft	1,29
Propangas	2,003
Sauerstoff	1,429
Stadtgas	0,549
Stickstoff	1,25
Stickstoffmonoxid	1,34
Wasserstoff	0,09

Tabelle 1.40: Berechnungsmengen von geschichtetem Material

Material	kg/m³
Braunkohle	750
Brikett	< 1200
Eis	900
Erde	1700
Formsand	1200
Holz	400...650
Holzkohle	200...400
Kalk, gebrannt	1000
Koks	400...500
Sand, erdfeucht	1800
Steinkohle	900
Stroh, lose	45
Stroh, gepreßt	170
Torf, lufttrocken	325...410
Zement, lose	≈1200
Zement, eingerüttelt	1900

1.3.3. Aus Baustatik und Festigkeitslehre

Die statische Berechnung geht der Festigkeitsuntersuchung voraus und ist unabhängig von den Eigenschaften der Baustoffe.

Die *Statik* behandelt den Zustand der Ruhe, des Gleichgewichts, bei dem sich alle an einem Körper angreifenden Kräfte gegenseitig aufheben. Sie dient der Bestimmung der *Schnittkräfte*, das sind Momente (Biege- und Torsionsmomente), Normalkräfte (Zug- und Druckkräfte als Längskräfte) und Querkräfte. Dabei werden die Auswirkungen von Formänderungen auf das statische System, z. B. eines Bauwerkes, untersucht.

Die *Festigkeitslehre* untersucht die Wirkung der Kräfte auf die Körper, beschreibt Verschiebungs- und Spannungszustände und ermittelt die Abmessungen in Abhängigkeit der mechanisch-technologischen Eigenschaften des Körpers. Es werden Beanspruchungs- bzw. Spannungsarten unterschieden, je nachdem, in welcher Richtung die äußeren Kräfte auf die Körperachse wirken.

1.3.3.1. Grundbegriffe

Aus der Baustatik

Statisches Moment, Drehmoment: Produkt aus Einzelkraft und (senkrechtem) Abstand zwischen Wirkungslinie der Kraft und Drehpunkt bzw. Drehachse (Kraft mal Hebelarm).

Kräftepaar: zwei in einer Ebene liegende parallele Kräfte von gleicher Größe, aber entgegengesetzter Richtung. Das Kräftepaar erzeugt ein Drehmoment, dessen Größe gleich dem Produkt aus der Kraft und dem Abstand der Wirkungslinien ist.

Tragwerke: Man unterscheidet Stabwerke (Linienträger, nur aus Stäben bestehend) und Flächentragwerke (Flächenträger, z. B. Scheiben, Schalen, Platten).

Stützung: Auflagerung eines Tragwerkes gegen feste Punkte, dargestellt durch einen, zwei oder drei einfache Stützstäbe je nach beweglicher oder fester Auflagerung.

Statisch bestimmt heißt ein Tragwerk, wenn die Lagerkräfte sowie die Schnittkräfte (Normalkraft, Querkraft, Moment) für jeden Stabquerschnitt bei vorgegebener Belastung mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen ermittelt werden können.

Statisch unbestimmt heißt ein Tragwerk, wenn die Gleichgewichtsbedingungen zur Bestimmung dieser Werte nicht ausreichen.

Gleichgewichtsbedingungen zur Berechnung der Stützkräfte eines ebenen Tragwerks: Summe der Horizontalkomponenten aller am Tragwerk angreifenden Kräfte gleich Null; Summe der Vertikalkomponenten aller am Tragwerk angreifenden Kräfte gleich Null; Summe der Momente aller angreifenden Kräfte in bezug auf einen beliebig gewählten Drehpunkt gleich Null.

Aus der Festigkeitslehre

Zug-, Druck- und *Biegespannungen* wirken senkrecht (normal) zum gefährdeten Querschnitt des Werkstücks; man nennt sie *Normalspannungen σ. Abscher-, Verdreh-* oder *Torsionsspannungen* wirken im oder parallel zum gefährdeten Querschnitt; man nennt sie *Tangentialspannungen τ.* Mit *Elastizität* bezeichnet man das Bestreben eines durch eine Kraft (Belastung) vorübergehend verformten Körpers, nach Aufhören der Kraftwirkung wieder seine frühere Form (und Lage) anzunehmen.

Bau- und Maschinenteile dürfen weder bis zur Bruchgrenze noch bis zur Elastizitätsgrenze beansprucht werden. Bei ruhender Belastung nennt man das Verhältnis der Bruchbeanspruchung zur zulässigen Beanspruchung *Sicherheit(sfaktor) v.* Betragen bei einem Werkstoff die Bruchbeanspruchung 400 MPa

und die zulässige Beanspruchung 80 MPa, so ist die Sicherheit $\nu = 400\ \text{MPa} : 80\ \text{MPa} = 5$.

Bei *Bauten* (Gebäuden, Brücken) befinden sich die auftretenden Kräfte im Gleichgewicht; die Teile sind *statisch beansprucht*. Im *Maschinenbau* dagegen ändern sich die Kräfte laufend nach Größe und Richtung, die Teile werden *dynamisch beansprucht*.

Zugbeanspruchung: Die äußeren Kräfte wirken in Längsrichtung des Körpers, so daß er gestreckt wird oder zerreißt; es treten *Zugspannungen* auf, z. B. bei Zugstange, Seil, Kette. Bedeuten F ziehende Kraft, A_{min} Größe des kleinsten Querschnitts (Nutzquerschnitt), σ_z Zugbeanspruchung, so gilt

$$\sigma_{z\,vorh} = F_{vorh} : A_{min},\ A_{erf} = F_{max} : \sigma_{z\,zul},\ F_{zul} = A_{min}\sigma_{z\,zul}$$

Druckbeanspruchung: Die äußeren Kräfte wirken in der Längsrichtung des Körpers, so daß er gedrückt wird; dabei treten *Druckspannungen* auf. Ist das beanspruchte Teil schlank, dann tritt die Zerstörung nicht durch Zerdrücken, sondern durch Zerknicken ein. Reine Druckbeanspruchung tritt deshalb nur bei gedrungenen Werkstücken oder Bauteilen auf. Bedeuten F drückende Kraft, A_{min} kleinster Querschnitt, σ_d Druckbeanspruchung, so gilt

$$\sigma_{d\,vorh} = F_{vorh} : A_{min},\ A_{erf} = F_{max} : \sigma_{d\,zul},\ F_{zul} = A_{min}\sigma_{d\,zul}.$$

Biegebeanspruchung: Die äußeren Kräfte wirken senkrecht zur Längsrichtung des Körpers, so daß er auszubiegen sucht. Es treten *Biegespannungen* σ_b auf, die wesentlich vom Belastungsfall abhängen (vgl. Tabelle 1.41). Die Größe für das Biegebestreben der äußeren Kräfte ist das *Biegemoment* M_b, die Größe für den Widerstand des Körpers gegen Verbiegen das *Widerstandsmoment* W_b. Letzteres ist abhängig von Form und Größe des Körperquerschnitts und wird mit Hilfe des Trägheitsmoments der Querschnittsfläche errechnet. Es gilt

$$\sigma_{b\,vorh} = M_{b\,vorh} : W_{b\,min},\ W_{b\,erf} = M_{b\,max} : \sigma_{b\,zul},$$
$$M_{b\,zul} = W_{vorh}\sigma_{b\,zul}.$$

Wird ein auf zwei Stützen ruhender Träger oder Balken durch eine Last ungleichmäßig beansprucht, so verteilt sich diese auf die beiden Auflager A und B entsprechend. Bei einer Einzellast F ergibt sich (Bild 1.44):

$$F_A = Fy/l \quad \text{oder} \quad F_B = Fx/l.$$

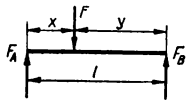


Bild 1.44. Einzellast

Schub- und *Scherbeanspruchung:* Die äußeren Kräfte verschieben zwei benachbarte Querschnitte des Körpers gegeneinander, so daß *Scher-* oder *Schubspannungen* auftreten. Von Scherspannungen τ_a spricht man, wenn Kraft und Gegenkraft in einer Ebene wirken oder wenn das beanspruchte Teil an der Biegung gehindert wird, z. B. der Nietschaft bei einer Nietverbindung. Schubspannungen τ_s treten auf, wenn Kraft und Gegenkraft in einem bestimmten Abstand gegeneinander wirken, so daß der Bauteil gleichzeitig auf Biegung beansprucht wird. Bei Scherbeanspruchung kann man die Spannungen gleichmäßig über den Querschnitt verteilt annehmen, bei Schubbeanspruchung dagegen nicht. Es gilt

$$\tau_{a\,vorh} = F_{max} : A,\ A_{erf} = F_{max} : \tau_{a\,zul},\ F_{zul} = A_{vorh}\tau_{a\,zul}.$$

Drehbeanspruchung: Verdreht man einen Stab um seine Längsachse, so entsteht eine Drehbeanspruchung, z. B. in Kurbelwellen, Transmissionswellen, Spindeln. Ist r der (senkrechte) Abstand der Kraft vom Drehpunkt (Hebelarm), so gilt Drehmoment ist Kraft mal Hebelarm; $M_t = Fr$.
Die zulässigen Drehmomente (hier Torsionsmomente M_t) sind von den Querschnitten abhängig (vgl. Tabelle 1.42, S. 64).

Knickbeanspruchung: Bei Druckbelastung dünner Stäbe besteht Knickgefahr. Sie sind nach der Berechnung auf Druck und Knickung nachzuprüfen. Es ist

$$F = F_K : \nu;\ F_K = \pi^2 EI/l^2;$$

l Stablänge, ν Sicherheitszahl, E Elastizitätsmodul, F zulässige Belastung, F_K Knicklast, I kleinstes Trägheitsmoment des gefährdeten Querschnitts.

Die *Sicherheitszahl* ν bezeichnet die Sicherheit gegen Knicken. Die zulässig mittig wirkende Belastung F wird bei Knickbeanspruchung je nach Einspannungsart nach den EULERschen *Formeln* berechnet (Tabelle 1.43) und nach dem ω-Verfahren kontrolliert.

1.3.3.2. Tabellen

Zur Berechnung von Aufgaben aus Statik und Festigkeitslehre stehen als Hilfsmittel Tabellen zur Verfügung, von denen einige wichtige im folgenden angeführt sind (Tabellen 1.41 bis 1.43).

Tabelle 1.41: Statische Werte für Träger

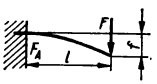
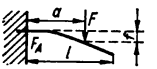
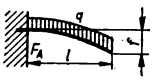
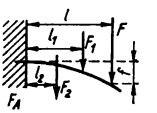
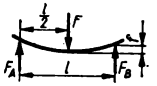
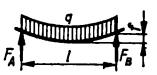
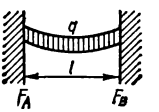
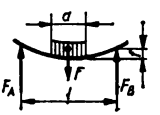
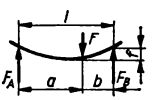
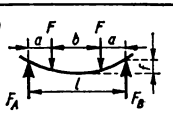
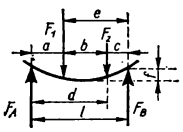
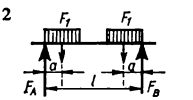
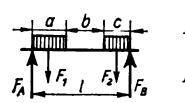
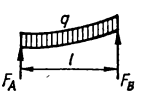
Belastungsfall	Auflagerkräfte F_A und F_B, Biegemoment M Durchbiegung f
1 	$F_A = F,\ M_{max} = Fl,$ $f = \frac{Fl^3}{3EI}$
2 	$F_A = F,\ M_{max} = Fa,$ $f = \frac{Fa^3}{3EI}$
3 	$F_A = ql,\ M_{max} = \frac{ql^2}{2},$ $f = \frac{ql^4}{8EI}$
4 	$F_A = F + F_1 + F_2,$ $M_{max} = Fl + F_1l_1 + F_2l_2,$ $f = \frac{Fl^3 + F_1l_1^2l + F_2l_2^2l}{3EI}$
5 	$F_A = F_B = \frac{F}{2},\ M_{max} = \frac{Fl}{4},$ $f = \frac{Fl^3}{48EI}$
6 	$F_A = F_B = \frac{ql}{2},\ M_{max} = \frac{ql^2}{8},$ $f = \frac{ql^4}{77EI}$
7 	eingespannter Träger: $F_A = F_B = \frac{ql}{2},\ M_{max} = \frac{ql^2}{12},$ $f = \frac{ql^4}{384EI}$
8 	$F_A = F_B = \frac{F}{2},$ $M_{max} = \frac{F(2l - a)}{8},$ $f = \frac{Fl^3}{\left(48 + \frac{29a}{l}\right) EI}$
9 	$F_A = \frac{Fb}{l},\ F_B = \frac{Fa}{l},$ $M_{max} = \frac{Fab}{l},\ f = \frac{Fa^2b^2}{3EIl}$
10 	$F_A = F_B = F,\ M_{max} = Fa,$ $f = \frac{Fa(8a^2 + 12ab + 3b^2)}{24EI}$

Tabelle 1.41 (Fortsetzung)

Belastungsfall	Auflagerkräfte F_A und F_B, Biegemoment M Durchbiegung f
11 	$F_A = \frac{F_1 e + F_2 c}{l}$, $F_B = \frac{F_1 a + F_2 d}{l}$, $M_1 = F_A a$, $M_2 = F_B c$, $f = \frac{(F_1 a + F_2 c)(x)}{48EI}$, $(x) = (8ac + 6ab + 6bc + 3b^2)$
12 	$F_A = F_B = F_1$, $M_{max} = F_1 a$
13 	$F_A = \frac{F_1(0{,}5a + b + c) + F_2 \cdot 0{,}5c}{l}$, $F_B = \frac{F_1 \cdot 0{,}5a + F_2(a + b + 0{,}5c)}{l}$, $M_1 = \frac{F_A{}^2 a}{2F_1}$, $M_2 = \frac{F_B{}^2 c}{2F_2}$

Belastungsfall	Auflagerkräfte F_A und F_B, Biegemoment M Durchbiegung f
14 	Treppen – Wangenträger: $F_A = F_B = \frac{ql}{2}$ bis 30° Steigung, $M_{max} = \frac{ql^2}{8}$ (angenähert)

l freie Länge (Stützweite)
M_{max} maximales Biegemoment
$F, F_1, F_2, \ldots, F_n$ Einzellasten und im Schwerpunkt konzentriert angenommene gleichmäßig verteilte Streckenlasten
q gleichmäßig verteilte Lasten je Streckeneinheit
F_A, F_B Auflagerkräfte
f Durchbiegung
I Flächen-Trägheitsmoment
E Elastizitätsmodul

Tabelle 1.42: Trägheitsmomente, Widerstandsmomente und zulässige Drehmomente einiger Querschnittsformen

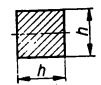
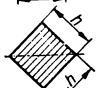
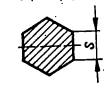
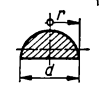
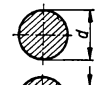
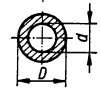
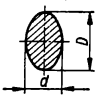
Querschnitt	I	W	M_t
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^2}{6}$	$\left(\frac{26b}{125} + \frac{h}{52}\right) hb\tau_{t\,zul}$ bei $(h:b) < (5:1)$
	$\frac{h^4}{12}$	$\frac{h^3}{6}$	$0{,}209h^3\tau_{t\,zul}$
	$\frac{h^4}{12}$	$\frac{\sqrt{2}}{12}h^3 = 0{,}118h^3$	$0{,}209h^3\tau_{t\,zul}$
	$\frac{5}{16}\sqrt{3}s^4 = 0{,}541s^4$	$\frac{5s^3}{8} = 0{,}625s^3$	$\frac{5s^3\tau_{t\,zul}}{4}$
	$\frac{5}{16}\sqrt{3}s^4 = 0{,}541s^4$	$\frac{5}{16}\sqrt{3}s^3 = 0{,}541s^3$	$\frac{5s^3\tau_{t\,zul}}{4}$
	$\frac{d^4}{145}$	$\frac{d^3}{42}$	$\frac{d^3\tau_{t\,zul}}{10}$
	$\frac{d^4}{20}$	$\frac{d^3}{10}$	$\frac{d^3\tau_{t\,zul}}{5}$
	$\frac{D^4 - d^4}{20}$	$\frac{D^4 - d^4}{10D}$	$\frac{(D^4 - d^4)\tau_{t\,zul}}{5D}$
	$\frac{D^3 d}{20}$	$\frac{D^2 d}{10}$	$\frac{Dd^2\tau_{t\,zul}}{5}$

Tabelle 1.42 (Fortsetzung)

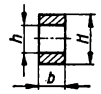
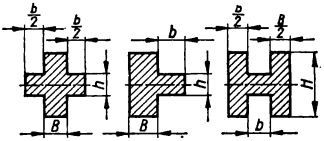
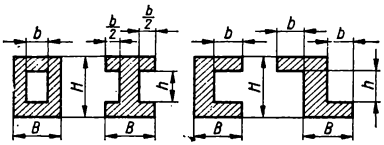
Querschnitt	I	W	M_t
	$\frac{b}{12}(H^3 - h^3)$	$\frac{b(H^3 - h^3)}{6H}$	–
	$I = \frac{BH^3 + bh^3}{12}$	$W = \frac{BH^3 + bh^3}{6H}$	
	$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$W = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$	

Tabelle 1.43: Zulässige Knicklasten schlanker Stäbe

Fall		F und s_K
Fall I		ein Ende eingespannt, das andere frei $F = \frac{\pi^2 EI}{4\nu l^2}$ $s_K = 2l$
Fall II		beide Enden frei, in der Stabachse geführt $F = \frac{\pi^2 EI}{\nu l^2}$ $s_K = l$
Fall III		ein Ende eingespannt, das andere frei, in der Stabachse geführt $F = \frac{2\pi^2 EI}{\nu l^2}$ $s_K = \frac{1}{2}\sqrt{2}\,l \approx 0{,}7l$
Fall IV		beide Enden eingespannt, in der Stabachse geführt $F = \frac{4\pi^2 EI}{\nu l^2}$ $s_K = 0{,}5l$

Führt man die freie Knicklänge s_K ein, so lassen sich die vier Formeln zusammenfassen zu

$$F = \frac{\pi^2 EI}{\nu {s_K}^2}$$

F zulässige Belastung, E Elastizitätsmodul, I kleinstes Trägheitsmoment des Stabquerschnittes, s_K Knicklänge.

1.3.3.3. Beispiele

Im folgenden werden für die verschiedenen Beanspruchungsarten einige Beispiele durchgerechnet.

Beispiel 1: Die Zugstange eines Dachbinders aus Stahl mit kreisförmigem Querschnitt hat eine Kraft von $F = 150$ kN zu übertragen. Gesucht wird der erforderliche Stangenquerschnitt A_{erf} bei $\sigma_{z\,zul} = 160$ MPa.

Lösung: $A_{erf} = F_{max}: \sigma_{z\,zul} = 150\ \text{kN}/160\ \text{MPa} \approx 9{,}4\ \text{cm}^2$; $\pi d^2/4 = 9{,}4\ \text{cm}^2$; $d = 3{,}5$ cm.
Gewählt wird $d = 35$ mm mit $A = 9{,}62\ \text{cm}^2$. Dann ist $\sigma_{z\,verh} = 150\ \text{kN}/9{,}62\ \text{cm}^2 = 15{,}6\ \text{kN/cm}^2 = 156\ \text{MPa} < \sigma_{z\,zul}$.

Beispiel 2: Ein kurzer Pfeiler aus Mauerziegel MZ 100 in MG II soll mit $F = 100$ kN belastet werden. Die zulässige Druckbeanspruchung ist $\sigma_{d\,zul} = 0{,}9$ MPa. Gesucht sind Pfeilerquerschnitt A und Quadratseite a.

Lösung: $A_{erf} = F_{max}: \sigma_{d\,zul} = 100\ \text{kN}/0{,}9\ \text{MPa} = 1111\ \text{cm}^2$; $a = \sqrt{A} = \sqrt{1111\ \text{cm}^2} \approx 33{,}4$ cm, ausgeführt 365 mm.

Beispiel 3: Ein I-Träger als Freiträger (Tabelle 1.41, Fall 1) ist mit $F = 20$ kN belastet, Kraglänge $l = 3000$ mm, $\sigma_{b\,zul} = 160$ MPa; $E = 210$ GPa; gesucht sind Profilgröße und Durchbiegung f.

Lösung: $M_{max} = Fl = 20\ \text{kN} \cdot 300\ \text{cm} = 6000\ \text{kN} \cdot \text{cm} = 60\ \text{kN} \cdot \text{m}$, $W_{erf} = M_{max}/\sigma_{b\,zul} = 60\ \text{kN} \cdot \text{m}/160\ \text{MPa} = 375\ \text{cm}^3$; gewählt wird I 26 mit $W_x = 442\ \text{cm}^3$ und $I_x = 5740\ \text{cm}^4$. Durchbiegung $f = Fl^3/3EI = 20\ \text{kN} \cdot (300\ \text{cm})^3/3 \cdot 210\ \text{GPa} \cdot 5740\ \text{cm}^4 \approx 15$ mm.

Beispiel 4: Ein I-Träger als Träger auf zwei Stützen (Tabelle 1.41, Fall 5) ist in der Mitte mit $F = 20$ kN belastet; $l = 3000$ mm, $\sigma_{b\,zul} = 160$ MPa; $E = 210$ GPa;

Lösung: $M_{max} = Fl/4 = 20\ \text{kN} \cdot 300\ \text{cm}/4 = 15\ \text{kN} \cdot \text{m}$, $W_{erf} = M_{max}/\sigma_{b\,zul} = 15\ \text{kN} \cdot \text{m}/160\ \text{MPa} = 93{,}75\ \text{cm}^3$; gewählt wird I 16 mit $W_x = 117\ \text{cm}^3$ und $I_x = 935\ \text{cm}^4$. Durchbiegung $f = Fl^3/48EI = 20\ \text{kN} \cdot (300\ \text{cm})^3/48 \cdot 210\ \text{GPa} \cdot 935\ \text{cm}^4 \approx 6$ mm.

Beispiel 5: Ein Träger auf zwei Stützen (Tabelle 1.41, Fall 9) ist mit $F = 30$ kN belastet, $l = 5000$ mm, $a = 2000$ mm, $b = 3000$ mm. Berechne Auflagerkräfte und größtes Biegemoment!

Lösung: $F_A = Fb/l = 30\ \text{kN} \cdot 300\ \text{cm}/500\ \text{cm} = 18\ \text{kN}$,

$F_B = Fa/l = 30\ \text{kN} \cdot 200\ \text{cm}/500\ \text{cm} = 12\ \text{kN}$.

Die Summe der *Auflagerkräfte* ist $F = F_A + F_B = 30$ kN; $M_{max} = Fab/l = 30\ \text{kN} \cdot 300\ \text{cm} \cdot 200\ \text{cm}/500\ \text{cm} = 3600\ \text{kN} \cdot \text{cm} = 36\ \text{kN} \cdot \text{m}$. Das größte Biegemoment befindet sich im Angriffspunkt der Last F (*gefährdeter Querschnitt*).

Beispiel 6: Eine Transmissionswelle hat bei einer Umlaufzahl von $n = 200$/min die Leistung $P = 15$ kW zu übertragen.

Gesucht ist der erforderliche Wellendurchmesser d. Die zulässige Drehbeanspruchung beträgt $\tau_t = 12$ MPa.

Lösung: Drehmoment $M_t = 955000 \cdot P/n = 955000 \cdot 15$ kW/200 min^{-1} = 71,6 kN · cm
(955000 ist eine Umrechnungszahl, entstanden aus $3 \cdot 10^6/\pi$). Nach Tabelle 1.42 ist für kreisförmigen Querschnitt $M_t = d^3 \cdot \tau_{t\,zul}/5$; daraus ergibt sich $d^3 = 5M_t/\tau_{t\,zul} = 5 \cdot 71{,}6$ kN · cm/12 MPa = 298,3 cm^3; somit $d \approx 6{,}7$ cm; gewählt wird $d = 70$ mm.

1.3.4. Aus der Thermodynamik

1.3.4.1. Wärmeausdehnungskoeffizient

Erwärmt man einen festen oder flüssigen Stoff, so dehnt er sich i. allg. aus. Eine Ausnahme bildet z. B. Wasser, das im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 4 °C beim Erwärmen sein Volumen verkleinert (Anomalie des Wassers). Das Verhältnis des Längenzuwachses eines Körpers bei Erwärmung um 1 K zur ursprünglichen Länge nennt man den *linearen Ausdehnungskoeffizienten* α (gemessen in 1/K), das Verhältnis des Volumenzuwachses zum ursprünglichen Volumen den räumlichen oder *kubischen Ausdehnungskoeffizienten* γ (Tabelle 1.44).
Es ist

linear $l_t = l_0(1 + \alpha t)$,
$l_2 - l_1 \approx l_1 \alpha (t_2 - t_1)$;

kubisch $V_t = V_0(1 + \gamma t)$,
$V_2 = V_1 \approx V_1 \gamma (t_2 - t_1)$;
$\gamma = 3\alpha$.

l_0, V_0 Länge bzw. Volumen bei 0 °C, l_t, V_t Länge bzw. Volumen bei der Temperatur t, t in °C, α linearer Ausdehnungskoeffizient, γ kubischer Ausdehnungskoeffizient.

Beispiel: Welchen linearen Ausdehnungskoeffizienten hat eine Legierung, wenn sie sich bei Erwärmung von 15 °C auf 100 °C um 1,5 ‰ ausdehnt?

Lösung:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1(t_2 - t_1)} = \frac{0{,}0015}{85\ \text{K}} \approx 0{,}000018\ \text{K}^{-1}.$$

Tabelle 1.44: Wärmeausdehnungskoeffizienten einiger Stoffe

a) Feste Körper (zwischen 0 und 100 °C)

Stoff	α 1/K	Stoff	α 1/K
Aluminium	0,000023	Mauerwerk, Ziegel	0,000005
Beton, Bims-	000007	Neusilber	000018
Beton, Stahl-	000012	Nickel, Chrom-	000014
Blei	000029	Nickelin	000016
Bronze, Messing	000018	Platin	000009
Diamant	000001	Polyvinylchlorid (PVC)	≈ 000080
Glas, Saale- 16	000008	Porzellan	≈ 000004
Gold	000014	Quarz	≈ 000001
Graphit	000008	Silber	≈ 000020
Holz ‖ Faser	000008	Stahl, Fluß-	000013
Konstantan	000014	Tantal	000007
Kupfer	000016	Wismut	000014
Magnesium	000026	Wolfram	000004
Mangan	000023	Zink	≈ 000030
Manganin	000016	Zinn	≈ 000027
Mauerwerk, Bruchstein	000012		

b) *Flüssigkeiten* (um 18 °C)

Stoff	γ 1/K
Äthanol (Alkohol)	0,0011
Äthansäure (Essig)	0,0014
Benzol	0,0011
Brom	≈ 0,001 15
Chloroform	0,0012 8
Diäthyläther	0,0016
Erdöl	≈ 0,0007
Glyzerin	0,0005
Methanol	0,0011 9
Paraffin	0,0007
Petroleum	0,0009
Quecksilber	0,0001 8
Salpetersäure (75 %)	0,0011
Schwefelsäure (17 %)	0,0005
Wasser	0,0001 8

Tabelle 1.45: Schwindmaße einiger Metalle

Werkstoff	Schwindmaß %	Werkstoff	Schwindmaß %	Werkstoff	Schwindmaß %
Aluminium	1,79	Neusilber	1,80	Stahlguß (0,1 % C)	2,00
Blei	1,09	Nickel	1,89	Wolfram	1,44
Kupfer	1,4	Platin	1,70	Zink	1,61
Messing, Rotguß	≈ 1,54	Stahl	≈ 1,6	Zinn	0,69

Tabelle 1.46: Spezifische Wärmekapazitäten einiger Stoffe

Stoff	Zustand	c_p bzw. c_v J/(kg · K)	Stoff	Zustand	c_p bzw. c_v J/(kg · K)	Stoff	Zustand	c_p bzw. c_v J/(kg · K)
Äthanol (0 °C)	fl.	2340	Helium (18 °C)	g.	5230	Porzellan	f.	800
Aluminium	f.	920	Holz, Eiche	f.	2400	Quarzglas	f.	800
Ammoniak	g.	2100	Holz, Fichte	f.	1900	Quecksilber	fl.	130
Benzol (0 °C)	fl.	1720	Holzwolle			Sauerstoff	g.	920
Beton, Stahl-	f.	880	Leichtbauplatten	f.	2000	Schlacke	f.	840
Beton, Schlacke	f.	1130	Kalksandstein	f.	880	Schwefel		
Blei	f.	130	Kobalt	f.	420	(monoklin, 0 °C)	f.	710
Bor (0 °C)	f.	960	Kochsalz	f.	880	Silber	f.	250
Bronze	f.	380	Kohlendioxid	g.	840	Silizium	f.	75
Chlor	g.	500	Konstantan	f.	420	Stickstoff	g.	1050
Chrom	f.	460	Kupfer	f.	380	Titan	f.	630
Diäthyläther (0 °C)	fl.	2260	Luft (18 °C)	g.	1000	Torf	f.	1880
Diamant (0 °C)	f.	420	Magnesium	f.	1050	Wasser	fl.	4190
Eis (0 °C)	f.	2095	Mauervollziegel	f.	900	Wasserstoff	g.	14240
Eisen, rein	f.	466	Messing	f.	380	Wismut	f.	130
Glas, Fenster-	f.	880	Öl (Masch., 18 °C)	fl.	1670	Wolfram	f.	130
Glas, Saale-	f.	840	Petroleum (18 °C)	fl.	2100	Zink	f.	380
Glyzerin (18 °C)	fl.	2390	Phosphor,			Zinn	f.	210
Gold	f.	130	gelb (0 °C)	f.	755			
Graphit (0 °C)	f.	630	Platin	f.	130			

Das *Schwinden* der Metallegierungen während des Erkaltens muß in der Gießereitechnik beim Bau der Modelle berücksichtigt werden. Das *Schwindmaß* gibt an, um wieviel Prozent der Werkstoff in seiner Längenausdehnung abnimmt (Tabelle 1.45).

1.3.4.2. Spezifische Wärmekapazität

Die *spezifische Wärmekapazität c* eines Stoffes gibt die Wärmemenge in Joule an, die nötig ist, um die Masse 1 kg des Stoffes um 1 K zu erwärmen [J/(kg · K)]. Sie ist in geringem Maße von der Temperatur abhängig.
Bei kalorimetrischen Messungen ist die Kenntnis des *Wasserwertes* für die Genauigkeit des Ergebnisses wichtig. Der Wasserwert gibt an, wieviel Joule die Meßapparatur bei einem Temperaturanstieg von 1 K aufnimmt (J/K).
Bei Gasen ist zu unterscheiden zwischen spezifischer Wärmekapazität bei konstant gehaltenem Druck (c_p) und bei konstant gehaltenem Volumen (c_v). Im folgenden ist immer c_p gemeint (Tabelle 1.46). Die Werte stellen, wenn nicht anders vermerkt, die mittlere spezifische Wärmekapazität zwischen 0 °C und 100 °C dar.
Es ist

$$Q = mc\,\Delta t \quad \text{bzw.} \quad c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t}; \quad m_w = mc = \frac{Q}{\Delta t},$$

m Masse des Körpers, Q zugeführte Wärmemenge, Δt Temperaturanstieg, m_w Wasserwert (Wärmekapazität einer Meßapparatur).

Beispiel: Welche Wärmemenge muß einem Kupferstück von der Masse 0,35 kg und der Temperatur 18 °C zugeführt werden, damit seine Temperatur auf 70 °C steigt?

Lösung:

$Q = mc\,\Delta t = 0{,}35\ \text{kg} \cdot 380\ \text{J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 52\ \text{K} = 6916\ \text{J}.$

1.3.4.3. Schmelzwärme und Verdampfungswärme

Die *Schmelzwärme*, gemessen in kJ/kg, gibt die Wärmemenge an, die man benötigt, um 1 kg eines Stoffes bei der Schmelztemperatur ohne Temperaturerhöhung vom festen in den flüssigen Zustand überzuführen. Die *Erstarrungswärme* ist die Wärmemenge, die frei wird, wenn 1 kg eines Stoffes bei der Erstarrungstemperatur vom flüssigen in den festen Zustand übergeht. Schmelzwärme und Erstarrungswärme eines Stoffes sind – ebenso wie Schmelztemperatur und Erstarrungstemperatur – einander gleich.
Die *Verdampfungswärme*, gemessen in kJ/kg, gibt die Wärmemenge an, die man benötigt, um 1 kg eines Stoffes bei der Siedetemperatur vom flüssigen in den gasförmigen Zustand überzuführen. Die *Kondensationswärme* ist die Wärmemenge, die frei wird, wenn 1 kg eines Stoffes bei der Kondensationstemperatur vom gasförmigen in den flüssigen Zustand übergeht. Verdampfungswärme und Kondensationswärme eines Stoffes sind ebenfalls einander gleich (Tabellen 1.47 und 1.48).

Tabelle 1.47: Schmelz- und Verdampfungswärme einiger Stoffe

a) Schmelzwärme

Stoff	Schmelzwärme kJ/kg	Stoff	Schmelzwärme kJ/kg
Aluminium	398	Nickel	301
Antimon	163	Phosphor	21
Blei	25	Platin	100
Chrom	314	Quecksilber	11,3
Eis	333,7	Sauerstoff	13
Eisen, rein	268	Schwefel (monoklin)	38
Gold	63	Silber	105
Kadmium	54	Silizium	142
Kalium	63	Wachs	176
Kobalt	260	Wasserstoff	59
Kohlendioxid	180	Wismut	54
Kupfer	205	Wolfram	193
Magnesium	373	Zink	100
Mangan	264	Zinn	59
Natrium	113		

b) Verdampfungswärme

Stoff	Verdampfungswärme in kJ/kg
Ammoniak	1369
Äthanol	842
Benzol	394
Blei	850
Chlor	260
Diäthyläther	360
Kohlendisulfid	364
Quecksilber	285
Sauerstoff	214
Schwefel	331
Stickstoff	201
Toluol	348
Wasser	2257
Wasserstoff	469
Zink	1758

Tabelle 1.48: Schmelztemperaturen und Siedetemperaturen (bei normalem Luftdruck)

Stoff	Schmelztemperatur °C	Siedetemperatur °C	Stoff	Schmelztemperatur °C	Siedetemperatur °C	Stoff	Schmelztemperatur °C	Siedetemperatur °C
Aluminium	659	2497	Iod (Jod)	113	184	Quarzglas	1700	
Ammoniak	−78	−33	Iridium	2454		Quecksilber	−38,8	357
Antimon	630	1635	Kadmium	321	767	Radium	700	1140
Asbest	1250		Kalium	63	776	Radon	−71	−62
Äthanol	−114	78	Kalzium	851	1487	Salpetersäure	−47	86
Äthen	−170	−104	Kobalt	1490	3185	Sauerstoff	−219	−183
Äthin	−82	−84	Kohlendioxid	(−57)	(−78)	Schwefel	119	445
Barium	710	1638	Kohlen-			Schwefel-		
Benzin	< −50	100	disulfid	−112	46	wasserstoff	−86	−60
Benzol	5	80	Kohlenoxid	−205	−192	Silber	961	2170
Beryllium	1280	2967	Kupfer	1083	2600	Silizium	1410	2630
Blei	327	1752	Leinöl	−15	316	Stahl	≈1400	
Bor	2300	≈2550	Lithium	179	1372	Stearin	50	
Brom	−7	59	Luft	−213	−193	Stickstoff	−210	−196
Bronze	≈1000		Magnesium	657	1102	Tantal	3030	4100
Chlor	−103	−34	Mangan	1250	2152	Terpentinöl	−10	161
Chloroform	−63	61	Messing	≈900		Titan	1727	> 3000
Chrom	1920	2327	Methan	−183	−161	Uran	1690	
Diäthyläther	−124	35	Molybdän	2622	4800	Wasser	0	100
Eis	0		Naphthalin	80	218	Wasserstoff	−262	−253
Eisen, rein	1537	2735	Natrium	98	883	Wismut	271	1560
Fluor	−218	−188	Neon	−249	−246	Wolfram	3380	6000
Glyzerin	18	290	Nickel	1455	3177	Zer	775	
Gold	1063	2960	Phosphor	44	280	Zink	419	907
Helium	−271	−269	Platin	1773	4400	Zinn	232	2430

Es ist

$Q = mc_{p1}(t_s - t_1) + mS + mc_{p2}(t_2 - t_s)$,

$Q = mc_{p1}(t_v - t_1) + mV + mc_{p2}(t_2 - t_v)$.

S Schmelzwärme, V Verdampfungswärme, t_s Schmelztemperatur, t_v Siedetemperatur, c_{p1}, c_{p2} spezifische Wärmekapazität im Zustand 1 bzw. 2, t_1, t_2 Temperatur im Zustand 1 bzw. 2, Q Wärmemenge.

Beispiel: Um 300 l Wasser von 20 °C zum Sieden zu bringen, leitet man Dampf von 100 °C ein. Wieviel Dampf benötigt man?

Lösung:

$m_w c_w \Delta t = m_D V$,

$$m_D = \frac{1}{2257\ \text{kJ/kg}} \cdot 300\ \text{kg} \cdot 4190\ \text{J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 80\ \text{K} = 44{,}6\ \text{kg}.$$

1.3.4.4. Wärmeleitfähigkeit

Die *Wärmeleitfähigkeit* bzw. der *Wärmeleitwert* gibt an, welche Wärmemenge durch eine Stoffschicht von 1 m Dicke und 1 m² Oberfläche innerhalb einer Stunde hindurchgeleitet wird, wenn auf den beiden Oberflächen konstante Temperaturen herrschen, deren Unterschied 1 K beträgt.
Die Wärmeleitfähigkeit wird in J/(m · s · K) = W/(m · K) gemessen.
Umrechnungsfaktor: 1 kcal/(m · h · K) = 1,163 J/(m · s · K).
Stoffe mit kleinem Wärmeleitwert leiten die Wärme schlecht, sie sind daher für die *Wärmedämmung* besonders geeignet (Tabelle 1.49).

Es sind

$$Q = \lambda \frac{A\,\Delta T t}{s} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{Qs}{A\,\Delta T t},$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{s}\ \text{Wärmedurchlaßwert},$$

$$R = \frac{s}{\lambda}\ \text{Wärmedurchlaßwiderstand, Wärmedämmwert}$$

Q Wärmemenge, λ Wärmeleitfähigkeit, A Fläche, ΔT Temperaturdifferenz, t Zeit, s Wanddicke.
Beispiel: Eine 20 cm dicke Betonwand von 4 m Länge und 2,5 m Höhe hat auf beiden Seiten konstante Oberflächentemperaturen von 17 °C (innen) und −13 °C (außen). Welche Wärmemenge wird innerhalb 24 h hindurchgeleitet, wenn die Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0{,}38$ J/(m · s · K) beträgt?

Tabelle 1.49: Wärmeleitfähigkeit einiger Stoffe

a) Metalle (zwischen 0 °C und 100 °C)

Metall	Wärmeleitfähigkeit J/(m · s · K)	Metall	Wärmeleitfähigkeit J/(m · s · K)	Metall	Wärmeleitfähigkeit J/(m · s · K)
Aluminium	210	Kalium	≈135	Silber	418,7
Antimon	16,7	Konstantan	23	Stahl, Cr-Ni-	12,6
Blei	33,5	Kupfer	395	Tantal	54,4
Bronze (84 Cu)	58,6	Magnesium	170	Wismut	8,4
Eisen	83,7	Messing (62 Cu)	85	Wolfram	167
Gold	310	Nickel	85	Zink	≈113
Kadmium	92,1	Platin	71,2	Zinn	67

b) Baustoffe

Baustoff	Rohdichte (trocken) kg/m³	Wärmeleitfähigkeit J/(m · s · K)
Voll-, Waben-, Lochziegel	800	0,40
	2000	0,95
Klinker	2000	1,16
Kalksandsteine	1800	0,99
Mauerwerk aus Naturstein	1260	0,52
	2680	2,91
Kies- und Splittbeton	400	0,17
Hüttenbimsbeton	1000	0,38
Gas- und Schaumbeton	2000	1,16
Asbestbetonplatten	1800	0,47
Zementmörtel	2000	1,16
Kalkzementmörtel	1800	0,95
Gipsmörtel	1200	0,58
Holz quer zur Faser	550	0,14
	200	0,09
Hartfaserplatten	800	0,29
HWL-Platten (zementgeb. 35 mm)	450	0,12
Bauschlackenwolle	200	0,08
Pflanzenfasermatten	200	0,06
Kunstharzschaum (Polyst.)	25	0,06
Schaumglas	150	0,06
	300	0,12
PVC-Schnitzel	200	0,06
Fensterglas	2400	0,80
Wasser	1000	0,58
Erdreich	2000	1,7...2,6

Lösung: $A = 10\ \text{m}^2$, $\Delta T = 30\ \text{K}$, $t = 24\ \text{h}$, $s = 0{,}20\ \text{m}$;

$$Q = \lambda \frac{A\,\Delta T t}{s}$$

$$= 0{,}38\ \text{J/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{K)} \cdot 30\ \text{K} \cdot 24 \cdot 3600\ \text{s} \cdot 10\ \text{m}^2 \cdot \frac{1}{0{,}20\ \text{m}}$$

$$= 49248\ \text{kJ};$$

für den Wärmedämmwert der Wand erhält man

$$R = \frac{s}{\lambda} = \frac{0{,}20\ \text{m}}{0{,}38\ \text{J/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{K)}} = 0{,}526\ \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K/J}$$

$$= 0{,}526\ \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$$

1.4. Standardisierung

1.4.1. Allgemeines

Standardisierung ist eine wissenschaftliche Disziplin und eine Methode zur rationellen Gestaltung und Durchführung des gesellschaftlichen Reproduktionsprozesses. Sie ist komplex durchzuführen, d. h. über den gesamten Bereich der Volkswirtschaft und im Rahmen der sozialistischen ökonomischen Integration der Mitgliedsländer des Rates für Gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW). Die Standardisierung soll, trotz der objektiv notwendigen Erweiterung des Sortiments an Finalerzeugnissen, durch breite Anwendung einheitlicher Lösungen für die Erzeugnisbeschaffenheit, Verfahren und Verständigung aktiv die Entwicklung des wissenschaftlich-technischen Niveaus der Erzeugnisse beeinflussen und damit die notwendige Qualität und Gebrauchseigenschaft sichern. Ihre wichtigsten Funktionen sind die Sicherung eines Vorlaufeffektes und das Erreichen eines Vereinheitlichungseffektes. Die Standardisierung ist Bestandteil der Wissenschafts- und Wirtschaftspolitik der DDR und ist in die Leitung und Planung von Wissenschaft, Technik, Forschung und Entwicklung einzubeziehen.
Grundlegende und allgemeinverbindliche *Rechtsvorschriften für die Standardisierung* in der DDR sind die

Standardisierungsverordnung vom 21. 9. 1967
und die dazu erlassenen Durchführungsbestimmungen:

1. DB Erfordernis der Landesverteidigung bei der Planung und Durchführung der Standardisierungsarbeiten vom 11. 9. 1968,
2. DB Abweichungen von DDR- und Fachbereichstandards vom 11. 9. 1968,
3. DB Kennzeichnung standardisierter Erzeugnisse vom 11. 9. 1968,
4. DB Verbindlichkeit von DDR- und Fachbereichstandards vom 11. 9. 1968,
6. DB Standardisierung von Forderungen des Gesundheits- und Arbeitsschutzes sowie Brandschutzes vom 26. 6. 1974,
7. DB Standardisierung von Forderungen zur Gewährleistung der sozialistischen Landeskultur und des Umweltschutzes vom 27. 11. 1975,
8. DB Verbesserung der Materialökonomie durch Standards vom 8. 3. 1976.

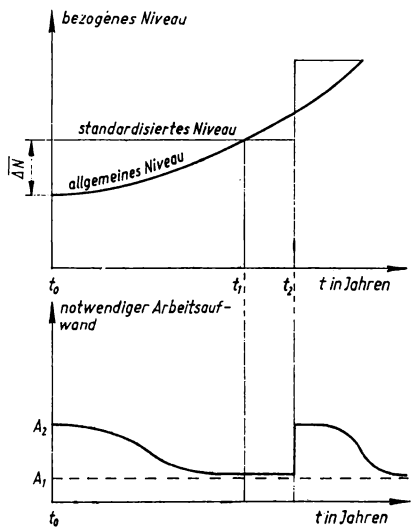


Bild 1.45. Vorlauf und Arbeitsaufwand in der Standardisierung
$\overline{\Delta N}$ Niveau, um das die standardisierte Lösung das allgemeine Niveau bei Einführung in die Produktion übersteigt, t_1 Zeitpunkt, zu dem das allgemeine Niveau das standardisierte Niveau erreicht hat, t_3 Geltungsdauer des Standards, A_1 nicht zu unterbietender Arbeitsaufwand, A_2 notwendiger Arbeitsaufwand bei Einführung einer standardisierten Lösung in die Produktion

Als gesellschaftliche Organisation auf dem Gebiet der Standardisierung besteht in der DDR die *Gesellschaft für Standardisierung* (GfS) in der Kammer der Technik, deren Aufgabe es ist, die sozialistische Gemeinschaftsarbeit zur Förderung der Standardisierung zu organisieren sowie wissenschaftliche Veranstaltungen und Qualifizierungslehrgänge durchzuführen.

1.4.2. Grundsätze, Ziele und Aufgaben

Die Standardisierung in der DDR setzt sich das Ziel, zur ständigen Entwicklung und Vervollkommnung der Produktion beizutragen, so daß ein großer Teil der Erzeugnisse das Weltniveau mit repräsentiert. Standards müssen wirksame Mittel zum Durchsetzen des wissenschaftlich-technischen Höchststandes sein und in allen Bereichen unserer Volkswirtschaft wirken. Wenn durch die Standardisierung die in der weiteren Entwicklung gestellten Aufgaben erfüllt werden sollen, dann muß sie bereits im Gleichlauf mit Forschung und Entwicklung wirksam werden. Forschungsaufgaben können erst dann als gelöst angesehen werden, wenn gleichzeitig der entsprechende Standard vorliegt. Die Standardisierungsarbeit muß auch Bestandteil der Entwicklungsarbeit sein, denn nur so kann ein größerer Nutzen durch eine längere Geltungsdauer des Standards erreicht werden. Wie aus Bild 1.45 ersichtlich, müssen Standards immer über dem allgemeinen Niveau erstellt werden, um aktuell zu sein. Standardlösungen, die gerade dem Niveau entsprechen, sind zum Zeitpunkt der Einführung in die Produktion veraltet.

Standards sind technisches Gesetz. Sie sind nach den für Rechtsnormen gültigen Gesichtspunkten zu erarbeiten und anzuwenden. Diese sind:

1. Öffentlichkeitsprinzip

Die Standards sind unter Mitarbeit verantwortlicher Institutionen und Betriebe sowie in Abstimmung zwischen Herstellern und Anwendern bzw. Verbrauchern zu erarbeiten, zu Einspruchzwecken bekanntzumachen bzw. zu veröffentlichen, zu verkünden und müssen zu Informationszwecken zugänglich sein.

2. Anordnung von Forderungen

Der Standardinhalt soll sich aus streng definierten Forderungen ohne nähere Erläuterung zusammensetzen. Er ist zweifelsfrei und verständlich zu formulieren.

3. Zutreffend für einen bestimmbaren Anwenderkreis

Mit einem genau formulierten Titel und ggf. einer Titelergänzung ist der Geltungsbereich des Standards eindeutig abzugrenzen.

4. Durchsetzungsprinzip

Mit Überzeugung oder auch mit Zwang wird der gewollte Vorteil der Standards in der Wirtschaft durchgesetzt.
Das erlaubt einerseits eine konsequente Nutzung des Vorteils einer rationellen Fertigung und legt andererseits die Verpflichtung einer über das allgemeine technische Niveau hinausgehenden Entwicklung und Standardisierung auf. Nur so ist der Widerspruch zwischen dem ständig zunehmenden Niveau und der »konservierenden Wirkung« der Standards zu lösen.

1.4.3. Zur Anwendung von Standards

1. Gliederung nach dem Inhalt

Bei der Gliederung nach dem Inhalt der Standards wird zwischen Angaben zur *Beschaffenheit*, zu *Verfahren* und zur *Verständigung* unterschieden. Auf Grund dieser Gliederung können sämtliche Standards nach ihrem Inhalt so gegenseitig abgegrenzt werden, daß Überschneidungen ausgeschlossen sind.

2. Gliederung nach der Strenge der Bindung

Der Inhalt von Standards wird grundsätzlich zwingend in Form eines Verbindlichkeitsvermerkes vorgeschrieben. In Ausnahmefällen ist eine nicht zwingende Form möglich, z. B. durch Kennzeichnung des Inhalts als Richtlinie, zur Anwendung empfohlen, Richtwerte.
Verbindliche Festlegungen müssen eingehalten werden; Ausnahmen bedürfen einer besonderen Genehmigung. Bei Festlegungen in nicht zwingender Form ist eine Ausnahme ohne besondere Genehmigung möglich, aber auch nur dann zweckmäßig, wenn ausreichende Gründe dafür vorliegen.

3. Gliederung nach dem Geltungsbereich

Bei der Gliederung nach dem Geltungsbereich kann zwischen DDR-Standards, Fachbereichstandards, Werkstandards und internationalen Standards unterschieden werden.

DDR-Standards gelten im Bereich der DDR. Sie tragen das Symbol TGL, werden unter Wahrung der staatlichen Interessen durch den Präsidenten des Amtes für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW) bestätigt und im Gesetzblatt der DDR verkündet. DDR-Standards enthalten grundsätzliche Festlegungen, die wegen ihrer Bedeutung für die rationelle Gestaltung des gesellschaftlichen Reproduktionsprozesses, insbesondere für die Durchsetzung der Hauptentwicklungsrichtung der Volkswirtschaft, einer zentralen Regelung durch das vom Ministerrat beauftragte Staatsorgan (ASMW) bedürfen.

Fachbereichstandards tragen das Symbol TGL und eine vom ASMW erteilte Nummer und werden durch den zuständigen Generaldirektor des Wirtschaftszweiges bestätigt. Fachbereichstandards enthalten Festlegungen über Beschaffenheit, Verfahren oder Verständigungsmittel, die entsprechend ihrer volkswirtschaftlichen Bedeutung durch das wirtschaftsleitende Führungsorgan des zutreffenden Wirtschaftszweiges anzuordnen sind. DDR- und Fachbereichstandards wirken automatisch vertragsändernd.

Werkstandards werden mit einem vom ASMW bestätigten Symbol gekennzeichnet und vom Werkleiter, Kombinats- oder Institutsdirektor bestätigt. Werkstandards enthalten die für einen Betrieb, ein Kombinat, ein Institut oder eine diesen gleichgestellte Institution erforderlichen Festlegungen vorrangig für die rationelle Lösung der betrieblichen Aufgaben einschließlich Auswahlen aus DDR- und Fachbereichstandards und Ergänzungen zu diesen Standards.
DDR-Standards sind den Fachbereichstandards *übergeordnet.* Das gleiche gilt sinngemäß für das Verhältnis zwischen Fachbereich- und Werkstandards. Untergeordnete Standards dürfen zu übergeordneten nicht im Widerspruch stehen; bei dennoch auftretenden Widersprüchen gilt in jedem Fall der übergeordnete Standard. DDR- und Fachbereichstandards sind für die gesamte Volkswirtschaft der DDR verbindlich, Werkstandards dagegen nur für das jeweilige Kombinat, Institut oder den jeweiligen Betrieb.

Internationale Standardisierung: Die ständig zunehmende internationale Arbeitsteilung verlangt eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Standardisierung, die in den Mitgliedsländern des RGW auf der Grundlage des »*Komplexprogramms für die weitere Vertiefung und Entwicklung der sozialistischen ökonomischen Integration*« erfolgt. Als Normativdokumente werden nur noch RGW-Standards (ST RGW) ausgearbeitet. Darüber hinaus gibt es aus früheren Jahren noch Empfehlungen zur Standardisierung (RS RGW). ST RGW schaffen die Grundlage für die Vorbereitung und Durchführung von Spezialisierungs- und Kooperationsvorhaben der Produktion von Erzeugnissen und legen für diese Erzeugnisse Qualitätsparameter fest, nach denen die Warenlieferungen erfolgen. Mit RS RGW wurden national festgelegte Parameter angeglichen und vereinheitlicht und damit der Warenaustausch erleichtert. ST RGW sind rechtsverbindlich, sie werden entweder direkt oder, in der Mehrzahl der Fälle, durch Einarbeiten in die nationalen Standards der Länder angewendet. Die RS RGW werden gegenwärtig in ST RGW überführt und damit abgelöst. Große Bedeutung bei der zweiseitigen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Standardisierung hat die Abstimmung zwischen den staatlichen Standards der DDR (TGL) und der UdSSR (GOST). Mit der Abstimmung TGL–GOST werden wichtige Voraussetzungen für die Erhöhung des Warenaustausches, die Spezialisierung und Kooperation der Produktion zwischen beiden Ländern durch Vereinheitlichung ausgewählter Standards geschaffen.
Wichtigste nichtstaatliche internationale Standardisierungsorganisation ist die *Internationale Standardisierungsorganisation* (ISO). Sie gibt Empfehlungen (ISO R) und Standards heraus, die in den Technischen Komitees (TC) erarbeitet werden. Die ISO ist eine weltweite Organisation, ihr gehören sowohl sozialistische als auch kapitalistische Länder an. Die Tätigkeit der ISO erstreckt sich auf alle technischen Fachsparten außer Elektrotechnik/Elektronik. Wesentliche Ergebnisse ihrer Arbeit sind die Vereinheitlichung der Gewinde, Passungen, Toleranzen sowie die Standardisierung von Containern. Auf Grund einer Vereinbarung zwischen der ISO und der *Internationalen Elektrotechnischen Kommission* (IEC) arbeitet die IEC für das Gebiet der Elektrotechnik/Elektronik internationale Empfehlungen aus mit dem Ziel der Koordination und Vereinheitlichung von nationalen elektrotechnischen Standards.

4. Gliederung nach dem Wirkungsbereich

Bei der Gliederung nach dem Wirkungsbereich kann zwischen Grundlagenstandards, Fachgrundlagenstandards und Fachstandards unterschieden werden.

Grundlagenstandards enthalten nicht fachgebundene Vereinheitlichungsergebnisse für mehrere Gebiete, die eine grundsätzliche Bedeutung und einen großen Einfluß auf alle Standardisierungsarbeiten haben.

Fachgrundlagenstandards sind von grundsätzlicher Bedeutung für einen Fachbereich und enthalten allgemeine, richtungweisende Grundlagen für Entwicklung, Konstruktion und Fertigung.

Fachstandards enthalten meist nur ein bestimmtes Erzeugnis oder Verfahren und dazu gehörende Abmessungen, Stoff-, Masse- oder Oberflächenbeschaffenheitsangaben bzw. Verfahrensangaben.

5. Gliederung nach der Entwicklungsstufe

Bei der Gliederung nach der Entwicklungsstufe kann zwischen Standardvorschlag, Standardentwurf, »endgültigem« Standard und überarbeitetem Standard unterschieden werden.
Mit *Standardvorschlag* wird allgemein die erste abgeschlossene Ausarbeitung eines künftigen Standards bezeichnet.
Der *Standardentwurf* geht aus dem Standardvorschlag hervor und wird zur Stellungnahme und Einarbeitung von Änderungsvorschlägen veröffentlicht und/oder bekanntgemacht.
Nach der *Bestätigung des Standards* wird er verkündet und damit in dem Grade verbindlich, der im Verbindlichkeitsvermerk angegeben ist.
Die Hervorhebung des *überarbeiteten Standards* als weitere Art eines Standards weist auf den notwendigen dynamischen Charakter der Standardisierung hin.

1.4.4. Wichtige Standards der Elektrotechnik

Allgemeine Grundlagen

TGL 0-1451	Normschriften
TGL 0-1302	Mathematische Zeichen
TGL 22112	Größen, Formelzeichen, Einheiten
TGL 31548	Einheiten physikalischer Größen
TGL 16223	Gestaltung von Standards
TGL 0-7182/02/03	Toleranzen und Passungen
TGL RGW 144	Toleranzen und Passungen des RGW
TGL 2897	Maße ohne Toleranzangabe
TGL 0-202	Gewinde, Bezeichnungen
TGL RGW 780	Nennströme
TGL 15217	Nennfrequenzen bis 10000 Hz
TGL 17872	Nennspannungen bis 380 kV

Schaltzeichen der Elektrotechnik

TGL 16001	Schaltzeichen; Begriffe
TGL 16005	–; Allgemeine Kennzeichen
TGL RGW 864	–; Kondensatoren
TGL RGW 652	–; Antennen
TGL RGW 862	–; Ableiter und Sicherungen
TGL RGW 653	–; Elektrochemische und elektrothermische Quellen
TGL RGW 661	–; Halbleiterbauelemente
TGL RGW 287	–; Schaltgerätetechnik
TGL 16026	–; Meßwerke, Meßinstrumente und elektrische Uhren
TGL 16050	–; Meßgeräte
TGL 16060	–; Installationstechnik
TGL RGW 865	–; Röhren
TGL 16008	–; Widerstände, allgemein
TGL 16007	–; Leitungen, Leitungsverbindungen
TGL RGW 869	–; Spulen, Transformatoren, Transduktoren, Magnetverstärker
TGL 0-40700/05	–; Fernmeldeanlagen

Schaltpläne der Elektrotechnik

TGL 16081	Schaltpläne der Elektrotechnik, Arten, Begriffe
TGL 16083	–; Übersichtsschaltpläne
TGL 16084	–; Stromlaufpläne
TGL 16085	–; Bauschaltpläne

Bauelemente

TGL 32377	Bauelemente der Elektronik
TGL 12476	Starkstrom-Drahtwiderstände, Festwiderstände
TGL 24197	Feste und mechanisch veränderbare Widerstände
TGL 7225	Luft-Drehkondensatoren für Nachrichtentechnik
TGL 5151	Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren
TGL 10794	Funkentstörkondensatoren
TGL 9240	Elektronen- und Empfängerröhren
TGL 15264	Sockel für Elektronenröhren
TGL 8095	Halbleiterbauelemente, Germanium-Dioden
TGL 24285	Siliziumgleichrichterdioden
TGL RGW 24247	Transistoren
TGL 11811	Bauformen für Transistoren
TGL 24951	Integrierte Halbleiterschaltkreise
TGL 24495	Integrierte Hybridschaltkreise
TGL 7487	Galvanische Elemente
TGL 3922	Bleiakkumulatoren, Trockenakkumulatoren
TGL 10241	Blei-Batterien für Kraftfahrzeuge

Elektrotechnische Maschinen und Geräte

TGL 20675	Rotierende elektrische Maschinen
TGL 11856	Asynchron-Drehstrommotoren
TGL 24355	Drehstrommotoren für Hochspannung
TGL 29993	Gleichstrom-Kommutatormotoren
TGL 51-007	Transformatoren, Umsteller
TGL 12464	Leistungsschalter

Elektrotechnische Anlagen

TGL 21804	Starkstromleitungen für feste Legung
TGL 200-1750	Starkstromkabel
TGL 21806	Fernmeldeleitungen für feste Legung
TGL 21807	Fernmeldeleitungen für ortsveränderliche Betriebsmittel
TGL 200-1708	Fernmeldekabel, Niederfrequenzkabel
TGL 200-0600	Begriffe für elektrotechnische Anlagen
TGL 200-0601	Errichtungsvorschriften für elektrotechnische Anlagen
TGL 200-0602	Schutzmaßnahmen in elektrotechnischen Anlagen
TGL 200-0603	Erdung in elektrotechnischen Anlagen
TGL 200-0604	Berechnung von Kurzschlußströmen
TGL 200-0605	Kreuzungen und Näherungen
TGL 200-0606	Bemessung von Starkstromanlagen
TGL 200-0608	Stromrichteranlagen
TGL 200-0611	Geräte in elektrotechnischen Anlagen
TGL 200-0612	Kabel in elektrotechnischen Anlagen
TGL 200-0613	Leitungen in elektrotechnischen Anlagen
TGL 200-0614	Starkstrom-Freileitungen bis 1000 V
TGL 200-0615	Überspannungsschutz in elektrotechnischen Anlagen
TGL 200-0616	Blitzschutz von Bauten und nichtelektrotechnischen Anlagen
TGL 200-0617	Beleuchtung mit künstlichem Licht
TGL 200-0618	Prüfung elektrotechnischer Anlagen
TGL 200-0619	Betreiben elektrotechnischer Anlagen
TGL 200-0621	Elektrotechnische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen
TGL 200-0622	Elektrotechnische Anlagen in explosivstoffgefährdeten Räumen
TGL 200-0624	Elektrotechnische Anlagen in medizinisch genutzten Räumen
TGL 200-0625	Elektrotechnische Anlagen in feuergefährdeten Räumen
TGL 200-0628	Elektrotechnische Anlagen in gesellschaftlichen Bauten
TGL 200-0629	Elektrotechnische Anlagen in der Landwirtschaft
TGL 200-0630	Elektrotechnische Anlagen in zerlegbaren und fahrbaren Bauten mit Nennspannungen bis 1000 V Ws und 1500 V Gs
TGL 200-0632	Elektrotechnische Anlagen für Bahnen
TGL 200-0633	Elektrotechnische Anlagen von Hebezeugen
TGL 200-0634	Elektrotechnische Anlagen für Aufzüge
TGL 200-0635	Elektrotechnische Anlagen für ortsveränderlichen Einsatz
TGL 200-0636	Elektrotechnische Anlagen, Notbeleuchtungsanlagen
TGL 200-0641	Elektrotechnische Anlagen im Bergbau unter Tage
TGL 200-0642	Elektrotechnische Anlagen auf Tagebaugeräten und Gurtbandanlagen im Tagebau und in tagebauähnlichen Betrieben
TGL 200-0643	Elektrotechnische Anlagen auf Baustellen
TGL 200-0644	Elektrotechnische Anlagen in Prüfanlagen
TGL 200-0645	Elektrotechnische Anlagen, fabrikfertige Baueinheiten
TGL 200-0652	Leuchtröhrenanlagen
TGL 200-0653	Akkumulatorenanlagen
TGL 200-0655	Elektrotechnische Ausrüstungen für Bearbeitungs- und Verarbeitungsmaschinen

Rundfunk- und Fernseh-Anlagen

TGL 8838	Elektrische Nachrichtentechnik, Fernseh-Rundfunkempfänger für Schwarz-Weiß-Fernseh-Rundfunksendungen
TGL 14984	Fernsehtechnik
TGL 200-7035	Antennenanlagen
TGL 200-7047	Fernsehantennenarten
TGL 200-7051/02/03	Sicherheitsforderungen für Antennenanlagen

Fernsprech- und Schreibanlagen

TGL 19501	Fernmeldegeräte
TGL 31896	Fernsprechvermittlungseinrichtungen
TGL 36509	Wechselsprechanlagen
TGL 200-0044	Elektrische Informationstechnik

Feuermelde- und Uhrenanlagen

TGL 200-7099	Drahtgebundene elektrische Informationsanlagen zum Schutze von Leben und Sachwerten
TGL 0-14651	Feuermelder in Räumen
TGL 0-14653	Feuermelder im Freien
TGL 20314	Elektrische Uhrenanlagen
TGL 200-3768	Elektrische Schaltuhren

1.5. Technisches Zeichnen

Das technische Zeichnen stellt ein wichtiges Teilgebiet des Einheitlichen Systems der Konstruktionsdokumentation (ESKD) dar. Grundlage dieses Systems sind aufeinander abgestimmte RGW-Standards, die durch Einführung in das Standardwerk der DDR und zum Teil durch ergänzende (nicht abweichende) Festlegungen wirksam werden.

1.5.1. Papierformate (nach TGL 0-476)

Es werden zwei *Formatarten* unterschieden:

a) Grundformate, b) Streifenformate.

Die *Grundformate* gibt es in drei *Formatreihen*, die mit den Buchstaben A, B und C bezeichnet werden. Für die technische Zeichnung werden die Formate der Reihe A verwendet. Die Reihen B und C sind Zusatzreihen und gelten für abhängige Größen, z. B. Mappen, Aktendeckel. Die Formate innerhalb der Reihe entstehen durch Verdoppeln oder Halbieren des jeweiligen benachbarten Formates. Die gebräuchlichsten Grundformate der Reihen A, B und C sind in den Tabellen 1.50 und 1.51 dargestellt. Durch Langhälften, Vierteln und Achteln der Grundformate erhält man die *Streifenformate*.

Tabelle 1.50: Grundformat A und Blattgrößen

Kurzzeichen	Beschnittene Zeichnung u. beschnittene Lichtpause (Fertigblatt) mm × mm	Zeichenfläche mm × mm	Unbeschnittenes Blatt Kleinstmaße mm × mm
A 0	841 × 1189	831 × 1179	857 × 1205
A 1	594 × 841	584 × 831	610 × 857
A 2	420 × 594	410 × 584	436 × 610
A 3	297 × 420	287 × 410	313 × 436
A 4	210 × 297	200 × 287	226 × 313
A 5[1])	148 × 210	138 × 200	164 × 226

[1]) im RGW nicht üblich

Tabelle 1.51: Grundformate B und C

Reihe B		Reihe C	
Kurzzeichen	Breite × Höhe mm × mm (Fertigblatt)	Kurzzeichen	Breite × Höhe mm × mm (Fertigblatt)
B 0	1000 × 1414	C 0	917 × 1297
B 1	707 × 1000	C 1	648 × 917
B 2	500 × 707	C 2	458 × 648
B 3	353 × 500	C 3	324 × 458
B 4	250 × 353	C 4	229 × 324
B 5	176 × 250	C 5	162 × 229

Tabelle 1.52: Schriftgrößen

Kenngröße		Kennwert						
Nennhöhe h		2,5	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0	20,0
Strichbreite s	Mittelschrift $s \triangleq 1/10\,h$	0,25	0,35	0,50	0,70	1,0	1,4	2,0
	Engschrift $s = 1/14\,h$	0,18	0,25	0,35	0,50	0,70	1,0	1,4

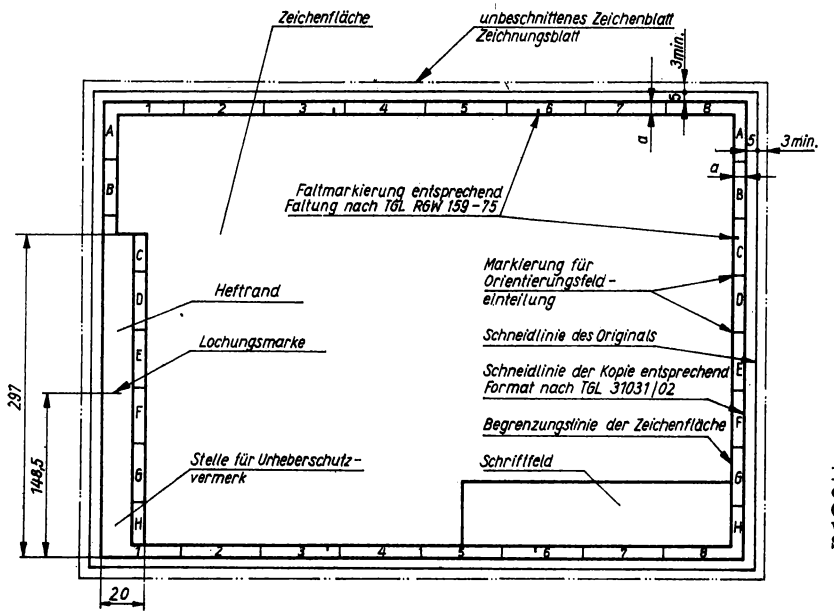


Bild 1.46. Zeichnungsblatt der Größe A 2 (Standard TGL 31031/02 wurde ersetzt durch ST RGW 1181-78)

1.5.2. Blattgrößen

Die Blattgrößen gelten für alle Arten von technischen Zeichnungen, auch für gedruckte Maßskizzen, gedruckte Zeichnungen sowie für Zeichnungsvordrucke (Tabelle 1.50). Die Zeichnungsvordrucke sind nach TGL 31031/01 auszuführen; in diesem Standard sind auch die Lage des Schriftfeldes, der Heftrand und die Feldeinteilung (Planquadrate) angegeben. Die Blätter aller Größen können in Hoch- oder Querlage verwendet werden. Es ist zulässig, durch Aneinanderreihen gleicher oder benachbarter Blattgrößen lange Blätter herzustellen, z. B. 3 × A 4, 2 × A 3, wie sie insbesondere für Stromlaufschaltpläne in der Elektrotechnik verwendet werden. Bild 1.46 zeigt ein Zeichnungsblatt A 2. Die Abmessungen der Schriftfelder sind bei den Formaten A 0 bis A 2 260 mm × 91 mm und bei A 3 und A 4 185 mm × 65 mm.

1.5.3. Schrift für Zeichnungen (nach TGL 31034/01···05)

Ein Schrifttyp ist durch ein spezifisches Verhältnis zwischen der Nennhöhe h und der Strichbreite s der Schrift festgelegt. Schrifttypen sind: Mittelschrift $h = 10\,s$
Engschrift $h = 14\,s$

Die Nennhöhe und die Strichbreite entsprechend dem Schrifttyp sind nach Tabelle 1.52 auszuwählen.

Beide Schrifttypen können als senkrechte oder als schräge (75°) Schrift ausgeführt werden.
Im Bild 1.47 ist das lateinische Alphabet in schräger Mittelschrift dargestellt.

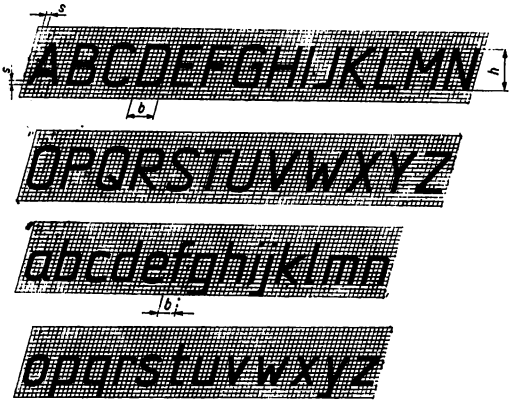


Bild 1.47. Mittelschrift, schräg

Buchstabenabstand

- bei parallelen Linien benachbarter Buchstaben $\geqq 2\,s$
- bei nichtparallelen Linien benachbarter Buchstaben $\geqq s$
- bei benachbarten Ziffern $\geqq 2\,s$.

Wortabstand

- bei parallelen Linien $\geqq 7\,s$
- bei nichtparallelen Linien $\geqq 6\,s$.

1.5.4. Maßstäbe

Die auf technischen Zeichnungen anzuwendenden *Maßstäbe* sind in der Tabelle 1.53 zusammengestellt.
Die in der Hauptreihe angegebenen Maßstäbe sind bevorzugt anzuwenden.
Maßstäbe der Nebenreihe dürfen nur für Zeichnungen, deren Maßstab durch die Anwendung reprografischer Verfahren verändert wurde, und für Zeichnungen, für die die Fußnoten zu Tabelle 1.53 gelten, angewendet werden.

Tabelle 1.53: Zulässige Maßstäbe

Maßstab	Nebenreihe	Hauptreihe			Nebenreihe
Vergrößerungsmaßstab (*n* ganze Zahl)	—	50:1	10^n:1	—	—
	2,5:1	5:1	10:1	20:1	40:1
	—	—	—	2:1	4:1
Natürliche Größe	—		1:1		—
Verkleinerungsmaßstab (*n* ganze Zahl)	1:4	1:2	—	—	—
	1:40	1:20	1:10	1:5	1:2,5[1])
	1:400	1:200	1:100	1:50	1:25[2]) 1:15[2])
	—	$1:(2 \cdot 10^n)$	$1:10^n$	$1:(5 \cdot 10^n)$	$1:(2{,}5 \cdot 10^n)$

[1]) seit 1. 1. 1981 nicht mehr zulässig
[2]) für technische Zeichnungen von Industrieanlagen zulässig
[3]) für technische Zeichnungen von Industrieanlagen und im Schiffbau zulässig

Der Maßstab der Hauptdarstellungen ist in dem dafür vorgesehenen Feld des Schriftfeldes der Zeichnung ohne Buchstabenangabe in der Art 1:1; 1:2 zu bezeichnen.
Die Maßstäbe von Darstellungen, die sich von dem im Schriftfeld der Zeichnung angegebenen Maßstab unterscheiden, sind über den zugehörigen Darstellungen mit dem Buchstaben »M« in der Art M 1:1; M 1:2 zu bezeichnen.

1.5.5. Schraffuren

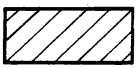
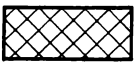
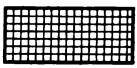
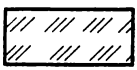
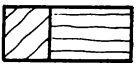
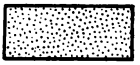
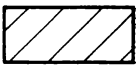
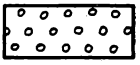
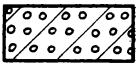
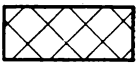
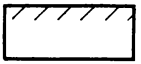
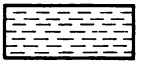
Schnittflächen sind i. allg. ohne Rücksicht auf den Werkstoff nur mit dünnen Vollinien möglichst unter 45° zur Achse oder zu den Hauptumrissen zu schraffieren.
Für die Ausführung von Schnittdarstellungen gilt TGL 9727/01 (s. Tabelle 1.54).
Nur wenn besondere Notwendigkeit vorliegt, sind diese Schraffuren anzuwenden, die aber die genaue Werkstoffangabe[1]) auf der Zeichnung oder anderen Fertigungsunterlagen nicht ersetzen.

1.5.6. Linienarten, Linienbreiten

Unter Berücksichtigung des maschinellen Zeichnens und der Möglichkeit der Mikroverfilmung und Rückvergrößerung von Zeichnungen sind nur die in Tabelle 1.55 angegebenen Linienarten zulässig.

[1]) Die Abkürzungen der Werkstoffbezeichnungen sind den entsprechenden DDR-Standards zu entnehmen.

Tabelle 1.54: Schraffuren

Werkstoff	Art der Darstellung
Metallische Werkstoffe (z. B. Stahl, Stahlguß, Grauguß, Kupfer, Bronze, Messing, Zink, Leichtmetall)	
Nichtmetallische Werkstoffe (z. B. Filz, Fiber, Gummi, Leder, Preßstoff, Füllstoff)	
Elektrische Wicklungen	
Durchsichtige und durchscheinende Werkstoffe (z. B. Glas, Zellon, Zelluloid)	
Optisches Glas	
Holz (Hirnholz, Längsholz)	
Gesinterte Werkstoffe	
Marmor, Schiefer, Porzellan	
Ziegelmauerwerk[1])	
Unbewehrter Beton	
Bewehrter Beton, Stahlbeton	
Schamotte und feuerfeste Steine[1])	
Erdreich	
Flüssigkeiten	

[1]) Der Abstand der Schraffurlinien für Ziegelmauerwerk bzw. Schamotte und feuerfeste Steine ist gegenüber den Schraffurlinien für metallische Werkstoffe bzw. nichtmetallische Werkstoffe größer zu wählen.
Der Abstand der Schraffurlinien, Striche, Kreise und Punkte ist der Schnittflächengröße anzupassen und soll so groß wie möglich sein.

Die Linienbreite ist nach Tabelle 1.56 auszuwählen. Für große Darstellungen sind breite, für komplizierte oder kleine Darstellungen sind schmale Linien zu wählen. Für Darstellungen auf einer Zeichnung, die im gleichen Maßstab ausgeführt werden, sind Linienbreiten einer Gruppe anzuwenden. Dabei ist gleichzeitig die Mikroverfilmung und Rückvergrößerung zu berücksichtigen.

Tabelle 1.55: Linienarten

Benennung	Darstellung	Beschreibung
Vollinie	———	ununterbrochene Linie mit regelmäßiger Form
Strichlinie	– – – – – –	unterbrochene Linie mit sich wiederholenden gleichen Elementen mit regelmäßiger Form
Punktlinie	· · · · · ·	
Strichpunktlinie	——·——·——	unterbrochene Linie mit sich wiederholenden verschiedenen Elementen mit regelmäßiger Form
Strichpunktpunktlinie	——··——·——	
Linie mit Zeichen, Ziffern oder Buchstaben	——x——x——	
Linie mit Zickzack	——/\/\——	ununterbrochene Linie mit sich wiederholenden gleichen Elementen
Freihandlinie	——~——	ununterbrochene Linie mit unregelmäßiger Form

Tabelle 1.56: Linienbreiten

Abbildungsverhältnis	Typ der Stufung	Liniengruppe Linienbreite s in mm								Kurzzeichen
		0,18	0,25	0,35	0,5	0,7	1,0	1,4	2,0	
1:1	Typ A	0,18	0,25	–	0,5	–	1,0	–	–	A 0,18
1:1,4		–	0,25	0,35	–	0,7	–	1,4	–	A 0,25
1:2		–	–	0,35	0,5	–	1,0	–	2,0	A 0,35
1:2,8		–	–	–	0,5	0,7	–	1.4	–	A 0,5
1:1	Typ B	0,18	0,25	0,35	–	0,7	–	–	–	B 0,18
1:1,4		–	0,25	0,35	0,5	–	1,0	–	–	B 0,25
1:2		–	–	0,35	0,5	0,7	–	1,4	–	B 0,35
1:2,8		–	–	–	0,5	0,7	1,0	–	2,0	B 0,5
1:1	Typ C	0,18	–	0,35	0,5	0,7	–	–	–	C 0,18
1:1,4		–	0,25	–	0,5	0,7	–	–	–	C 0,25
1:2		–	–	0,35	–	0,7	1,0	1,4	–	C 0,35
1:2,8		–	–	–	0,5	–	1,0	1,4	2,0	C 0,5

Beispiel: Von einer Zeichnung im Format A 2 soll nach Mikroverfilmung eine Rückvergrößerung im Format A 4, also um 2 Stufen kleiner, angefertigt werden. Weil die Mindestlinienbreite von 0,18 mm auf der Rückvergrößerung nach Tabelle 1.56 nicht unterschritten werden darf, ist auf der Originalzeichnung die Linienbreite um 2 Stufen größer, also 0,35 mm, oder größer zu wählen.

1.5.7. Oberflächenrauheit (nach TGL 31050)

Die Angabe der Oberflächenrauheit bezieht sich auf den in der technischen Zeichnung dargestellten Zustand des Teiles. Die Oberflächenrauheit ist nur anzugeben, wenn es funktionell oder aus technischen Gründen notwendig ist. Dazu ist eines der nachfolgenden Grundsymbole mit Rauheitskenngröße und Zahlenwert zu verwenden:



wenn Fertigungsverfahren freigestellt ist,



wenn Oberflächenrauheit durch Trennen vorgeschrieben ist,



wenn für Oberflächenrauheit ein Fertigungsverfahren außer Trennen vorgeschrieben ist.

Eine Querlinie am rechten oberen Ende des Grundsymbols ist einzutragen, wenn es die Angaben erfordern (Bild 1.48).

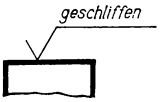


Bild 1.48. Grundsymbol der Oberflächenrauheit mit Querlinie bei Wertangabe

Eintragungen am Symbol haben nach Bild 1.49 zu erfolgen. Hinter der Rauheitskenngröße R_z (mittlere Rauheit) ist der maximal zulässige Zahlenwert in Mikrometer (µm) anzugeben [Bild 1.50a)]. Bei Verwendung der Rauheitskenngröße R_a (arithmetische Mittenrauheit) ist das Kurzzeichen nicht anzuwenden [Bild 1.50b)].

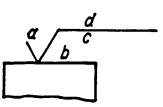


Bild 1.49. Mögliche Eintragungen am Grundsymbol der Oberflächenrauheit mit Querlinie
a Rauheitskenngröße mit Zahlenwert, b Bearbeitungsspuren, c Rauheitsbezugsstrecke, d Fertigungsverfahren

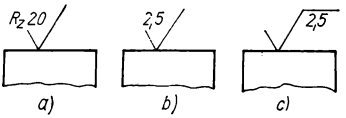


Bild 1.50. Eintragungen am Grundsymbol der Oberflächenrauheit mit

a) Rauheitskenngröße R_z mit Zahlenwert, b) Angabe der Rauheitskenngröße R_a (nur Zahlenwert), c) Angabe der Rauheitsbezugsstrecke

Für die vorherrschende Richtung der Bearbeitungsspuren sind nachfolgende Symbole zu verwenden:

= parallel zur gekennzeichneten Fläche
⊥ senkrecht zur gekennzeichneten Fläche
× gekreuzt, geneigt zur gekennzeichneten Fläche
M in mehreren Richtungen
C kreisförmig, bezogen auf die Mitte der gekennzeichneten Fläche (konzentrisch)
R ungefähr radial zur Mitte der gekennzeichneten Fläche

Der Zahlenwert der Rauheitsbezugsstrecke ist in Millimeter nach dem Beispiel in Bild 1.50c) anzugeben.
Bei vorgeschriebenen Fertigungsverfahren ist dieses nach Bild 1.48 anzugeben.

1.5.8. Grundsätzliches zur Darstellung (nach TGL 9727/01)

Die Gegenstände sind projektionsgerecht im bestgeeigneten Maßstab darzustellen (Bild 1.51).
Die Form von Teilen ist durch die Darstellung – ggf. in Verbindung mit der Bemaßung – eindeutig auszuweisen. Nach Möglichkeit soll die Darstellung in Form von Ansichten erfolgen (Bild 1.52). Verdeckt liegende Körperkanten sind im Bedarfsfall durch eine Schnittdarstellung sichtbar zu machen (Bild 1.53).
Darzustellen ist im Regelfall der Endzustand eines Teiles, das ist der Zustand, in dem es dem Zusammenbau zugeführt wird.

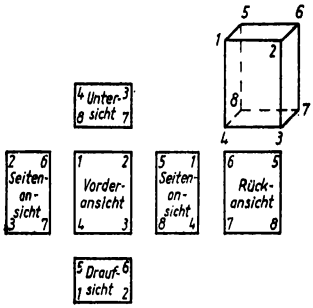


Bild 1.51. Mögliche Ansichten eines Gegenstandes

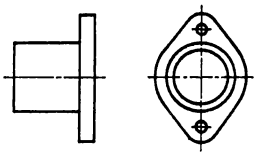


Bild 1.52. Darstellung in Form von Ansichten

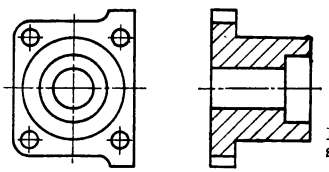


Bild 1.53. Schnittdarstellung mit Schraffur

In begründeten Fällen kann der Ausgangszustand (z. B. das Rohteil) gesondert dargestellt werden, dabei ist eine besondere Zeichnung vorzusehen. Drehteile sind in der Fertigungslage, sonstige Teile und zusammengebaute Gegenstände in Gebrauchslage darzustellen, z. B. liegend gebrauchte Teile werden parallel zum Schriftfeld dargestellt.

1.5.8.1. Ansichten

Als *Vorderansicht* ist die Ansicht zu wählen, die am aussagekräftigsten ist. Dieser sind die weiteren notwendigen Ansichten zuzuordnen. Eine Bezeichnung der Ansichten erfolgt im Regelfall nicht. Die *sichtbaren Körperkanten* sind durch dicke Vollinien darzustellen (Bild 1.52). *Verdeckt liegende Kanten, Ausnehmungen, Bohrungen* usw. sind im Regelfall nicht darzustellen, für im Ausnahmefall dargestellte unsichtbare Körperkanten sind Strichlinien anzuwenden. Projektionsgerecht dargestellte, aber *nicht in Blickrichtung liegende Ansichten* können bei nachträglicher Änderung gelegentlich aus Platzmangel notwendig sein. Die Blickrichtung ist durch einen Pfeil und einen Großbuchstaben vom Ende des Alphabets anzugeben (Bild 1.54).

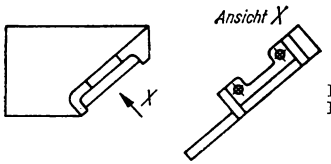


Bild 1.54. Abweichende Lage einer Ansicht

Durchgangslöcher gelten als solche ausgewiesen, wenn sie als Kreise erscheinen (Bild 1.52).
Bei sichtbaren drehsymmetrischen oder sonst symmetrischen Formen ist auf die *Symmetrie* durch eine dünne Strichpunktlinie (Mittellinie) oder ein Mittellinienkreuz aus dünnen Strichpunktlinien hinzuweisen (Bild 1.52). Symmetrische Teile dürfen zwecks Platzeinsparung nur zur Hälfte dargestellt werden, auf die Symmetrie ist durch zwei kurze dünne Vollinien an den Enden der Symmetrielinie hinzuweisen.

Lange Gegenstände beliebigen Querschnitts können zur Platzeinsparung abgebrochen gedacht dargestellt werden, wenn die an der einen Bruchstelle liegende Form ohne Unterbrechung bis zu der anderen Bruchstelle weiterläuft. Die *Bruchstelle* wird durch Freihandlinien gekennzeichnet. Bild 1.55 zeigt die Bruchstelle eines metallischen Gegenstandes und Bild 1.56 die

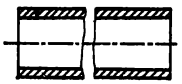


Bild 1.55. Bruchdarstellung eines Metallteiles



Bild 1.56. Bruchdarstellung eines Holzteiles

Bruchstelle von Holz. Bei kurzen runden Körpern mit großem Durchmesser ist nur eine nahe bei der Mittellinie und parallel zu dieser laufende Freihandlinie anzuwenden.
Kleine Formen, die im gewählten Maßstab nicht deutlich genug erscheinen, sind in einer Nebendarstellung als »*Einzelheit*« in einem geeigneten Maßstab, herausgebrochen gedacht, vergrößert zu zeichnen. Die Einzelheit wird im Gesamtbild durch eine dünne Strichpunktlinie und einen Großbuchstaben vom

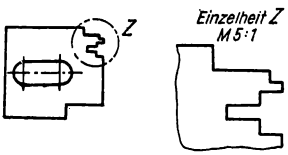


Bild 1.57. Darstellung einer Einzelheit

Ende des Alphabets gekennzeichnet. In der Nebendarstellung sind ebenfalls der Großbuchstabe und der Maßstab anzugeben (Bild 1.57).
Verdeckt liegende Formen, die Tiefe von Sacklöchern, Ausnehmungen usw. sind im Bedarfsfall durch ein gedachtes örtliches Aufbrechen des Gegenstands sichtbar zu machen, wenn dies zweckmäßiger als eine Schnittdarstellung ist oder die Anschaulichkeit der Darstellung dadurch gewinnt (Bild 1.69).

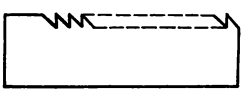


Bild 1.58. Darstellung wiederkehrender Formen

Bei am gleichen Teil *häufig wiederkehrenden*, auf einer Geraden oder einem Kreis liegenden *gleichen Formen* brauchen nur die ersten und letzten Formen gezeichnet zu werden. Die nicht gezeichneten Formen sind durch Strichlinien anzudeuten (Bild 1.58).

1.5.8.2. Schnitte

Ein *Schnitt* ist das gedachte Zerlegen eines Gegenstands durch eine oder mehrere Ebenen rechtwinklig zur Zeichenfläche. Schnitte sind anzuwenden, um im Bedarfsfall die in Ansichtsdarstellung verdeckt liegenden Formen zu zeigen.
Die *Schnittfläche* ist projektionsgerecht darzustellen, die hinter dieser liegenden sichtbaren Kanten und Formen sind in Ansicht zu zeichnen. Die Umrisse der Schnittflächen sind durch dicke Vollinien darzustellen, die Schnittflächen sind durch *Schraffur* (s. Abschnitt 1.5.5.) zu kennzeichnen (Bild 1.53).

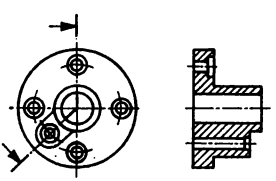


Bild 1.59. Schnittverlauf ohne Buchstabenangabe

Die der gedachten Schnittebene zugeordnete *Schnittlinie* kann eine gerade oder eine gebrochene Linie sein. Sie kann örtlich kreisförmig verlaufen. Gerade Schnittlinien sind nicht zu kennzeichnen, wenn ihr Verlauf in Anbetracht der Schnittdarstellung offensichtlich ist (Bild 1.58). Eine Kennzeichnung muß erfolgen, wenn andernfalls eine falsche Deutung möglich wäre. Dabei ist die Schnittlinie durch eine dünne Strichpunktlinie, die an den Enden kurze dicke Striche trägt, anzudeuten. Die Projektionsrichtung ist durch je einen Pfeil in der Mitte der kurzen dicken Striche auszuweisen (Bild 1.59).
Die Schnittlinie ist durch gleiche Großbuchstaben in unmittelbarer Nähe der Pfeile zu bezeichnen, wenn andernfalls eine falsche Deutung oder Verwechslungen möglich wären (Bild 1.60).
Schnittlinien mit mehreren Knicken sind außer an den Enden auch an den Knickstellen mit gleichen Großbuchstaben zu bezeichnen, wenn bei Nichtbezeichnung eine falsche Deutung möglich wäre (Bild 1.60). Bei schräg liegenden Schnittlinien und

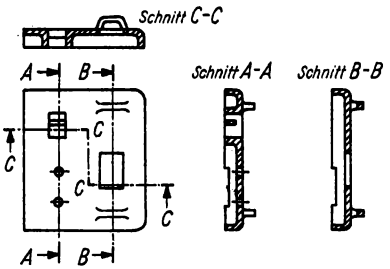


Bild 1.60. Schnittverläufe mit Buchstabenangabe

an den Knickstellen gebrochener Schnittlinien haben die Buchstaben immer die gleiche Stellung zur Schnittlinie.
In der Schnittebene liegende Speichen, Rippen, Schrauben, Bolzen, Niete werden, wenn ihre Längsachse in der Schnittebene liegt, ungeschnitten dargestellt (Bild 1.61).

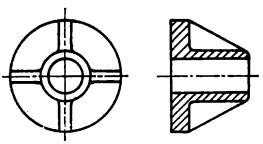


Bild 1.61. Speichen, Rippen usw. im Schnitt

1.5.9. Maßeintragung (nach TGL 9727/03)

1.5.9.1. Allgemeines

Die Zeichnung enthält, je nach dem Zweck, für den sie bestimmt ist, die *Maße des jeweiligen Endzustands* des dargestellten Teiles.
Zur Maßeintragung werden benutzt: *Maßlinien, Maßhilfslinien, Maßpfeile, Maßzahlen.*
Für das Eintragen der Maße sind vorwiegend folgende Gesichtspunkte maßgebend: Herstellung, Funktion und Prüfung des Teiles.

1.5.9.2. Maßlinien, Maßhilfslinien

Maßlinien dienen zur Angabe der Abmessungen. Die Maßlinien werden i. allg. rechtwinklig zwischen den Körperkanten (sichtbare Kanten des dargestellten Teils) oder parallel zu der anzugebenden Abmessung angeordnet (Bild 1.62). Maßlinien dürfen nicht unterbrochen werden. Sie gehören zu den dünnsten Linien einer Liniengruppe (s. TGL 1178).
Mittellinien und Körperkanten dürfen nicht als Maßlinien benutzt werden. Die Maßlinien müssen mindestens 8 mm entfernt von den Körperkanten liegen; parallele Maßlinien müssen voneinander einen genügend großen und möglichst gleichmäßigen Abstand von mindestens 5 mm haben.
Bei *Bogen-* und bei *Winkelmaßen* ist die Maßlinie ein zum Mittelpunkt des Kreises oder zum Scheitelpunkt des Winkels konzentrisch liegender Kreisbogen (Bild 1.63; s. a. Abschnitt Bogenmaße). Sehnenmaße sind nach Bild 1.63 c) einzutragen.

Bild 1.62. Maßlinien

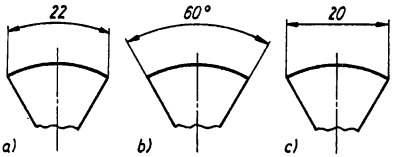


Bild 1.63. a) Bogen-, b) Winkel- und c) Sehnenmaß

Maße, die nicht zwischen den Körperkanten eingetragen werden können, z. B. wenn dadurch die Übersicht leiden würde, werden mittels *Maßhilfslinien* herausgezogen (Bild 1.64). Maßhilfslinien und Maßlinien müssen gleiche Dicke haben (s. TGL 1178).
Die Maßhilfslinien beginnen unmittelbar an den Körperkanten. Sie stehen i. allg. rechtwinklig zur Maßlinie und gehen 1···2 mm über diese hinaus.
Die *Maßzahlen sind über die Maßlinien* zu setzen (s. Abschnitt Maßzahlen). Ist der Platz für das Eintragen der Maßzahlen zu

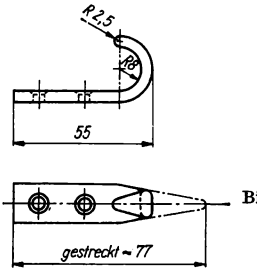


Bild 1.64. Gestreckte Länge

gering, so dürfen die Maßlinien nach außen über die Maßhilfslinien herausgezogen werden. Bei herausgezogenen Maßlinien ist die Maßzahl zwischen die Maßpfeilspitzen (Bild 1.62) oder seitlich über die Maßlinie zu setzen (Maß 1 in Bild 1.65).
Ist bei gebogenen Teilen die gestreckte Länge einzutragen, so ist die Maßeintragung nach Bild 1.64 vorzunehmen. Statt »gestreckte Länge« zu zeichnen, kann sie über dem Schriftfeld der Zeichnung angegeben werden.

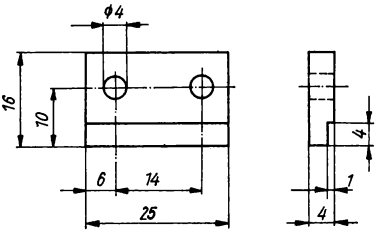


Bild 1.65. Herausgezogene Maßlinien

Mittellinien können als *Maßhilfslinien* benutzt werden. Außerhalb der Körperkanten sind sie dann als dünne Vollinien auszuziehen (Bild 1.65). Maßhilfslinien und Mittellinien dürfen nicht von einer Ansicht nach der anderen durchgezogen und auch nicht für ein Maß aus verschiedenen Ansichten herausgezogen werden.

1.5.9.3. Maßpfeile

Die Enden der Maßlinien sind durch Maßpfeile zu kennzeichnen, deren Länge etwa der fünffachen Strichdicke der Körperkanten entspricht (Bild 1.66). Die Schenkel der Maßpfeile schließen einen Winkel von etwa 15° ein; der Zwischenraum ist in Tusche auszufüllen.

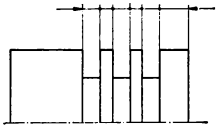


Bild 1.66. Maßkette

Ist zwischen den Körperkanten oder Maßhilfslinien nicht genügend Platz für die Maßpfeile, dann sind diese nach Bild 1.62 einzutragen.
Ist für Maßpfeile kein Platz vorhanden, so können sie durch Punkte ersetzt werden (Bild 1.66). Maßlinien für Halbmesser (Bild 1.70) und gekürzte Maßlinien für Durchmesser erhalten nur einen Maßpfeil am Kreisbogen oder an seiner Projektion (s. Abschnitte 1.5.9.5. und 1.5.9.6.).

1.5.9.4. Maßzahlen

Die *Maßzahlen* sind in *schräger Schrift* für Zeichnungen nach TGL 31034/01 in Tusche zu schreiben. Die Maßzahlen sind *über die Maßlinien* zu setzen (Ausnahmen s. Bild 1.80). Sie dürfen durch Linien nicht getrennt oder gekreuzt werden. Sie dürfen auch nicht auf Körperkanten, Mittellinien und auf Schnittpunkten von Linien stehen, möglichst auch nicht innerhalb der schraffierten Winkelflächen von 30° (Bilder 1.67 und 1.68).
Die *Stellung der Maßzahlen* ist von der Maßlinienrichtung abhängig (Bilder 1.67 und 1.68). Um das Ablesen der Maße zu erleichtern, sind die Maßzahlen und Winkelangaben einer Zeichnung so einzutragen, daß sie *von unten oder von rechts lesbar* sind, wenn die Zeichnung in ihrer Gebrauchslage (s. Abschnitt 1.5.9.11.) gehalten wird. Sind Maße oder Winkelangaben in den in Bild 1.67 und Bild 1.68 schraffiert angedeuteten Flächen nicht zu vermeiden, so müssen sie von links her lesbar sein (Bilder 1.67 und 1.68). Winkelangaben dürfen horizontal geschrieben werden, wenn das die Übersichtlichkeit erhöht.
Die *Maßzahlen* sollen in Fertigungszeichnungen nicht kleiner als 3 mm sein; gleiche Größe innerhalb einer Darstellung ist anzustreben. Zusätze zur Maßzahl, z. B. »Kugel« (Bild 1.72), sind etwas kleiner, aber nicht kleiner als 2 mm zu schreiben.

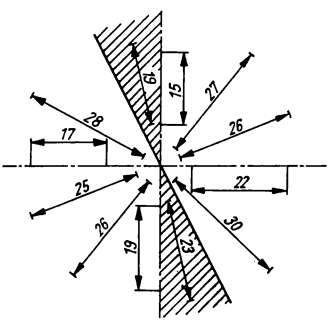


Bild 1.67. Radiale Maßeintragung

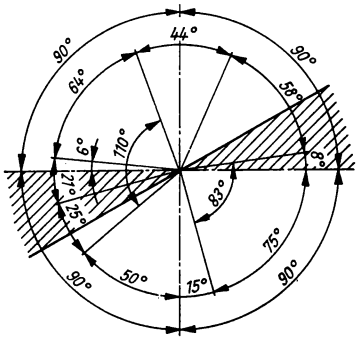


Bild 1.68. Tangentiale Maßeintragung

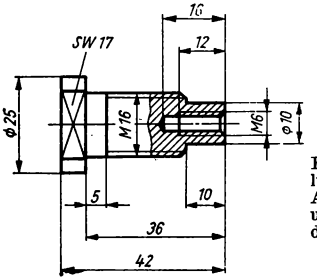


Bild 1.69. Bruchdarstellung bei verdeckten Aussparungen und Kennzeichnung der Schlüsselweite (SW)

Alle Maßzahlen einer Zeichnung sind auf die *gleiche Maßeinheit* zu beziehen, z. B. mm. Wird hiervon abgewichen, so müssen hinter den betreffenden Maßzahlen die abweichenden Einheiten, z. B. µm, m, angegeben werden.
An Stelle von Maßzahlen können auch *Maßbuchstaben* benutzt werden; hierfür sind Kleinbuchstaben (schräge Schrift für Zeichnungen nach TGL 31034/01) anzuwenden (Schriftgröße wie bei Maßzahlen). Die Zahlenwerte für die Buchstaben werden in einer Tabelle zusammengefaßt. Die Zeichnung und die Maße müssen hierbei klar und übersichtlich lesbar bleiben. Anderenfalls sind die Teile einzeln zu zeichnen.
Maßzahlen für *nicht maßstäblich gezeichnete Abmessungen* müssen unterstrichen werden, jedoch nicht bei unterbrochen gezeichneten Teilen (z. B. Bild 1.79).
Maße, die z. B. vom Besteller auf Grund besonderer Vereinbarungen besonders geprüft werden, sind durch Einrahmen zu kennzeichnen (Strichdicke wie bei Maßlinie). In der Zeichnung ist über dem Schriftfeld beispielsweise zu vermerken: »Die ○ Maße werden vom Besteller besonders geprüft«.
Kreise als Einrahmung sind unzulässig.

1.5.9.5. Halbmesser

Halbmesser erhalten nur einen Maßpfeil am Kreisbogen. Bei Halbmessern wird der Mittelpunkt i. allg. durch ein Mittellinienkreuz, einen kleinen Kreis oder Punkt gekennzeichnet (Bild 1.70). Der Maßpfeil ist möglichst von innen, bei Platzmangel von außen an den Kreisbogen zu ziehen. Hierbei ist bei Mittelpunktskennzeichnung die Maßlinie bis zum Mittelpunkt durchzuziehen. Die Maßzahlen sind, wie in Abschnitt 1.5.9.4. angegeben, einzutragen. *Vor die Maßzahl* ist in jedem Falle *ein »R«* zu setzen.

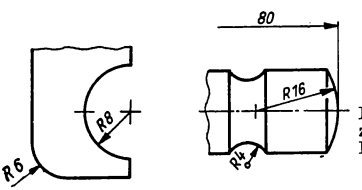


Bild 1.70. Kennzeichnung von Halbmessern

1.5.9.6. Durchmesserzeichen

Das Durchmesserzeichen ⌀ kennzeichnet die Kreisform; es ist *für jedes Durchmessermaß* anzuwenden und wird *vor die Maßzahl* gesetzt.
Beim Durchmesserzeichen ist der Kreisdurchmesser gleich $^5/_7$ der Maßzahlgröße, der Kreismittelpunkt liegt etwa in der Mitte der Maßzahlhöhe. Der gerade, unter ≈ 75° zur Waagerechten geneigte Strich geht durch den Kreismittelpunkt. Die Strichdicke ist gleich der der Maßzahlen (Bild 1.69).

1.5.9.7. Quadratzeichen, Diagonalkreuz

Das *Quadratzeichen* □ kennzeichnet die quadratische Form (Bild 1.71), wenn diese aus der Ansicht, in der das Quadratmaß steht, nicht ersichtlich ist.
Beim Quadratzeichen ist die Größe des Quadrats gleich $^5/_7$ der Maßzahlgröße; die Strichdicke ist gleich der der Maßzahlen. Das Quadratzeichen ist *vor die Maßzahl* zu setzen. Die Mitte des Quadrats liegt etwa in der Mitte der Maßzahlhöhe.

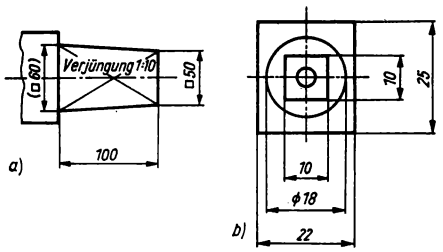


Bild 1.71. Darstellung quadratischer Formen
a) bei unsichtbarer, b) bei sichtbarer Form

Zu bevorzugen ist die Darstellung, bei der die Maße der Quadratform in einer Ansicht für zwei aneinanderstoßende Flächen eingetragen sind (Bild 1.71 b).

1.5.9.8. Kugel

Bei Kugelformen ist dem Durchmesser- oder Halbmesserzeichen das Wort »*Kugel*« voranzustellen (Bild 1.72).
Schriftgrößen s. Abschnitt 1.5.9.4. Bei der Bemaßung von Linsenkuppen, z. B. bei Schrauben- und Stangenenden, fällt die Angabe »Kugel« weg (Bild 1.72).

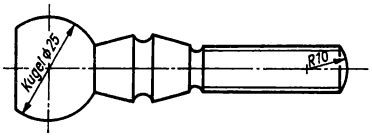


Bild 1.72. Darstellung einer Kugelform

1.5.9.9. Kegel, Verjüngung, Neigung

Die Grundlagen für die Angabe von Kegel, Verjüngung und Neigung sind im Bild 1.73 zusammenhängend dargestellt.
Die Angabe des Kegels, z. B. Kegel $1:x$ (Bild 1.73), Verjüngung 1:10, ist *parallel zur Mittellinie*, die Angabe der Neigung, z. B. Neigung $1:(D-d)\,2\,l$, dagegen *parallel zur Mantellinie* einzutragen.

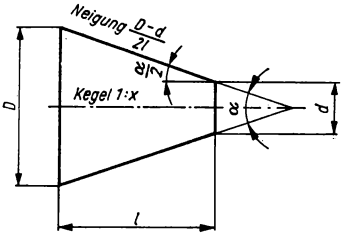


Bild 1.73. Darstellung einer Kegelform

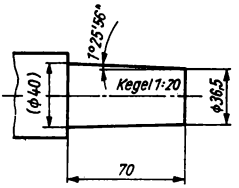


Bild 1.74. Kegelform, Angabe des halben Kegelwinkels

Der Neigungswinkel $\alpha/2$ (halber Kegelwinkel) ist anzugeben, um das Einstellen der Bearbeitungsmaschine zu ermöglichen (Bild 1.74).

1.5.9.10. Nuten

Nuten für Paßfedern und Keile in zylindrischen Wellen und Bohrungen werden nach den Bildern 1.75 und 1.76 bemaßt. In vielen Fällen wird je ein Maß genügen, und zwar bei der Welle die Nut-Tiefe und bei der Bohrung die Summe aus Bohrungsdurchmesser und Nut-Tiefe.

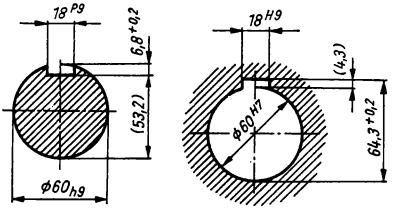


Bild 1.75. Nuten
a) in Wellen, b) in Bohrungen

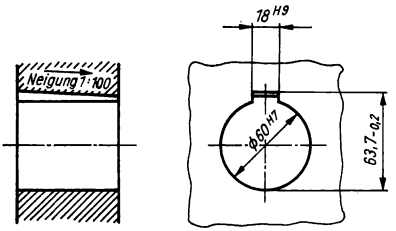


Bild 1.76. Keilnuten

Für *Keilnuten* ist die Richtung der Neigung, die der Anzugsrichtung des Keiles entspricht, durch einen Pfeil anzugeben (Bild 1.76).
In der Draufsicht bei Nuten (auch Langlöchern) genügt die Eintragung der Länge und Breite.

1.5.9.11. Anordnung und Auswahl der Maße

Wird die *Zeichnung in ihrer Gebrauchslage* (vorwiegend die Fertigungslage des Dargestellten) gehalten, so müssen die *Maßzahlen* usw. *von unten und von rechts lesbar* sein (Bild 1.77). Bei *hochgestellten Querformaten* ist das Schriftbild rechts oben. Bei *Hochformaten*, z. B. Größe A 4, bei denen der Gegenstand in der Querlage des Blattes dargestellt ist, müssen in dieser Gebrauchslage der Zeichnung alle Maße von unten und von rechts lesbar sein (Bild 1.77).

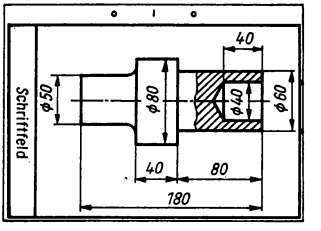


Bild 1.77. Lage der Zeichnung

Bei Angebotszeichnungen, Meßblättern u. dgl., die vorwiegend intern, in Heftern eingeordnet, gebraucht werden, kann von diesen Regeln abgewichen werden.
Jede Maßzahl ist nur einmal einzutragen, und zwar in die Ansicht, welche über die Form des Gegenstands an der Meßstelle den klarsten Aufschluß gibt (Bild 1.78). Maße, die sich bei der Fertigung von selbst ergeben, z. B. bei Durchdringungen,

werden nicht eingetragen. Maße dürfen die Darstellung nicht undeutlich machen. *Doppelte Maßangabe (Überbestimmung) ist zu vermeiden* (Ausnahmen s. Abschnitte 1.5.9.9. und 1.5.9.12.). Bei dicht übereinanderliegenden Maßlinien sollen die Maßzahlen versetzt angeordnet werden, um eine bessere Übersicht zu erreichen.
In Darstellungen zusammengesetzter Erzeugnisse werden für Standardteile, soweit diese ausführlich gezeichnet werden, keine Maße oder aber nur Hauptmaße angegeben.

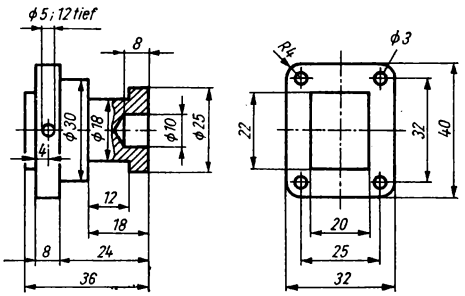


Bild 1.78. Maßeintragung in Ansichten

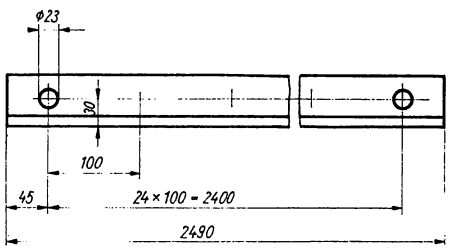


Bild 1.79. Lochteilung

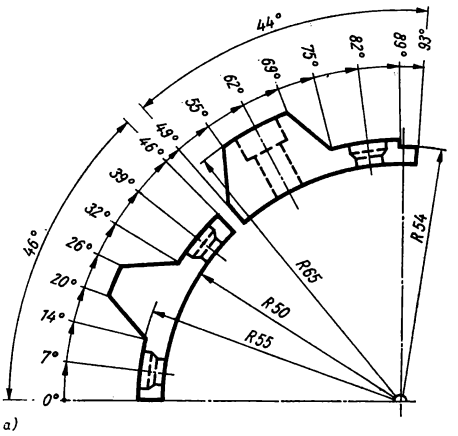
Geschlossene Maßketten sind zu vermeiden (Ausnahme: Kreisteilungen nach Bild 1.80). Ist die Aufteilung einer Länge durch eine Maßkette nicht zu umgehen, so muß aus Rücksicht auf die Summe der zulässigen werkstattüblichen Abweichungen eine Abmessung unbemaßt bleiben (Bild 1.78).

1.5.9.12. Loch- und Kreisteilungen

Bei gleicher *Lochteilung* können längere Maßketten vereinfacht werden. Werkstücke mit vielen gleichen Teilungen und gleichen Lochdurchmessern können nach Bild 1.79 vereinfacht bemaßt werden.
Sind z. B. im Austauschbau nur kleine Abweichungen für Lochabstände zulässig, so können die Maße von einer Bezugsebene aus angeordnet werden. Der Ausgang der Bemaßung wird durch einen Punkt und die Maßzahl 0 gekennzeichnet.
Bei *Gradteilungen*, wie sie z. B. im Schaltgerätebau für Schaltwalzen anzugeben sind, werden, von einer Bezugsebene ausgehend, aneinandergereihte Maße (Bild 1.80a) und geschlossene Maßketten (Bild 1.80b) benutzt. Bei aneinandergereihten Maßen wird der Ausgang der Bemaßung durch einen Punkt und die Maßzahl 0 gekennzeichnet (Bild 1.80a).

1.5.9.13. Bogenmaße

Bei der Eintragung von *Maßen für Bogen mit einem Zentriwinkel* $\alpha < 90°$ werden die Maßhilfslinien parallel zu den Winkelhalbierenden herausgezogen und dazwischen die betreffenden Maßlinien als Bogen gezeichnet (Bild 1.81a). Über die Maßzahl kann ein Bogenstrich gesetzt werden.
Bei *Bogen mit Zentriwinkel* $\alpha > 90°$ werden Maßlinienbogen vom Mittelpunkt des Bogens aus eingetragen; über die Maßzahl ist ein Bogenstrich zu setzen (Bild 1.81b). Diese Art der Maßangabe wird vielfach bei gebogenen Rohren angewendet, um die gestreckte Länge ermitteln zu können, aber auch, um im Bogen auszuschneidende Bleche zu bemaßen. Im Bedarfsfalle wird die Linie, für die das Maß gilt, mit Bezugshaken versehen (Bild 1.81b).



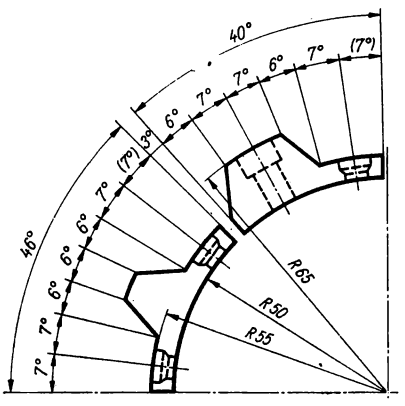


Bild 1.80. Kreisteilung
a) bei aneinandergereihten Maßen, b) bei einer Maßkette

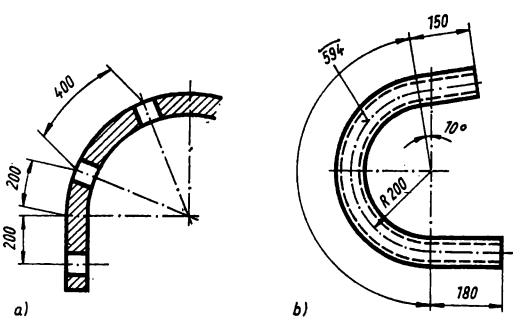


Bild 1.81. Bogenmaße
a) bei $\alpha \leqq 90°$, b) bei $\alpha > 90°$

1.5.9.14. Gewinde

Für *standardisierte Gewinde* sind abgekürzte Bezeichnungen nach TGL 0-202 anzuwenden (Bild 1.82). Zu beachten ist, daß *Linksgewinde* durch den Zusatz »links« zum Kurzzeichen gekennzeichnet werden. Das Fertigungsverfahren kann angegeben werden, es ist dem Kurzzeichen anzufügen.

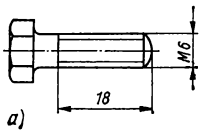
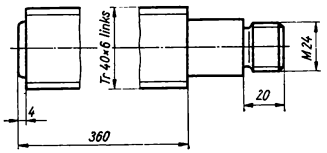


Bild 1.82. Gewindedarstellung
a) Schraube, b) Bolzen



Sonst gleiche Rechts- und Linksgewinde an demselben Teil werden nach Bild 1.83 zusätzlich mit »rechts« bzw. »links« hinter den abgekürzten Bezeichnungen gekennzeichnet.
Gewindeenden sind wie Schraubenenden so zu bemaßen, daß die Kuppe innerhalb der Gewindelänge liegt (Bild 1.84). Werkstattübliche Phasen bis auf den Kerndurchmesser werden im Regelfall nicht bemaßt.

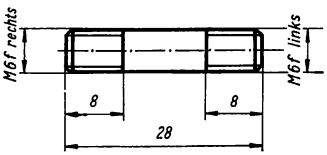


Bild 1.83. Links- und Rechtsgewinde an einem Teil

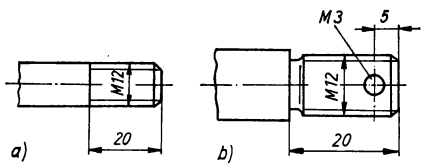


Bild 1.84. Gewindeenden
a) ohne Rille, b) mit Rille und Splintloch

Bemaßung von *Gewinderillen* nach TGL RGW 214-75 (Bild 1.85), *Gewindelängen, Gewindeauslauf* (nach TGL RGW 214-75). Grundsätzlich ist zu beachten, daß die Längenangaben für Außen- und Innengewinde stets für die *nutzbare Gewindelänge* gelten. Der Gewindeauslauf wird auf der Zeichnung i. allg. nicht angegeben.
Gewindesacklöcher für geschnittene Gewinde werden i. allg. nach Bild 1.86 dargestellt und bemaßt, d. h., die Kernlochtiefe wird angegeben und die nutzbare Gewindelänge ohne Auslauf

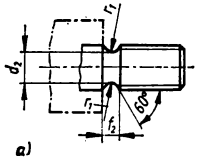
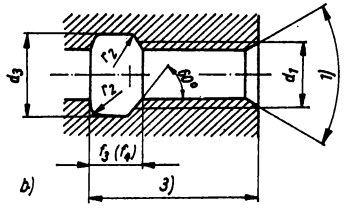


Bild 1.85. Gewinderille
a) Außengewinde,
b) Innengewinde



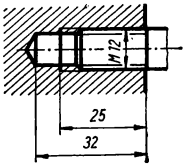


Bild 1.86. Gewindesacklöcher

eingetragen. In besonderen Fällen kann auch der Auslauf angegeben werden.
In *Kleindarstellungen von Muttergewinden* richtet sich die Bemaßung nach der Größe, in der der Gewindeaußendurchmesser gezeichnet ist. Ist seine zeichnerische Darstellung > 5 mm, so ist nach Bild 1.87a zu bemaßen, ist sie $\leqq 5$ mm, so ist die Bemaßung nach Bild 1.87b vorzunehmen.

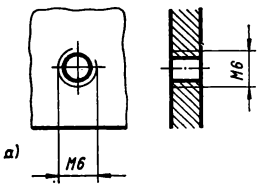
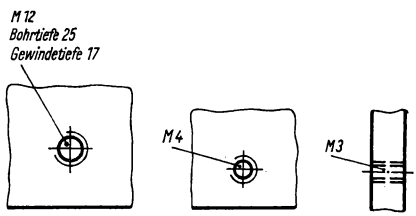


Bild 1.87. Kleingewinde
a) Nennmaß > 5 mm,
b) Nennmaß $\leqq 5$ mm



1.5.9.15. Toleranzen und Passungen

Müssen aus zwingenden Gründen die *Abmaße* für Durchmesser und Längenmaße durch Zahlen statt ISA-Kurzzeichen angegeben werden, dann ist dem Bedarf entsprechend nach Bild 1.88 zu verfahren.

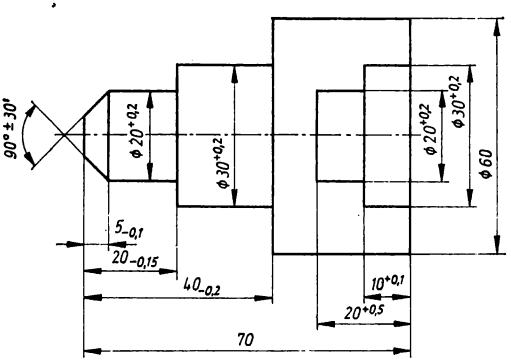


Bild 1.88. Abmaße in Zahlen

Die Abmaße sind hinter der Maßzahl einzutragen. Dem Nennmaß werden beide Abmaße hinzugefügt, es wird also das Toleranzfeld angegeben. Das *Abmaß* 0 (Null) wird jedoch nicht eingetragen. Das *obere Abmaß* ist ohne Rücksicht auf das Vorzeichen höher, das *untere Abmaß* tiefer hinter die Maßzahl zu setzen; Schriftgröße etwa 0,7 der Maßzahlhöhe, jedoch nicht kleiner als 2 mm. Bei gleichem oberem und unterem Abmaß steht das Abmaß nur einmal mit beiden Vorzeichen hinter der Maßzahl.

ISA-*Kurzzeichen* sind bei Außen- und Innenmaßen (Bild 1.89) anzuwenden, wenn ihre Abmaße dem ISA-Toleranzsystem entsprechen. Bei Absatzmaßen, bei Lochmittenabständen und bei Mittigkeiten dürfen keine Kurzzeichen angewendet werden. Kurzzeichen sind hinter die Maßzahl zu schreiben, und zwar sind die Großbuchstaben und Zahlen für Innenmaße höher und die Kleinbuchstaben und Zahlen für Außenmaße tiefer als die Maßzahl einzutragen. Im übrigen gilt sinngemäß das, was über das Eintragen der Abmaße gesagt worden ist.

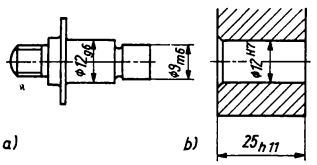


Bild 1.89. Abmaße in ISA-Kurzzeichen
a) Welle, b) Bohrung

1.5.9.16. Laufende Nummern der Teile

Die Teile sind immer durch *Zahlen* (laufende Nummern) und nicht durch Buchstaben zu bezeichnen. Laufende Nummern (Lfd. Nr.) werden etwa doppelt so groß wie Maßzahlen, jedoch nicht kleiner als 5 mm nach TGL 31034/01, neben oder in das Bild des Teiles (ohne Umrandung) gesetzt. Wenn es der Aufbau der Stückliste zuläßt, empfiehlt es sich, sie im Uhrzeigersinne anzuordnen. *Bezugslinien* sind möglichst geradlinig und so zu führen, daß sie nicht mit Körperkanten oder anderen benachbarten Linien verwechselt werden können (Bild 1.90).
Das im Teil liegende *Ende der Bezugslinie* ist mit einem *Punkt* zu versehen.

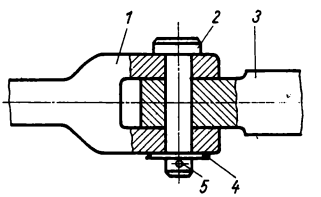


Bild 1.90. Bezeichnung von Teilen

1.5.10. ISA-Passungen und Grundtoleranzen

Die bei der Bearbeitung von Werkstücken unvermeidlichen Abweichungen von den vorgeschriebenen Maßen heißen *Herstellungstoleranzen*. Im internationalen Passungssystem sind die zulässigen Toleranzen festgelegt für drei verschiedene Arten des Ineinanderpassens (Sitze, Passungen). *1. Spielpassung, 2. Übergangspassung, 3. Preßpassung.* Die ISA-Passungen haben geeignete Paßsitze in 16 verschiedenen Qualitäten bzw. Grundtoleranzen (s. Tabelle 1.57). Die Teile können beweglich (*mit Spiel*) oder unbeweglich (*mit Übermaß*) ineinandersitzen. Diese Spiele oder Übermaße werden einmal dadurch erreicht, daß für

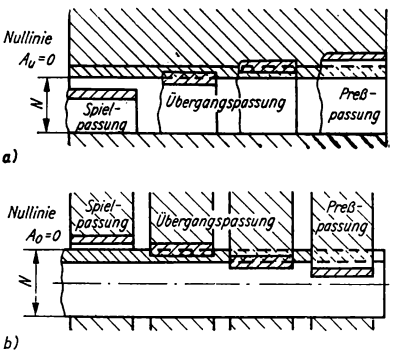


Bild 1.91. Arten der ISA-Passungen
a) System Einheitsbohrung, b) System Einheitswelle

gleich große Bohrungen die Wellen schwächer oder dicker ausgeführt werden: System der *Einheitsbohrung*, oder daß für gleich dicke Wellen die Bohrungen größer oder kleiner ausgeführt werden als die Wellen: System der *Einheitswelle* (Bild 1.91).
Beim System der *Einheitsbohrung* haben die Bohrungen das *Nennmaß* (Ausgangsmaß) als *Kleinstmaß*. Je nach den Toleranzen dürfen die Bohrungen um wenig oder mehr größer (+) ausfallen als das Nennmaß. Beim System der Einheitswelle gilt das *Nennmaß* als *Größtmaß* der Welle, und die unteren Abmaße sind wenig oder mehr kleiner (−) als das Nennmaß.
In der ISA-Passung sind nicht nur Toleranzen und Sitze von Passungen standardisiert, sondern es wurden Nennabmaße von Bohrungen und Wellen für sich standardisiert, also auch Toleranzen von Werkstücken, die ohne Gegenstück vorhanden sind.
H (h) gibt das *Bohrungstoleranzfeld* (Wellentoleranzfeld) an, das mit dem unteren (oberen) Abmaß an der Nullinie liegt. Es wird deshalb überwiegend für die Einheitsbohrung (Einheitswelle) angewendet.

Tabelle 1.57: Grundtoleranzen (nach TGL RGW 145-75)

Grundtoleranzreihe	Qualität	Nennmaßbereich mm über												
		1 bis 3	3 bis 6	6 bis 10	10 bis 18	18 bis 30	30 bis 50	50 bis 80	80 bis 120	120 bis 180	180 bis 250	250 bis 315	315 bis 400	400 bis 500
		Werte in µm = 0,001 mm												
IT 1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	3	4	5	6	7	8
IT 2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	5	7	8	9	10
IT 3	3	3	3	3	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
IT 4	4	4	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
IT 5	5	5	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
IT 6	6	7	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT 7	7	9	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT 8	8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT 9	9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT 10	10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT 11	11	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT 12	12	90	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT 13	13	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT 14	14	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550
IT 15	15	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500
IT 16	16	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000

Tabelle 1.58: Vorkommen wichtiger Metalle

Benennung Dichte Schmelzpunkt	Erze und Vorkommen	Gewinnung	Eigenschaften und Bedeutung	Handelsformen	Verwendung	Bemerkungen
Kupfer (Cuprum) Cu 8,92 kg/dm³ 1084 °C	*Kupferkies*, $CuFeS_2$ (35% Cu); Mansfeld, Norwegen, Schweden, Spanien, UdSSR, Nordamerika. — *Kupferglanz*, Cu_2S (80% Cu); Nordamerika, Chile, Japan, Australien. — Kupferschiefer (3% Cu); Mansfeld. — Rot- und Buntkupfererz Cu_2O (89 bzw. 56% Cu). Nord- und Südamerika, Australien, UdSSR.	*Rösten* in Schacht-, Dreh- oder Flammöfen (Entschwefelung): *Roh- oder Schwarzkupfer.* — *Auf nassem Wege* (Zementwässer): *Zementkupfer* (pulverig) — *Erblasen* im Konverter (Birne). — *Elektrolytkupfer* (99,9% Cu).	Rote Farbe, glänzender Bruch (feinkörnig). Geringe Gießbarkeit; in kaltem und warmem Zustand sehr geschmeidig und dehn-, walz- und hämmerbar. Hohe Leitfähigkeit für elektrischen Strom und Wärme; mit Hart- und Weichlot gut lötbar. — Schon in vorgeschichtlicher Zeit verwendet. Jährliche Welterzeugung ≈ 3500000 t.	Mansfeld-Raffinade-Kupfer, Chilekupfer (Barren), Elektrolytkupfer: alle über 99,5% Cu. — Bleche, Röhren, Draht und Stangen.	Elektroindustrie; Dampf- und Wasserrohre; Kühlapparate, Kupferstichplatten. — Lokomotiv-Feuerbuchsen; Kessel. — Metallgießerei; Lötkolben; Legierungen; Münzen.	Cu überzieht sich in feuchter Luft mit Kupferkarbonat (Edelrost). Durch Einwirken von Essigsäure entsteht *Grünspan* (Kupfersalz). Kupfersalze sind giftig (Kupferkolik): Vorsicht bei sauren Speisen im Kupfergeschirr! Küchengeschirr aus Kupfer muß innen verzinnt sein.
Blei (Plumbum) Pb 11,34 kg/dm³ 327 °C	*Bleiglanz* PbS (87% Pb); Erzgebirge, Polen, Harz, Siegerland, Eifel, Spanien, Nordamerika, Mexiko, Australien. — *Weißbleierz*, $PbCO_3$ (77,5% Pb), Spanien, Griechenland, Australien. — *Bleivitriol, Rot- und Gelbbleierz.*	*Rösten* in Flammöfen; *Schmelzen* in Schachtöfen. — *Röstreduktionsverfahren:* Rösten, dann Verblasen (völlige Entschwefelung). — Rohblei (Werkblei): 1% Silber, 1···2% andere Metalle.	Bläulichweiße Farbe, silberglänzender, feinkörniger Bruch; sehr weiches Metall (geringe Festigkeit). Gut gießbar, läßt sich walzen, hämmern, pressen; säurefest. — Legieren mit Antimon und Arsen macht es spröde und hart. — Jährliche Welterzeugung ≈ 2500000 t.	Handelsblei (99,99% Pb). — Barren, Blöcke, Stangen, Rohre, Bleche, Platten, Bleischrot (granuliertes Blei).	Chemische Industrie (Säurepfannen); Wasserleitungsrohre; Druckereien; Akkumulatoren, Bleikabel; Legierungen; Bleiweiß, Bleimennige; Flintglas, Kristallglas. — Heilkunde.	Pb bildet graue Oxidschicht an Luft. Blei und seine Verbindungen sind giftig; als Eß- und Trinkgeschirr verboten. Säurebeständig (Bleiarmaturen). — Das an der Innenfläche von Wasserleitungsrohren sich bildende Bleikarbonat ist wasserunlöslich und daher unschädlich.
Zink (Zincum) Zn 7,14 kg/dm³ 419 °C	Zinkblende, ZnS (67% Zn); Harz, Erzgebirge, Rheinland, Polen, Frankreich, Italien, Nordamerika, Australien, UdSSR. — *Kieselzinkerz*, Zn_2SiO_4, und *Galmei*, $ZnCO_3$; Fundorte: Aachen, Nordamerika. — *Zinkspat*, $ZnCO_3$ (52,3% Zn): Fundorte wie Zinkblende!	*Brennen und Rösten* in Schacht- oder Flammöfen. Reduktion in Muffelröstöfen (Destillationsprozeß); man gewinnt Zn in Dampfform (907 °C) aus Gemisch von Erz und Kohle in geschlossenen Retorten.	Bläulichweißgraue Farbe; glänzender, feinkörniger Bruch; gut gießbar, spröde bei gewöhnlicher Temperatur (und bei ≈ 200 °C); bei 150 °C hämmer-, walz- und ziehbar; verdampft bei 907 °C. — Nicht widerstandsfähig gegen chemische Einflüsse (feuchtes Eisen oder Kupfer, Säuren, Laugen). — Jährliche Welterzeugung ≈ 2800000 t.	Rohzink 97% Zn; Feinzink 99% Zn; Elektrolytzink 99,99% Zn; Zinkstaub 80% Zn. Barren, Stäbe, Bleche, Platten, Draht.	Kunstgegenstände (Gefäße, Kannen, Figuren u. dgl.). Bauarbeiten (Rinnen, Rohre, Verkleidungen usw.); Draht (verzinkter Stahldraht); Zinkplatten (galvanische Elemente); Legierungen, Klischees.	Zn überzieht sich in feuchter Luft mit wasserhaltigem Zinkkarbonat, $ZnCO_3$; es oxydiert wenig, gutes Rostschutzmittel. — Zinksalze sind giftig; sie werden in der Medizin als Ätzmittel, Zinkpulver zu Salben verwendet. — Zinkchlorid (Chlor-Zink) Ätzmittel, zur Holzkonservierung, zu Lötwasser; in der Färberei.
Zinn (Stannum) Sn 7,3 kg/dm³ 232 °C	*Zinnstein* oder *Kassiterit* (Bergzinn) SnO_2 (79% Sn); Erzgebirge, England, China, Bolivien, Transvaal. — *Seifenzinn, Waschzinn, Zinnsand*, etwa 1···2% Sn (Geröll); Ostindien (Bankazinn), Malaiischer Archipel, Australien (Lammzinn).	*Reinigen* (nasse Aufbereitung), *Rösten* in Flamm- und Schachtöfen (Reduktion): *Rohzinn* (97% Sn); nochmaliges Rösten (Seigern): *Reinzinn* (99,7% Sn).	Silberweiße Farbe; unebener, feinkörniger Bruch. Leicht schmelzbar, weich, geschmeidig; knirscht beim Biegen (Zinngeschrei); hämmerbar, dehnbar; bei 195 °C sehr spröde (verpulvern), bei 2360 °C verdampft es. — Wichtig für die Herstellung von Weißblech, verzinntes Stahlblech.	Raffiniertes Zinn, 99,8% Sn; raffiniert. Bankazinn 99,99% Sn-Barren, Blöcke, Stangen, Platten; gewalzt als Stanniol.	Haushaltgegenstände; Kunstgegenstände; chemische Industrie; Legierungen, Verzinnen, Schnellote; Spielwaren; Stanniol zum Verpacken von Lebensmitteln u. dgl.	Sn ist beständig gegen verdünnte Säuren und feuchte Luft. — *Zinnpest:* Bei längerem Stehen in kalten Räumen bilden sich graue Flecken. Ab −20 °C zerfällt Zinn allmählich zu Pulver. — Statt Zinnfolie wird meist billigere Aluminiumfolie verwendet.

Tabelle 1.58 (Fortsetzung)

Benennung Dichte Schmelzpunkt	Erze und Vorkommen	Gewinnung	Eigenschaften und Bedeutung	Handelsformen	Verwendung	Bemerkungen
Aluminium Al 2,7 kg/dm³ 658 °C	*Bauxit* (Tonerde) Al_2O_3 + $2H_2O$ (55% Al_2O_3); Südfrankreich (Baux), Italien, USA, Ungarn, Hessen, Jugoslawien, Griechenland, UdSSR, Indien.	Erzeugen v. Tonerde nach BAYER-Verfahren, dann *Elektrolyse* (Lösungsmittel Kryolith). — Verfahren von HÉROULT (elektr. Ofen).	Weiße Farbe (silberähnlich) gieß-, schmied-, hämmer- und dehnbar. Große elektr. und Wärme-Leitfähigkeit, mit Al-Lot lötbar. — Tonerde wichtig als Bindemittel für Schmirgel (Korund).	Barren, Blöcke (98···99,99% Al); Profile; Draht; Bleche (glatt oder geriffelt).	Haushaltgegenstände; Maschinenteile; Legierungen. Wichtig für Thermitschweißung, Elektro- und Fahrzeugindustrie.	Al überzieht sich an der Luft mit Oxidschicht, Laugen greifen stark, Säuren schwächer an; daher nicht für alle Zwecke verwendbar. — Al-Folie für Elektrotechnik und Verpackungen.
Nickel (Niccolum) Ni 8,9 kg/dm³ 1455 °C	*Garnierit* $NiO \cdot MgO \cdot SiO_2 \times H_2O$ (7···8% Ni); Neukaledonien. — Nickelhaltiger *Magnet- und Kupferkies*, Polen, England, Frankreich, Kanada, UdSSR, DDR. — Im Meteoreisen.	Oxydier. *Schmelzen* in Flammofen od. Birne m. Koks u. Zuschlägen. Roheisennickel (70% Ni); danach *Erhitzen* im SIEMENS-Ofen; Rohnickel »Würfelnickel« (98% Ni).	Weiße Farbe, stark glänzend, sehr festes Metall; schwer schmelzbar; dehn- und hämmerbar; walzbar zu dünnen Blechen; schweißbar; magnetisch; polierfähig.	Reinnickel (99,5% Ni) kleine Würfel. Kugeln, Nickelfolie, Filigrandraht.	Galvanische Vernikkelung von Metallwaren (Haushaltgeräte, Fahrzeugteile, Werkzeuge u. a.); Legierungen; Alfenid, Nickelstahl; elektr. Widerstände	In der Luft und im Wasser gut beständig; in der Hitze oxydiert es leicht. — Sehr gut geeignet zum Plattieren von Grauguß und Stahl; Nickeloxid. Porzellanfarbe.
Magnesium Mg 1,74 kg/dm³ 650 °C	*Dolomit* $CaMg(CO_3)_2$; Kalzium-Magnesium-Karbonat. In vielen chem. Verbind.: Magnesit, Speckstein, Kainit, Meerschaum, Magnesia, Bittersalz.	*Elektrolyse* von Magnesiumchlorid oder Karnallit (im elektrischen Ofen).	Weiße Farbe, silberglänzend, mäßig hart, sehr leicht; dehn-, hämmer-, zieh- und walzbar, auch gießbar. — Mg-Pulver verbrennt mit sehr heller Flamme, verdampft bei 1110 °C.	Magnesiumpulver, -draht oder -band, Bleche.	Beleuchtungszwecke (Magnesiumlicht) Blitzlicht (Fotografie): Fackeln u. dgl.: Mg-Legierungen, Halbzeuge, Guß- u. Schmiedeteile.	Magnesiumsalze (bitter) sind z. T. Abführmittel; Magnesiumoxid in Medizin und Kosmetik (Puder, Zahnpulver) gebräuchlich.
Platin Pt 21,45 kg/dm³ 1774 °C	In Form von Körnern im sogenannten »Platinerz«, Uralgebirge (90% der Weltproduktion). Beimischungen; Gold, Silber, Iridium, Osmium.	*Auswaschen* des zerkleinerten Ganggesteins oder der Verwitterungsprodukte (Waschprozeß).	Edelstes Metall. Bläulichweiße Farbe, silberähnl.; zäh und geschmeidig, hämmerbar, zieh-, walz- und schweißbar. Nur »Königswasser« löst (3 T. Salzsäure, 1 T. Salpetersäure).	Körner (Rohplatin) ≈ 80% Pt, werden zu Feinplatin (Drähte, Blech) verarbeitet.	Chemische Apparate; Brennstifte, Pyrometer; elektrische Kontakte; Schmuckstücke.	Widerstandsfähig gegen chemische Einflüsse; säurefest. — »Platinmohr« kann an seiner Oberfläche Sauerstoff der Luft in großen Mengen verdichten (Gas-Selbstzünder).
Quecksilber (Hydrargyrum) Hg 13,59 kg/dm³ −38,9 °C	*Zinnober* (Quecksilbersulfid); tropfenförmig (gediegen) im Gestein; Quecksilberhornerz, an Chlor gebunden. Kalifornien, UdSSR, China, Japan, Mexiko, Peru, Italien, Spanien, Jugoslawien.	*Rösten* des Z., verdampfendes Q. kondensiert als sog. »Stubb«, der 90% reines Q. ergibt.	Bei gewöhnlicher Temperatur flüssig, silberweiß. Bei −38,9 °C fest (dehnbar), Siedepunkt 357 °C. Bei Erhitzen an der Luft entsteht Hg-Oxid, in Wasser unlöslich.	Flüssig in stählernen Flaschen, die 34,5 kg Quecksilber enthalten.	Thermometer; beim Härten sehr feiner Werkzeuge. Spiegelherstellung. — Amalgam-Zahnplomben, elektrische Schaltelemente.	Verdampft schon bei gewöhnlicher Temperatur. Dämpfe und im Magensaft lösliche Quecksilbersalze sind giftig. Gut verschlossen aufbewahren.
Antimon (Stibium) Sb 6,7 kg/dm³ 630 °C	*Antimonglanz*, Grauspießglanzerz oder Spießglanz, Sb_2S_3 (Schwefel-Antimon-Verbind.); China, Algier, Bolivien, Japan, UdSSR.	*Rösten* d. Sb; Schmelzen in glühendem Koks; Umschmelzen unter Zusatz von Salpeter oder Braunstein.	Zinnweiß, blättrig-kristallinisch, hart. spröde. Nur zu Legierungen verwendbar. Es verbrennt, wenn stark erhitzt, zu weißem Rauch (Oxid). Siedepunkt 1645 °C.	Handels-A. hat etwa 98% Sb. Japanisches A.	Legierungen wie Hartblei (Lettermetall), Lagermetall, Farben.	Widerstandsfähig gegen Salzsäure und verdünnte Schwefelsäure; Sb wird rein nicht verwendet. Antimon ist giftig.
Mangan Mn 7,2 kg/dm³ 1250 °C	*Braunstein* (MnO_2) u. a. Mn-Erze; UdSSR, Afrika, Brasilien, DDR.	Im Hochofen mit Eisenerz verhüttet.	Rötlichweißer Glanz; hart. Siedepunkt 2100 °C.	Ferromangan.	Legierungen.	Spiegeleisen hat hohen Mangangehalt.
Chrom Cr 7,1 kg/dm³ 1920 °C	*Chromeisenstein* $FeCr_2O_3$, UdSSR, Jugoslawien, Türkei, Rumänien, Bulgarien.	In kleinen Hochöfen oder Elektroöfen.	Weißlicher Glanz; hart.	Stangen; Ferrochrom.	Chromstähle; Chromsalze.	Ferrochrom 60···75% Cr. Chromoxid Cr_2O_3.
Wolfram W 19,3 kg/dm³ 3380 °C	*Wolframit* $FeWO_4$ und *Scheelit* $CaWO_4$ ergeben Wolframsäureanhydrid WO_3. China, USA, Korea, UdSSR, Burma, Portugal.		Grau; sehr hart.	Pulver.	Schnellarbeitsstahl; Glühlampendraht.	WO_3 wird zu W oder Ferrowolfram verarbeitet.

Tabelle 1.59: Eigenschaften einiger Metalle

Werkstoff	Chemisches Zeichen	Dichte ϱ	Schmelzpunkt	Spezifischer elektrischer Widerstand[2]) ϱ	Elektrische Leitfähigkeit[2]) $\varkappa$	Temperaturkoeffizient α_R des elektrischen Widerstandes[1])	Spezifische Wärmekapazität c
		g/cm³	°C	Ω · mm²/m	m/(Ω · mm²)	1/K	kJ/(kg · K)
Aluminium	Al	2,7	658	0,0282	35,5	0,004	0,892
Blei	Pb	11,34	327,3	0,208	4,8	0,0038	0,130
Bronze		7,4···8,9	900	0,0275	36,4	0,004	—
Chrom	Cr	7	1800	0,0263	38	—	0,507
Eisen	Fe	7,86	1530	0,13	7,7	0,0048	0,465
Grauguß		7,6	1200	0,6···1,6	1,67···0,625	0,0042	—
Stahl		7,7	1350	0,12	8,3	—	—
Gold	Au	19,33	1063	0,0222	45	—	0,130
Kadmium	Cd	8,64	320,9	0,76	13,2	—	0,234
Konstantan		8,8	1270	0,5	2	0,00005	—
Kupfer	Cu	8,9	1083	0,0175	57,1	0,00392	0,389
Magnesium	Mg	1,74	650	0,0461	21,7	0,0039	1,038
Manganin		8,35	1200	0,42	2,38	0,00001	—
Messing		8,2···8,7	910	0,08	12,5	0,0015	0,389
Nickel	Ni	8,9	1455	0,10	10	0,0044	0,456
Platin	Pt	21,45	1773	0,10	9,3	0,0039	0,134
Quecksilber	Hg	13,55	−38,8	0,955	1,05	0,0009	0,138
Silber	Ag	10,5	960,5	0,0165	60,5	0,0036	0,234
Weichlote		—	120···200	—	—	—	—
Wolfram	W	19,3	3380	0,0555	18,2	0,0041	0,138
Zink	Zn	7,23	419,4	0,063	15,8	0,0037	0,394
Zinn	Sn	7,28	231,8	0,12	8,35	0,0044	0,230

[1]) zwischen 0 und 100 °C, [2]) Werte für 20 °C.
Temperaturabhängigkeit: Länge $l = l_{20}(1 + \alpha_L \Delta t)$, Volumen $V \approx V_{20}(1 + 3\alpha_L \Delta t)$, Widerstand $R = R_{20}(1 + \alpha_R \Delta t)$.

Symmetrisch zur Nullinie liegen die Toleranzen der Buchstaben J und j von der 10ten Qualität ab. Sie sind ±-Toleranzen der ISA-Passung. — Unter Qualität ist Arbeitsgenauigkeit bei Werkstückherstellung zu verstehen. Je kleiner die Toleranz, um so besser die Qualität. — Grundtoleranzen IT 1 bis IT 16 heißen die für jeden Nennmaßbereich im Toleranzsystem der ISA vorgesehenen 16 Toleranzstufen, wobei jede Stufe als Qualität gilt. Der Begriff Qualität ist hierbei der Toleranz des einzelnen Stückes zugeordnet. — Passungen werden herbeigeführt, indem das genormte Nennabmaß der Bohrung mit dem gewünschten Nennabmaß der Welle zusammengefügt wird. — Das Toleranzfeld wird durch den Buchstaben und die Kennzahl der Qualität bezeichnet. Beispiel: 30^{H9} = Toleranzfeld im Plus an Nullinie, zugeordnete Grundtoleranzreihe IT 9. $30^{H9} = 30^{+52}$, Toleranzfeld von 0···52 µm = 0,052 mm. — Die *Toleranzeinheit* i in µm (1 µm = 0,001 mm) ist: $i = 0{,}45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0{,}001D$, wobei D in mm eingesetzt wird.
Die *Toleranzfelder* im ISA-System werden bei Bohrungen mit großen Buchstaben bezeichnet, bei Wellen mit kleinen Buchstaben. Es bezeichnen: A···H, a···h Spielpassung, JKMN, jkmn Übergangspassung, PRSTUVXYZ, prstuvxyz Preßpassung. Zuerst steht das Zeichen der Bohrung, dann das der Welle, z. B. H 9/n 8 oder H 9−n 8 oder $\frac{H9}{n8}$.

1.6. Werkstoffe, Halbzeuge, Schrauben und Zubehör

1.6.1. Vorkommen und Eigenschaften einiger Metalle

Tabelle 1.58 enthält die Vorkommen, Tabelle 1.59 die Eigenschaften wichtiger Metalle.
Molybdän Mo (10,2 kg/dm³; 2600 °C), *Vanadin* V (6,0 kg/dm³; 1720 °C) und *Titan* Ti (4,53 kg/dm³; 1800 °C) dienen als Zusätze zu harten und festen Schnellarbeitsstählen. *Osmium* Os (22,5 kg/dm³; 2500 °C) und *Tantal* Ta (16,6 kg/dm³; 3000 °C) werden ab und zu noch zu Drähten für elektrische Glühlampen zu Sonderzwecken verarbeitet.

1.6.2. Leiterwerkstoffe

1.6.2.1. Aluminium

Zusammensetzung und Kennzeichnung von *Halbzeugen* und *Strängen* aus Aluminium sind im Standard TGL 14712 angegeben. Zu Halbzeugen zählen *Streifen, Bänder, Folien, Bleche, Drähte, Stangen, Rohre, Profile* und *Gesenkschmiedestücke.*
Reinstaluminiumsorten sind durch den Zusatzbuchstaben R gekennzeichnet. In der Regel werden für elektrotechnische Erzeugnisse Reinaluminiumsorten verwendet, sofern ein Leitwert von 35,7 m/(Ω · mm²) ausreichend ist. Bei Mindestleitwerten von 34,8 m/(Ω · mm²) ist der Einsatz von Reinstaluminium, Sorte Al 99,95 R, notwendig. Tabelle 1.60 gibt Auskunft über die mechanische Festigkeit des Aluminiums für Leiter.

1.6.2.2. Kupfer

Die Zusammensetzung und der Einsatz von *Kupfersorten* sind im Standard TGL 14708 festgelegt. Die Tabellen 1.61 und 1.62 stellen einen Auszug aus diesem Standard dar. Die Festigkeits-

Tabelle 1.60: Eigenschaften von Stromschienenmaterial

Werkstoff nach TGL 14712	Zugfestigkeit σ_{zB}	Streckgrenze $\sigma_{0,2}$	Spezifische elektrische Leitfähigkeit $\varkappa$	Zulässige Maximaltemperatur
	MPa	N/mm²	m/(Ω · mm²)	°C
Al 99,5 F 6,5 gepreßt	65	35···45	35,1	180
Al 99,5 F 9 gezogen	90	70···90	34,6	180
E-Cu 99,9 F 20	200···250	bis 100	57,5	200
E-Cu 99,9 F 25	250···300	150	56,0	200

Tabelle 1.61: Zusammensetzung einiger Kupfersorten

Sorte Kurzzeichen	Cu-Gehalt mindestens %	Beimengungen in %, höchstens								
		Bi	Sb	As	Sn	Ni	Fe	Pb	Zn	S
Elektrolytkupfer-Katoden KE-Cu 99,95	99,95	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005
Elektrolytkupfer, sauerstofffrei SE-Cu 99,97	99,97	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,003	0,002	0,005
Elektro ytkupfer, sauerstofffrei SE-Cu 99,95	99,95	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,003	0,005
Raffinadekupfer, desoxydiert DR-Cu 99,9	99,90	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005
Raffinadekupfer, desoxydiert DR-Cu 99,7	99,70	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05		0,01
Raffinadekupfer, desoxydiert DR-Cu 99,5	99,50	0,003	0,05	0,05	0,05	0,4	0,05	0,03		0,01
Elektrolytkupfer E-Cu 99,9	99,90	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005
Raffinadekupfer R-Cu 99,7	99,70	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05		0,01
Raffinadekupfer R-Cu 99,5	99,50	0,003	0,05	0,05	0,05	0,2	0,05	0,05		0,01
Raffinadekupfer R-Cu 99	99,0	0,02	0,05	—		—		0,1		0,02
Gußkupfer Cu 99	99,0	0,005	0,2	0,2			0,1	0,3		0,02

eigenschaften von Kupferprofilen sind zur Information TGL 0-17670 entnommen und in Tabelle 1.63 enthalten. Die Kupfersorte E-Cu 99,9 wird sehr oft zu Stromleitungszwecken verwendet. Die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des E-Cu 99,9 vom Festigkeitszustand ist TGL 0-40500 entnommen und in Tabelle 1.64 wiedergegeben.

Tabelle 1.62: Einsatzgebiete von Kupfersorten

Kurzzeichen	Vorzugsweise Verwendung
a) elektrolytisch niedergeschlagenes Kupfer	
KE-Cu 99,95	Einsatz für Schmelzungen hoher Reinheit, insbesondere mit elektrischer Leitfähigkeit nach Vorschrift
b) sauerstofffreie Kupfersorten in Formaten	
SE-Cu 99,97	Verwendung für Elektronik und Radiotechnik
SE-Cu 99,95	Formate für Walz-, Preß- und Gesenkschmiede-Erzeugnisse, wenn elektrische Leitfähigkeit nach Vorschrift verlangt wird
c) desoxydierte Kupfersorten in Formaten	
DR-Cu 99,9	Formate für Rohre, Walz-, Preß- und Gesenkschmiede-Erzeugnisse
DR-Cu 99,7	Formate für Rohre, Walz-, Preß- und Gesenkschmiede-Erzeugnisse
DR-Cu 99,5	Formate für Rohre, Walz-, Preß- und Gesenkschmiede-Erzeugnisse
d) sauerstoffhaltige Kupfersorten in Formaten	
E-Cu 99,9	Formate für Walz-, Preß- und Gesenkschmiede-Erzeugnisse, wenn elektrische Leitfähigkeit nach Vorschrift verlangt wird
R-Cu 99,7	Formate für Walz-, Preß- und Gesenkschmiede-Erzeugnisse
R-Cu 99,5	Einsatz für Metallguß
R-Cu 99	Formate für Feuerbuchsen und Stehbolzen
Cu 99	Formguß aus Cu und Cu-Legierungen

Tabelle 1.63: Eigenschaften von Kupfersorten

Sorte, Kurzzeichen		Festigkeit Kurzzeichen	Zugfestigkeit σ_B MPa	Streckgrenze $\sigma_{0,2}$ MPa	Bruchdehnung δ_{10} %
sauerstofffrei	sauerstoffhaltig				
DR-Cu 99,7	R-Cu 99,5	F 20	200	100	30
SE-Cu 99,92	R-Cu 99,7	F 25	250	150	8
	E-Cu 99,9	F 30	300	250	3
		F 37	370	330	2

Tabelle 1.64: Elektrische Eigenschaften von Elektrolyt-Kupfer

Werkstoff Kurzzeichen	Spezif. elektr. Widerstand ϱ $\Omega \cdot mm^2/m$	Elektrische Leitfähigkeit $\varkappa$ $m/(\Omega \cdot mm^2)$
E-Cu 99,9 F 20	0,01754	57
E-Cu 99,9 F 25	0,01786	56
E-Cu 99,9 F 30	0,01786	56
E-Cu 99,9 F 37	0,01817	55

Tabelle 1.65: Zusammensetzung von Messingsorten

Sorte, Kurzzeichen		Legierungsbestandteile in %		
neu	bisher	Cu	Pb	Zn
CuZn 40 Pb 2	Ms 58	56,0···60,0	1,0···3,5	Rest
CuZn 40	Ms 60	59,0···62,0	—	Rest
CuZn 39 Pb	Ms 60 Pb	59,0···62,0	0,5···1,0	Rest
CuZn 37	Ms 63	62,0···65,0	—	Rest
CuZn 36 Pb 1	Ms 63 Pb	62,0···65,0	0,2···3,0	Rest
CuZn 30	Ms 70	69,0···72,0	—	Rest
CuZn 20	Ms 80	78,0···81,0	—	Rest
CuZn 15	Ms 85	84,0···86,0	—	Rest
CuZn 10	Ms 90	89,0···91,0	—	Rest
CuZn 4	—	95,0···97,0	—	Rest

1.6.2.3. Messing

Messing ist eine *Kupfer-Zink-Knetlegierung*. Die Zusammensetzung von Messing geben die Tabellen 1.65 und 1.66 an.

1.6.3. Lote

Elektrische Leiter aus *Aluminium* oder *Aluminiumlegierungen* können gelötet oder geschweißt werden. Das Schweißen hat wegen der großen Oxydationsgeschwindigkeit des Aluminiums

Tabelle 1.66: Einsatzgebiete von Messingsorten

Sorte, Kurzzeichen neu	Sorte, Kurzzeichen bisher	Hinweise für die Verwendung
CuZn 40 Pb 2	Ms 58	Hauptlegierung für alle spanabhebenden Bearbeitungsverfahren; warmformbar; gering kaltformbar; gut stanzbar Graviermessing; Uhrenmessing für Räder und Platinen; Schrauben und Drehteile aller Art für den Maschinenbau und die Elektrotechnik; Bauprofile
CuZn 40 CuZn 39 Pb	Ms 60 Ms 60 Pb	gut warm- und kaltformbar; biege-, niet-, stauch- und bördelfähig, in weichem Zustand prägefähig; mit Bleizusatz auch auf Automaten spanbar Messinglinien; Warmpreßteile; Dorndraht; Schrauben und Drehteile; Beschlag und Schloßteile

Tabelle 1.66 (Fortsetzung)

Sorte, Kurzzeichen neu	Sorte, Kurzzeichen bisher	Hinweise für die Verwendung
CuZn 37 CuZn 36 Pb 1	Ms 63 Ms 63 Pb	Hauptlegierungen für das Kaltumformen durch Tiefziehen, Drükken, Stauchen und Gewinderollen; durch Bleizusatz Verbesserung der Spanbarkeit bei Einschränkung der Kaltformbarkeit Metall- und Holzschrauben; Rohre; Druckwalzen, Kühlerbänder; Ätzbleche; Reißverschlüsse; Hohlwaren; Zifferblätter; Stimmenmessing
CuZn 30	Ms 70	sehr gut kaltformbar Rohre für Wärmeaustauscher (Kondensatorrohre, Siederohre); Instrumentenrohre, tiefgezogene Hülsen
CuZn 20	Ms 80	sehr gut kaltformbar Rohre und Hülsen für Federungskörper und Schlauchrohre; Manometerrohre; Installationsteile für die Elektrotechnik; Schmuckwaren; Webedrähte
CuZn 15 CuZn 10	Ms 85 Ms 90	sehr gut kaltformbar Installationsteile für die Elektrotechnik; Schmuckwaren
CuZn 4	–	sehr gut kaltformbar für Abzeichen und Plaketten; gut emaillierfähig

Tabelle 1.67: Lote für Aluminium

Sorte Kurzzeichen	Legierungsbestandteile in %						Schmelzbereich in °C		Arbeitstemperatur °C	Reiblöttemperatur °C
	Sn	Cd	Zn	Al	Mn	Si	Solidus	Liquidus		
a) Weichlote										
L ZnSnCd 25	35···38	24···27	36···39	–	–	–	165	300	–	230
L SnZn 40	50···70	–	30···50	–	–	–	200	350	–	260
L ZnCd 40	–	35···45	55···65	–	–	–	265	350	–	300
L CdZn 20	–	75···83	17···25	–	–	–	265	280	280	–
L CdZn 30	–	65···70	30···35	–	–	–	265	310	310	–
b) Hartlote										
L AlSi 12	–	–	–	Rest	–	11···13,5	575	590	590	–
L ZnAl 30	–	–	67···70	29,5···32,5	0,1···0,5	–	450	515	520	–

Tabelle 1.68: Lote für Kupferlegierungen

Lot Kurzzeichen	Sn	Pb	Sb	Cu	Ag	Schmelzbereich in °C Solidus	Liquidus	Anwendung
Antimonhaltige Zinnlote								
LSn 25 Sb	24,5···25,5	Rest	0,20···1,70	–	–	186	260	
LSn 60 Sb	59,5···60,5	Rest	0,50···2,00	–	–	186	190	
Antimonarme Zinnlote								
LSn 8 (Sb)	7,5···8,5	Rest	0,12···0,50	–	–	280	305	
LSn 90 (Sb)	89,5···90,5	Rest	0,12···0,50	–	–	183	219	
Antimonfreie Zinnlote								
LSn 2	1,5···2,5	Rest	–	–	–	320	325	
LSn 63	62,5···63,5	Rest	–	–	–	183	183	Leiterplatten
Zinnlote mit Kupfer- oder Silberzusatz								
LSn 60 Cu 1,5	59,5···60,5	Rest	–	1,0···1,5	–	183	190	
LSn 63 Ag 1,5	62,5···63,5	Rest	–	–	1,3···1,5	178	178	Leiterplatten

unter Schutzgas zu erfolgen. Es sind auch Hart- oder Weichlötungen unter Benutzung spezieller Zusatzwerkstoffe möglich. Hartlote dienen vorzugsweise zum Spaltlöten mit angesetztem oder eingelegtem Lot. Weichlote werden vorzugsweise für Reinaluminium verwendet. Weichlöten von Aluminiumlegierungen ist nach dem Reiblötverfahren ohne Einschränkung möglich. Tabelle 1.67 gibt Hart- und Weichlote für Aluminium und die notwendige Löttemperatur nach TGL 14908 an.
Kupfer- und *Messingleiter* können gelötet oder geschweißt werden. Weichlote bauen auf Zinnbasis, Hartlote auf Kupfer- oder Messingbasis auf. Tabelle 1.68 gibt nach TGL 14908 die Zusammensetzung und charakteristische Temperaturen des Schmelzprozesses für einige ausgewählte Lote an.

1.6.4. Plaste und Isolierstoffe

Plaste und Isolierstoffe sind durch einen *sehr hohen elektrischen Widerstand* gekennzeichnet.
Der *Isolationswiderstand* ist der Quotient aus der am Isolierkörper angelegten Gleichspannung und dem gesamten Strom, der durch den Isolierstoff und an dessen Oberfläche fließt. Der *Volumenwiderstand* ist der Quotient aus angelegter Gleichspannung und dem Teil des Stromes, der durch den Isolierstoff fließt. Der *Oberflächenwiderstand* ist der Quotient aus angelegter Gleichspannung und dem Teil des Stromes, der an der Oberfläche des Isolierkörpers fließt.
Die *Bestimmung elektrischer Widerstandswerte* fester und flüssiger Isolierstoffe hat nach dem Standard TGL 15347 zu erfolgen. Bild 1.92 gibt hierzu die Prinzipschaltungen nach der Strom-Spannungs-, Brücken- und Vergleichsmethode an. Die Prüfspannung soll in der Regel 500 V betragen. Als Meßwert ist derjenige zu werten, der sich in der 60. Sekunde einstellt.

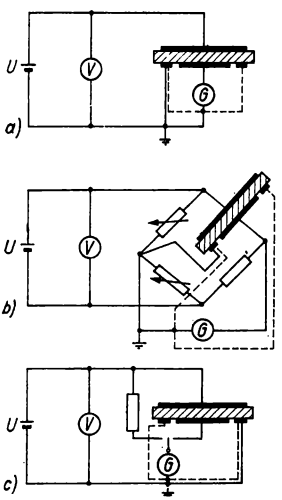


Bild 1.92. Meßschaltungen zur Bestimmung des elektrischen Isolationswiderstandes
a) Strom-Spannungs-Messung, b) Brückenmethode, c) Vergleichsmessung

1.6.4.1. Plaste

Herstellungsverfahren

Polymerisation

Zusammentritt von Molekülen einer einfachen Verbindung ohne Abspaltung eines Nebenprodukts.

Blockpolymerisation: Polymerisation des Monomeren in Abwesenheit von Lösungs- und Dispergiermitteln. Gute Wärmeregulierung nur bei kontinuierlichen Verfahren gegeben (Zufluß Monomeres, Abfluß Polymeres).

Lösungspolymerisation: Polymerisation in Lösungsmitteln, vorwiegend für die Herstellung von Polymerisatlösungen. Wärmeregulierung einfacher.

Emulsionspolymerisation: Wichtigstes technisches Verfahren. Schneller Reaktionsablauf, gute Wärmeführung. Emulgierung des Monomeren in einem Nichtlöser, Anfall des Polymeren in kleiner Teilchengröße.

Suspensionspolymerisation: Ähnlich wie oben, Suspension des Monomeren in Wasser. Anfall des Polymeren in Perlenform.

Fällungspolymerisation: Abart der Lösungsmittelpolymerisation. Anwendung eines Lösungsmittels, das zwar das Monomere, nicht aber das Polymere lösen kann.
Das Endprodukt hat die gleiche Bruttozusammensetzung wie das Ausgangsprodukt.
Polymerisate sind *Thermoplaste.* Wichtigste Vertreter: *Polystyrol, Polyvinylchlorid, Polyakrylate, Polyäthylen.*

Polykondensation

Zusammentritt von Molekülen mindestens zweier einfacher Verbindungen zu einer neuen Verbindung unter Abspaltung eines Nebenprodukts. Durch fortlaufende Umsetzung bilden sich zunächst lineare, später z. T. auch verzweigte Makromoleküle.
Das Endprodukt hat eine andere Bruttozusammensetzung als die Ausgangsprodukte.

Polyaddition

Zusammentritt von Molekülen mindestens zweier einfacher Verbindungen zu einer neuen Verbindung ohne Abscheidung eines Nebenprodukts.
Neue reaktionsfähige Gruppen entstehen durch Wasserstoffverschiebung innerhalb der Moleküle.
Das Endprodukt hat die gleiche Bruttozusammensetzung wie die Ausgangsprodukte.

Polykondensation in Verbindung mit Polymerisation

Polykondensation von z. B. mehrwertigen Dikarbonsäuren mit mehrwertigen Alkoholen unter Zusatz von z. B. Monostyrol.

Veränderung der Eigenschaften von Plasten durch Weichmacher

Reine Plaste sind häufig hart und spröde; es ist erforderlich, sie für bestimmte Gebrauchs- und Verarbeitungszwecke so umzugestalten, daß sie weich und elastisch sind.
Dies geschieht durch Weichmachung.

Äußere Weichmachung: Zusatz von z. B. Phthalsäureestern u. ä. Produkten, die die Plastteilchen anquellen und sich in den Plast einlagern.

Innere Weichmachung: Mischpolymerisation von verschiedenen Monomeren. Da die Eigenschaften der einzelnen Plastarten bekannt sind, ist es möglich, auf diesem Wege Eigenschaften »nach Maß« zu erhalten.
Plaste sind größtenteils organisch-chemische Verbindungen, aufgebaut aus *Makromolekülen.* Dieser Aufbau bedingt die bekannten Eigenschaften der Plastwerkstoffe.
Makromoleküle entstehen auf Grund der Neigung bestimmter Atomgruppen, unter geeigneten Bedingungen langkettige und verzweigte Verbindungen zu bilden. Diese Gruppen sind vorwiegend Kohlenstoffdoppelbindungen. Einige Plaste entstehen durch Umwandlung von Naturstoffen (Zellulose, Kasein).

Unterschiede der Plaste gegenüber Metallen sind

niedrigere Dichte, meist unter der Hälfte der Dichte von Aluminium,
sehr gute elektrische Isolierfähigkeit,
äußerst gute Korrosionsbeständigkeit gegen Säuren und Laugen,
Oberflächenschutz, z. B. durch Anstrich, nicht erforderlich.
meist geschmack- und geruchfrei und physiologisch unbedenklich,
gute Formbarkeit spanlos und spangebend,
ansprechende Einfärbbarkeit,
hohes Wärmeisolationsvermögen.

Einteilung der Plaste

Nach den thermischen Eigenschaften können Plaste in die Gruppen Duro- und Thermoplaste eingeteilt werden.

Duroplaste: Durch Druck- und Wärmeeinwirkung Übergang in unschmelzbaren bzw. unlöslichen Zustand, irreversibel (Phenoplaste, Aminoplaste).

Thermoplaste: Durch Erwärmung plastisch verformbar, nach Abkühlen Ausgangszustand, reversibel (Polystyrol, Polyamid, Polyäthylen, Polyvinylchlorid).
Tabelle 1.69 gibt einen Überblick über Plastarten, deren Darstellung, Eigenschaften und Verwendung.

Tabelle 1.69: Überblick über Plastarten

Plastart	Darstellung	Eigenschaften	Verwendung
a) Modifizierte Naturstoffe			
Vulkanfiber	Rohstoff: Baumwolle und Spezialzellstoffe; Behandeln der Faservliese mit Zinkchloridlösung unter Druck- und Wärmeeinwirkung, dadurch Hydratisierung und Verschweißen der Fasern	sehr zäh, fast unzerbrechlich, Dichte 1,25···1,50 g/cm³, widerstandsfähig gegen Abnutzung, Öle und Fette; mechanisch gut zu bearbeiten. Durchschlagfestigkeit 1···2 kV/mm; Temperaturbeständigkeit 90···100 °C	für zahlreiche industrielle Zwecke, in der Elektrotechnik für Formteile der Schwachstromtechnik, Schaltergriffe, isolierte Rohre
Zelluloid	aus Nitrozellulose und Kampfer, unter Zusatz von Alkohol und unter Wärmeeinwirkung	wasserhell, hohe Durchsichtigkeit; brennbar!	Gebrauchsgegenstände, Schutzscheiben
Zellulosetriester	aus Zellulose unter Anwendung konzentrierter Säuren, z. B. Essigsäure	sehr gute Wasser- und Wärmebeständigkeit, auch Lösungsmittelbeständigkeit	für elektrische Maschinen, Spulenwicklungen, Nutenisolationen, Dielektrika für Kondensatoren
Celluloseäther	aus Natronzellulose mit Halogenalkylen, Halogenalkylkarbonsäuren usw.	je nach Wahl der Äthergruppen unterschiedlich; Benzylzellulosel̈acke sind sehr alkalibeständig	Äthyl- und Benzylzellulose für dielektrische Isolationsmittel, wasserlösliche Zelluloseäther als Anstrichbindemittel, für Klebstoffe und Textilhilfsmittel
b) Polyvinylverbindungen			
Polyvinylchlorid	Anlagerung von Chlorwasserstoff an Äthin, Polymerisation	geringe Lichtbeständigkeit, sehr gute Verformbarkeit, hochwertige Eigenschaften, die PVC zum wichtigsten Plastwerkstoff gemacht haben	Kabelisolation, Gebrauchsgegenstände, Säurebehälter, Rohre usw.
Polystyrol	Reaktion von Benzol mit Äthin in Gegenwart von Aluminiumchlorid zu Äthylbenzol, Dehydratisierung zu Styrol, Polymerisation	gute Spritzgußfähigkeit, hohe Wasserbeständigkeit, Beständigkeit gegen Licht und Chemikalien außer einigen org. Lösungsmitteln, gute dielektrische Isolationswerte, Dielektrizitätszahl bis 1 MHz, $\varepsilon_r = 2{,}6$, dielektrischer Verlustfaktor bis 1 MHz $\tan\delta = 5 \cdot 10^{-4}$, Durchschlagfestigkeit 50 kV/mm	Isolier- und Einbauteile aller Art, Akkukästen und Zubehörteile
Polyvinylazetat	aus Essigsäure und Äthin in Gegenwart von Quecksilberchlorid, Polymerisation	glasklar, spröde, licht- und wärmebeständig	vorwiegend Lacksektor, Klebetechnik
c) Polyakrylverbindungen			
Polymethakrylate, Polyakrylate	aus Akrylsäure bzw. Methakrylsäure und Alkoholen, Polymerisation	glasklar, geringe Dichte, hohe Festigkeit, gutes elektrisches Isolationsvermögen, physiologisch verträglich	Scheiben, Bauelemente, lichtreflektierende Schilder, häufige Anwendung in der Medizin
Polyakrylnitril	Anlagerung von Blausäure an Äthin, neuerdings aus Propen und Ammoniak und Luft	nicht thermoplastisch, gut beständig gegen organische Lösungsmittel	überwiegend für Fasern und synthetischen Kautschuk
d) Polyamide			
Polyamide	durch Polymerisation von Aminokaprolaktam oder aus Dikarbonsäuren mit Diaminen	sehr zähelastisch, gute Beständigkeit, gute Isolationsfähigkeit	Faserstoffe, Formteile, Gebrauchsgegenstände wie Folien, Rohre, Gleitlager und Zahnräder
e) Polyesterharze			
Polyester	Kondensation aus zweiwertigen Alkoholen und Dikarbonsäuren, gelöst in einem polymerisierfähigen Harz, z. B. Styrol	gute mechanische Eigenschaften, niedrige Dichte. Bei Verarbeitung mit Glasfasern Festigkeit ähnlich Metallen; gute elektrische Eigenschaften, Widerstandsfähigkeit gegen klimatische Einflüsse; nicht beständig gegen Laugen, Ester, Ketone; Dielektrizitätszahl ε_r bei 800 Hz 4,6, dielektr. Verlustfaktor 50···800 Hz $\tan\delta = 2{,}2 \cdot 10^{-2}$, Durchgangswiderstand $8 \cdot 10^{14}\ \Omega \cdot$ cm, Durchschlagfestigkeit 23 kV/mm	als Gießharz in der Elektroindustrie, zum Abdichten von porösem Guß, für Klebstoffe, Spachtelmassen, in Kombination mit Glasfasern für Boote usw.; Polyester sind auch geeignet für Faserstoffe

Tabelle 1.69 (Fortsetzung)

Plastart	Darstellung	Eigenschaften	Verwendung
f) Pheno- und Aminoplaste			
Phenoplaste	Kondensation von Phenol und Formaldehyd	hohe mechanische Festigkeit, Wärmebeständigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen chemische und atmosphärische Einflüsse, hohes Isolationsvermögen, Durchgangswiderstand $10^{-13}\ \Omega \cdot$ cm	Gußmassen, Edelpreßharze, Schichtpreßstoffe, Bremsbeläge; Hartpapier oder Hartgewebe für elektrotechnische Belange
Aminoplaste	Kondensation von Aldehyden mit Aminen oder Amiden, z. B. Formaldehyd und Harnstoff	gute mechanische Eigenschaften, hohe Kriechstromfestigkeit	mit Asbest- oder Schiefermehlfüllung anstelle von Porzellan für spannungsführende Teile
g) Epoxidharze			
Epoxidharze	Kondensation von mehrwertigen Phenolen mit Äthylenchlorhydrin; weitere Vernetzung durch Polyaddition; infolge reaktiver Gruppen härtbar mit basischen Härtern (Polyamine und Polyamide), die sich durch Addition unter Wärmeentwicklung und ohne Abspalten anderer Stoffe anlagern	die elektrischen Werte fallen oberhalb 155 °C stark ab; Dielektrizitätszahl[1]) ε_r bei 20 °C, 50 Hz 3,75 20 °C, 10^6 Hz 3,50 dielektrischer Verlustfaktor bei 20 °C, 50 Hz $70 \cdot 10^{-4}$ 20 °C, 10^6 Hz $270 \cdot 10^{-4}$ Durchgangswiderstand $10^{16} \cdots 10^{17}\ \Omega \cdot$ cm Oberflächenwiderstand $3{,}8 \cdot 10^{13}\ \Omega \cdot$ cm Kriechstromfestigkeit gut, Durchschlagfestigkeit 37 kV/mm	Epilox EG 1 zur Herstellung von Trockenstromwandlern, Trockenspannungswandlern, als Isolationsmaterial in der Hochspannungstechnik, zum Einbetten empfindlicher elektrischer Geräte, z. B. Spulen, Kondensatoren, Widerstände, Trägerfrequenzfilter, Kontaktleisten, Radiosonden

[1]) Werte ohne Füllstoff

Verarbeitung der Plaste

Die Plastwerkstoffe haben breite Bearbeitungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten, so daß z. B. die aus der Holzbearbeitung bekannten Verfahren und Werkzeuge zum größten Teil auch für die Plastverarbeitung zu verwenden sind.
Die meisten Plastwerkstoffe können *geklebt* oder mittels Heißluft oder Hochfrequenz *geschweißt* werden. Platten und Folien aus thermoplastischen Massen, z. B. Polyäthylen, können im *Vakuumtiefziehverfahren* zu Behältern u. ä. verformt werden. Duroplaste können im *Preßverfahren* bearbeitet werden, dies ist besonders für elektrotechnische Teile und Formkörper von Bedeutung.
Bei der Verarbeitung der Plaste ergeben sich, grob betrachtet, folgende *Unterteilungen* (Grenzgebiete werden dabei nicht besprochen):

Verarbeitung zu Formteilen: Für Duroplaste wird Formpressen und Spritzpressen, für Thermoplaste Spritzgießen und Schlagpressen angewandt.

Verarbeitung zu Halbzeugen: Für Duroplaste im Schichtpreßverfahren zu Platten und anderem flächigem Halbzeug, für Thermoplaste im Strangpreßverfahren zu Voll- und Hohlprofilen, z. B. durch Blasen und Walzen zu Folien.

Herstellen von Formteilen und Halbzeugen

Formpressen. Die Preßmasse liegt in Form von Pulver, Granulat oder Tabletten vor und wird in genau dosierter Menge in die Preßform eingefüllt. Die Form ist aufgeheizt, das Harz beginnt zu fließen und wird durch den Preßdruck in sämtliche Hohlräume der Form gedrückt. Nach der Aushärtung (auch Back- oder Stehzeit genannt) wird die Form durch Hochfahren des Pressenobertells geöffnet und das Fertigteil durch Auswerfer aus der Form gestoßen.

Spritzpressen. Die Preßmasse wird außerhalb der Form vorgewärmt und durch Kanäle in die beheizte Form gespritzt. Die Formteile zeichnen sich durch besondere Maßhaltigkeit aus; das Verfahren ist geeignet für komplizierte Teile.

Spritzgießen. Das Spritzgußmaterial (meist ohne Füllstoff) wird in einem Zylinder erhitzt und mittels eines Kolbens durch eine Düse in die Form gespritzt. Die Masse erstarrt in der wesentlich kühleren Form sehr schnell, und das Formteil kann in kurzer Zeit ausgeworfen werden. — Spritzgußartikel werden mit einer Masse von wenigen Gramm bis 20 kg hergestellt.

Schlagpressen und *Warmpreßverfahren.* Abschnitte oder Tabletten werden außerhalb der Form bis nahe an die Fließtemperatur erhitzt und anschließend in der Presse schlagartig zu Formteilen verarbeitet.

Schichtpressen. Die mit Harz getränkten Papier- oder Baumwollgewebe-Bahnen werden in mehreren Schichten übereinandergelegt. Zur gleichzeitigen Herstellung mehrerer Platten werden diese durch Preßbleche voneinander getrennt.

Strangpressen. Die Umformung erfolgt bei Fließtemperatur unter Druck kontinuierlich. Neben selbständigen Halbzeugen werden Ummantelungen hergestellt.

Schneckenstrangpressen. Herstellung von Rohren, Profilen, Fäden, Borsten, Schläuchen u. ä. aus Thermoplasten.

Blasen. Aus heißen Vorformlingen (Schläuchen usw.) aus Polystyrol und Polyäthylen werden in Formen mittels Druckluft Hohlkörper gefertigt. Folien werden durch Aufblasen eines aus einer Ringdüse austretenden dicken Schlauches hergestellt. Hierfür werden Schneckenpressen eingesetzt.

Walzen. Die plastische Masse wird über beheizte Kalanderwalzen zur Folie ausgezogen.

Tiefziehen. Dieses Verfahren gilt als Weiterverarbeitung. Dünne Tafeln und Folien werden nach Erwärmung mit den üblichen Ziehwerkzeugen unter Druck oder nach dem Vakuumverfahren geformt. Das letztere Verfahren ermöglicht die Verwendung billiger Werkzeuge (Holz, Gips oder Leichtmetall).

Herstellen von korrosionsbeständigen Schutzschichten

Flammspritzen. Mit Hilfe einer Spezial-Spritzpistole wird der als Pulver vorliegende Plastwerkstoff (PVC-weich als Paste, Polyamid und Polyäthylen) durch eine Flamme auf das vor Korrosion zu schützende Teil aufgespritzt, dessen Oberfläche zur Erzielung einer besseren Haftung des Überzuges fettfrei und aufgerauht sein muß. Polyamidüberzüge sind besonders verschleißfest.

Wirbelsintern. Die vorgewärmten Teile werden in das durch Druckluft oder inerte Gase aufgelockerte Plastpulver (Polyäthylen) getaucht. Durch die Speicherwärme des Teiles schmilzt das Pulver zu einem festhaftenden Überzug zusammen.

Spanabhebende Bearbeitung von Plast-Halbzeugen

Allgemeine Richtlinien. Zur Erzielung glatter Oberflächen und unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit sollen Duroplaste

— da durch den Füllstoff die Schneidwerkzeuge stark abgestumpft werden — mit *Schnellarbeitsstählen*, besser noch mit *Hartmetall* (Qualitäten H 1 und H 2), bearbeitet werden. Scharfe Schneiden sind Bedingung. Schmier- und Kühlmittel sind *nicht* zu verwenden. Bei Schichtpreßstoffen kann ein Trennen der Schichten eintreten; deshalb legt man Platten aus Leichtmetall oder Holz, die mit zerspant werden, bei. Zur Vermeidung zu hoher Temperaturen sind kleine Vorschübe und hohe Schnittgeschwindigkeiten zu wählen.

Im folgenden verwendete Formelzeichen:

α in °	Freiwinkel,	n in min^{-1}	Drehzahl,
γ in °	Spanwinkel,	r in mm	Spitzenrundungsradius,
ε in °	Spitzenwinkel,		
$\varkappa$ in °	Einstellwinkel,	s in mm/Umdr.	Vorschub,
λ in °	Neigungswinkel,	v in m/min	Schnittgeschwindigkeit.

Drehen. $\alpha = 8°$; $\gamma = 12\cdots25°$; $\varepsilon = 80\cdots90°$; $\varkappa = 45°$; $\lambda = 0°$; $r = 1$ mm; $v = 80\cdots100$ m/min bei $s = 0{,}3$ bis 0,5 mm/Umdr. für Schnellarbeitsstahl; $v = 200\cdots250$ m/min bei $s = 0{,}1\cdots0{,}3$ mm/Umdr. für Hartmetall.

Fräsen. Normale Fräsmaschinen: $\alpha = 20\cdots30°$; $\gamma = 20\cdots25°$; $v = 40\cdots50$ m/min bei $s = 0{,}5\cdots0{,}8$ mm/Umdr. für Schnellarbeitsstahl; $v = 200\cdots300$ m/min bei $s = 0{,}5\cdots0{,}8$ mm/Umdr. für Hartmetall. — *Oberfräsen:* $\alpha = 20\cdots30°$; $\gamma = 10\cdots15°$; $n = 1200\ min^{-1}$; $v = 800\cdots1000$ m/min.

Bohren. $\alpha = 6\cdots8°$; $\gamma = 10°$; $\varepsilon = 60\cdots100°$; Hinterschliff der Schneide 8°; $v = 40\cdots50$ m/min bei $s = 0{,}2\cdots0{,}4$ mm/Umdr. für Schnellarbeitsstahl; $v = 90\cdots120$ m/min bei $s = 0{,}2\cdots0{,}4$ mm/Umdr. für Hartmetall.
Bis 20 mm Bohrung: Drallbohrer; bis 40 mm Bohrung: Zwischenschneider mit Führungszapfen oder Zapfenbohrern; über 40 mm Bohrung: Kreisschneider mit Führungszapfen.

Allgemeine Regeln: Möglichst Bohrer mit steilem Drall und weiten Nuten verwenden, dabei die Ausdehnung infolge der etwa dreifachen Reibungszahl gegenüber Stahl berücksichtigen (Übermaß 0,05···0,1 mm).

Sägen: Bis 25 mm Werkstoffdicke können Kreissägen benutzt werden. Werkstoffe über 25 mm Dicke werden mit Bandsägen getrennt. Kreissägeblätter, ungeschränkt und hohlgeschliffen, aus Schnellarbeitsstahl: $\alpha = 30\cdots40°$, $\gamma = 5\cdots8°$, aus Hartmetall: $\alpha = 10\cdots15°$, $\gamma = 3°$. Bandsägeblätter, geschränkte Zähne: $\alpha = 30\cdots40°$, $\gamma = 5\cdots8°$, Zahnteilung 5···7 mm, Blattbreite 15···25 mm, Blattdicke 0,8···1 mm, $v = 1500\cdots2000$ m/min.

Schleifen: naß; Schleifscheibenkörnung 40···60, -härte L···M, Umfangsgeschwindigkeit 28 m/s.

Hobeln: Hartmetallwerkzeuge H_1, H_2 und G_i mit sehr scharfen Schneiden: $\alpha = 10°$, $\gamma = 15°$, $\lambda = 6°$, $v = 50\cdots100$ m/min, $s = 0{,}3\cdots0{,}5$ mm/Umdr.

Werkstoffgerechte Gestaltung von Formteilen aus Preßmassen

Das durch die Zusammensetzung der Preßmasse bedingte gute Fließvermögen gestattet es, *Formteile mit geringen Wanddicken* und *komplizierter Gestaltung* herzustellen. Die Preßwerkzeuge hierfür sind wegen der erforderlichen Präzision sehr teuer.
Bei der Konstruktion von Plastteilen ist es wichtig, *keine zu engen Toleranzen* zu fordern. Diese können — bedingt durch die beim Erhitzen der Form auftretende Ausdehnung sowie durch die Schwindung der Plaste — nicht in den Grenzen wie bei Metall eingehalten werden. Bei komplizierten Teilen ist die Schwindung nach verschiedenen Richtungen unterschiedlich. Da die Schwindung der einzelnen Preßmassen unterschiedlich ist, muß bei der Konstruktion schon der bestgeeignete Plast festgelegt werden, damit beim Bau des Preßwerkzeugs die Schwindmaße berücksichtigt werden können. Die *Haltbarkeit* von Formteilen ist in hohem Maße von der preßtechnischen Gestaltung abhängig. Infolge der *Kantenempfindlichkeit* der Plaste sind alle Kanten gut zu verrunden. Querschnittsübergänge sollen allmählich verlaufen, damit Materialstauungen vermieden werden. Da die Härtezeit (Stehzeit) sich nach dem größten Querschnitt richtet, sollen möglichst überall gleiche Wanddicken vorliegen. — Teile aus Plasten sollen niemals durch Senkschrauben befestigt werden, da durch die auftretende Sprengwirkung die *Festigkeiten der Plaste* überschritten werden; vielmehr sind Zylinderkopfschrauben zu verwenden. Bei Bohrungen soll der Randabstand ungefähr das 2···2,5fache des Lochdurchmessers betragen. — Einzupressende Metallteile sind so zu gestalten, daß sie gegen Herausziehen und Verdrehen gesichert sind. Einpressen von Muttern in ein Formteil nach TGL 17480. Wirtschaftlicher ist das Einkleben von Metallteilen, da hierdurch bei der Preßformherstellung bedeutende Kosten eingespart werden. — Damit das fertige Teil leichter aus der Form herausgehoben werden kann, sollen alle Flächen des Formteils, die in Richtung auf die Öffnung der Preßform liegen, eine Neigung von etwa 1% aufweisen. — *Silikone* finden Verwendung als Öle, Fette, Lacke, Gummi. Besondere Kennzeichen sind Temperaturbeständigkeit und wasserabweisende Wirkung.

Plast als Werkstoff für Gleitlager

Bereits seit längerer Zeit werden Plastlager mit Erfolg statt Buntmetallager eingesetzt. Es ist jedoch erforderlich, jede Lagerkonstruktion eingehend auf die Umstellmöglichkeit zu überprüfen. Nötigenfalls muß man die Konstruktion abändern, um die Eigenschaften der Plaste zu berücksichtigen.

Hinweise für den Einbau von Plastlagern

a) Welle. Lagerstelle zylindrisch,
Zapfenoberfläche schleifen und möglichst prägepolieren, denn rauhe Oberfläche bewirkt erhöhten Verschleiß,
Stahlqualität nicht unter St 60,
Oberflächenhärtung ist immer vorteilhaft;

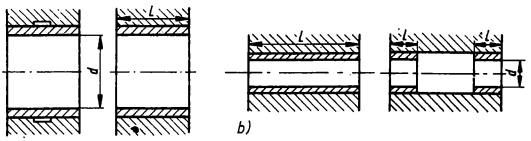


Bild 1.93. Plastlager
a) kurz, b) lang

b) Lager. Plastlager müssen satte Auflage haben (Bild 1.93a),
Lagerlänge soll gleich dem Lagerdurchmesser sein (Bild 1.93b),
Wanddicken nach Herstellervorschrift,
Lagerschalen und Buchsen mit Bund möglichst vermeiden (Anlaufbund separat anordnen),
Hohlkehle darf nicht tragen (Gefahr des Heißlaufens),
Buchsen stets einpressen, niemals einschlagen (Einpreßseite anfasen),
Einpreßübermaße nach Herstellervorschrift,
beim Einpressen Lagerspiel beachten (Verengung gleich Einpreßübermaß),
Lagerspiel größer halten als bei Metallagern (eventuelle Quellung in Rechnung setzen),
bei formgepreßten Lagern Preßhaut entfernen, sonst schlechte Schmierfilmbildung,
Schmiernuten in der drucklosen Zone anbringen und Kanten mit großem Radius verrunden, sonst Schmierfilmunterbrechung möglich (Folge: Herabsetzung der Tragfähigkeit),
Schmiernuten bei geteilten Lagern in Teilfuge als Tasche anbringen und ohne fühlbaren Übergang auslaufen lassen (gute Schmierfilmbildung, hohe Tragfähigkeit),
Schmierung durch Fett, Öl und Emulsion. Reichliche Schmiermittelzuteilung zwecks Abführung der Reibungswärme. Wasserschmierung nur in Ausnahmefällen,
Einlaufen hochbelasteter Lager ohne Last 48 h unter Zusatz kolloidaler Graphitsuspensionen zweckmäßig,
vor Einbau Ölbehandlung (24 h bei 90 °C) vorteilhaft,
Dauer-Betriebstemperatur nicht über 90 °C; höhere Temperaturen zerstören den Füllstoff.

1.6.4.2. Isolierstoffe

Feste Isolierstoffe und Harze

Als Isolierstoffe werden solche Stoffe bezeichnet, die auf Grund ihres *hohen elektrischen Widerstands* einen *geringen Ableitstrom* aufweisen und die in der Lage sind, eine Spannung über einen genügend großen Zeitraum ohne Schaden zu ertragen.
Tabelle 1.70 gibt einen Überblick über die *elektrischen Eigenschaften* gebräuchlicher Isolierstoffe.
Bei Anordnung von zwei oder mehreren Isolierstoffen hintereinander ist die *Spannungsverteilung* infolge unterschiedlicher Dielektrizitätszahlen von Bedeutung. Die Spannungsanteile verhalten sich umgekehrt wie die Dielektrizitätszahlen. Bei Einstoffisolationen sind lediglich Durchschlagspannung und

Tabelle 1.70: Elektrische Eigenschaften von Isolierstoffen

Isolierstoff	Spezifischer elektrischer Widerstand Ω · cm	Dielektrizitätszahl ε_r	Durchschlagfestigkeit kV/mm	Verlustfaktor tan δ bei 50 Hz
a) Feste Isolierstoffe				
Aluminiumoxid		7···8,5		
Epoxid-Gießharz	10^{15}	3,7···3,9	20···45	$3{,}5 \cdot 10^{-3}$···$5 \cdot 10^{-3}$
Elektropappe		3,5···6,0	3	
Glas	10^{13}	3,5···9	10···40	$5 \cdot 10^{-4}$···$1 \cdot 10^{-2}$
Glimmer		6,5	25···40	$2 \cdot 10^{-4}$ bei 1 MHz
Guttapercha		2,5···4,2	10	
Gummi, hart	10^{16}	3,5···5	15···30	$2 \cdot 10^{-3}$···$1 \cdot 10^{-2}$
weich	10^{15}···10^{16}	3,2···4	20···30	$3 \cdot 10^{-3}$··· $1{,}5 \cdot 10^{-2}$
Hartgewebe	$5 \cdot 10^{8}$···10^{13}	4	5···10	$5 \cdot 10^{-2}$
Hartpapier	10^{8}···10^{10}	4···5	15···60	$5 \cdot 10^{-2}$···$8 \cdot 10^{-2}$
Kautschuk		2,5	10	
Keramische Masse				
Typ I		5···100		
Typ II		bis 1000		
Mikanit		3,5···4,5	20···40	
Papier, ölgetränkt	10^{15}	3···4	40···50	$30 \cdot 10^{-3}$···$1 \cdot 10^{-2}$
trocken	10^{15}	2···2,5	10···20	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$···$40 \cdot 10^{-3}$
Paraffin		2,2	11	
Phenolharzpreßstoffe	10^{9}···10^{14}	5···15	5···10	$1 \cdot 10^{-2}$···$3 \cdot 10^{-2}$
Plexiglas	10^{16}	4	35	$5 \cdot 10^{-2}$
Polystyrol	10^{17}	2,5···2,9	55	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$···$2{,}5 \cdot 10^{-4}$
Polyäthylen	10^{16}	2,3	40	$2 \cdot 10^{-4}$···$4 \cdot 10^{-4}$
Polyesterharze	10^{13}···10^{15}	3···7	25···45	$3 \cdot 10^{-3}$···$3 \cdot 10^{-2}$
Porzellan	$> 10^{11}$	6	35	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$···$2{,}5 \cdot 10^{-2}$
PVC	10^{13}···10^{15}	3,4···6	30···50	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$···$1{,}5 \cdot 10^{-1}$
Steatit		6	20···30	
Styroflex		2,5		
Tantalpentoxid		26···27		
Vulkanfiber	10^{8}	2,5	10···15	
Wachs	10^{15}	2,1···2,5	20···30	$6 \cdot 10^{-4}$
b) Flüssige Isolierstoffe				
Trafo-Öl	10^{13}···10^{14}	2···2,5	10···25	$1 \cdot 10^{-4}$···$4 \cdot 10^{-3}$
c) Gasförmige Isolierstoffe				
Vakuum		1,0		
Luft		1,0006		

Oberflächenwiderstand maßgebend. Der Oberflächenwiderstand ist auch von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängig.
Die *spezifische Durchschlagspannung* (in kV/mm) nimmt mit zunehmender Dicke und Dauer der elektrischen Beanspruchung ab. Bei Isolationsschichten von einigen tausendstel Millimeter Dicke kann sie den 3···4fachen Wert der üblichen Angaben (für 5···10 mm Dicke der Isolierstoffe) erreichen.
Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Hartpapier und Hartgewebe sind in den Tabellen 1.71 und 1.72 zusammengestellt. Hartpapier und Hartgewebe werden auch als Basis- (Träger-) Material für gedruckte Schaltungen verwendet; Hartpapier bei normalen, Hartgewebe bei erhöhten Ansprüchen.

Gummifreie Isolierpreßstoffe, Lacke und Öle

Gummifreie Isolierpreßstoffe

entstehen durch Verarbeitung von gummifreien plastischen Massen mit Hilfe eines Preß- oder Spritzverfahrens. Preßverfahren unterscheidet man nach Warm- und Kaltpreßverfahren.
Gummifreie plastische Massen bestehen aus *Bindemitteln* und *Füllstoffen*.

Bindemittel: 1. Natürliche und künstliche Bitumina, 2. Naturharze, 3. Kunstharze (durch Wärmebehandlung härtbar), a) Phenoplaste (durch Kondensation und Polymerisation von Phenol oder Kresol mit Formaldehyd hergestellt), b) Aminoplaste (durch Kondensation und Polymerisation von Harnstoff und Harnstoffderivaten mit Formaldehyd hergestellt), 4. Thermoplastische Kunststoffe (durch Wärmebehandlung *nicht* härtbar), 5. Anorganische Bindemittel.

Füllstoffe: 1. Anorganische: Asbest, Talkum u. dgl. 2. Organische: Holzmehl, Zellstoff, Faserstoffe u. dgl.

Isolierlacke

Öllacke (im Ofen oder an Luft trocknende) sind Lösungen von Harzen, Kunstharzen, Asphalt in Leinöl und Holzöl, denen ein Trockenstoff und flüchtige Lösungsmittel zugesetzt sind.

Flüchtige schnelltrocknende Lacke enthalten als feste Bestandteile meist Schellack (Spirituslacke) oder Zelluloid (Zapon- und Zellonlacke); Lösungsmittel sind Spiritus und Holzgeist. Diese Lacke sind nur als letzte Schicht bei eiligen Instandsetzungen üblich.

Harzlacke (gelb) haben eine etwas höhere Säurezahl als *Asphaltlacke* (schwarz). *Lufttrocknende* schwarze Lacke sind nicht ölfest; lufttrocknende gelbe Lacke gegen warmes Öl beständig (Transformatoren). *Ofentrocknende* Lacke sind stets vorzuziehen (elastischer, widerstandsfähiger gegen elektrische, mechanische und chemische Angriffe). Ofentemperatur 80···90 °C.

Draht-Email ist ein Ofenlack, der auf Drähte bei 180 °C aufgebrannt wird (Lackdrähte).

Silikonlacke werden auf mit Glasseidengarn umsponnenen Wickeldrähten (Glasildrähte) unter Aushärten im Einbrennofen aufgebracht. (Durchschlagfestigkeit 16···18 kV/mm Isolierdicke.)

Klebelack ist ein Spirituslack.

Lackprüfung: Schreibmaschinenpapier wird zweimal durch den Lack gezogen und nach jedem Durchziehen 20 min getrocknet. Lack darf sich nicht lösen, bei Druck nicht plastisch werden oder an den Fingern haften. Die Probe darf beim Falten nicht knistern.

Tabelle 1.71: Hartpapier und Hartgewebe, elektrische Eigenschaften

Typ	Spezifischer Oberflächenwiderstand ϱ_0 Ω min.	1-min-Stehspannung bei 90 °C in Richtung der Schichten 10 mm kV min.	senkrecht zu den Schichten 3 mm kV min.	Dielektrischer Verlustfaktor tan δ bei 0,8 oder 1 kHz max.	Kriechstromfestigkeit Stufe min.
HP 2051	10^8	–	–	–	–
2061	10^8	–	5	–	–
2061.5	$5 \cdot 10^9$	25	60	–	–
2351	10^8	–	6	–	B 360
2551	10^9	–	12	0,27···0,32	B 440
HGW 2081	–	–	–	–	–
2082	–	–	–	–	–
2083	–	–	–	–	–
2372	10^{12}	–	40	0,05	B 120
2572	$5 \cdot 10^{11}$	–	12	0,1	B 480

Tabelle 1.72: Hartpapier und Hartgewebe, mechanische Eigenschaften

Typ	Zusammensetzung	Dichte g/cm³ min.	Biegefestigkeit σ_{bB} MPa min.	Zugfestigkeit σ_{zB} MPa min.	Druckfestigkeit in Richtung der Schichten σ_{dB} MPa min.	Wasseraufnahme bei 4 mm Tafeldicke mg max.
HP 2051	Phenolharz und Asbestpapier	1,60	60	50	80	130
2061	Phenolharz und Zellulosepapier	1,30	130	120	150	500
2061.5	Phenolharz und Zellulosepapier	1,30	100	100	150	300
2351	Epoxidharz und Asbestpapier	1,60	80	60	60	60
2551	Silikonharz und Asbestpapier	1,60	85	45	70	85
HGW 2081	Phenolharz und Baumwollgrobgewebe	1,30	80	50	170	150
2082	Phenolharz und Baumwollfeingewebe	1,30	100	80	170	150
2083	Phenolharz und Baumwollfeinstgewebe	1,30	100	100	170	150
2372	Epoxidharz und Glasseidengewebe	1,70	300	200	280	35
2572	Silikonharz und Glasseidengewebe	1,70	90	90	–	45[1])

[1]) bei 2 mm Tafeldicke

Durchschlagspannung > 5 kV für die 0,12 mm dicke Probe. Dielektrizitätszahl 2,2···3,2.

Isolieröle (Transformatoren- und Schalteröle)

Harzöle (Dielektrizitätszahl 2,2···3,2) sind zwar für Transformatoren verwendbar, aber zu teuer. Für Schalteröle sind sie nicht zugelassen, da sie durch den Lichtbogen stark verkohlen. Von den *Mineralölen* sind die fast ausschließlich verwendeten Erdölraffinate (Dielektrizitätszahl 2,0···2.3) standardisiert. Die Eigenschaften getrockneter Isolieröle für Transformatoren, Wandler und Schalter sind in Tabelle 1.73 nach TGL 17580 angegeben. Isolieröle sind Mineralöle mit guten dielektrischen Eigenschaften. Es gibt Transformatorenöl ohne Alterungsschutzstoff (TRF-G) und solches mit Alterungsschutzstoff (TRF-GL).
Öl wird bei *Alterungsprüfung* nach BAADER 72 h bei 95 °C unter Luftzutritt und Rühren in Gegenwart einer Kupferspule künstlich gealtert und die Verseifungszahl (VzCu) ermittelt (VzCu < 0,4). Nach Erkalten muß das Öl klar sein, keinen in FAM-Benzin unlöslichen Schlamm enthalten und die Kupferspule blank bleiben. Öl, das bei 150 °C knarrt (spratzt), muß getrocknet werden.

Gebrauchsöl: Ölprobe aus im Betrieb befindlichem Gerät.

Einfüllöl: zum Einfüllen vorbereitetes Anlieferungsöl oder getrocknetes Gebrauchsöl.

Anlieferungsöl aus Kesselwagen und Fässern im Anlieferungszustand. Vor Entleeren der Kesselwagen Wasser ablassen, das Öl trocknen; es soll in einer 10 cm dicken Schicht bei 20 °C durchsichtig sein, keine festen Fremdstoffe enthalten und keine Abscheidungen zeigen.

1.6.5. Stahl

Stahl ist allgemein der Sammelbegriff für Legierungen des Eisens mit Kohlenstoff und anderen Bestandteilen meist metallischer Art. Die in der Eisenhüttentechnik hergestellten Stoffe nennt man *Roheisen* und *Stahl* (Schweißstahl bzw. Flußstahl) (Tabelle 1.74). Man unterscheidet *nichthärtbaren Stahl* (früher Schmiedeeisen) und *härtbaren* Stahl. Schmiedbarer Stahl (außer Magnetkerneisen) unter 0,05% Kohlenstoffgehalt wird technisch nicht verwertet.

Tabelle 1.73: Eigenschaften von Isolierölen

Bezeichnung	Einheit		TRF-G	TRF-GL
Viskosität bei 20 °C	mm^2/s	höchstens	30	
Viskosität bei −30 °C	mm^2/s	höchstens	1800	
Dichte	g/ml	höchstens	0,900	
Flammpunkt	°C	mindestens	140	
Stockpunkt	°C	höchstens	−45	
Neutralisationszahl	mg · KOH/g	höchstens	0,05	
Durchschlagspannung	kV	mindestens	60	
Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz und 90 °C	tan δ	höchstens	$4 \cdot 10^{-3}$	
Alterungsneigung 72 h				
Verseifungszahl	mg · KOH/g	höchstens	0,20	–
dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz und 90 °C	tan δ	höchstens	$4{,}5 \cdot 10^{-2}$	–
Schlamm	%	höchstens	frei	–
Alterungsneigung 28 d Typprüfung				
dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz und 90 °C	tan δ	höchstens	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Schlamm	%	höchstens	0,05	0,01
Alterungsschutzstoffgehalt	%		–	0,30···0,35
Korrosionswirkung			keine	
Äußere Beschaffenheit			durchsichtig, klar, frei von festen Fremdstoffen	

Tabelle 1.74: Roheisen und Stahl

Art	Gewinnung	Stahl	Kohlenstoff	Eigenschaften
Roheisen	Gießereieisen, im Hochofen gewonnen		2,3···6%	schmelzbar, zum Gießen geeignet; spröde, nicht schmiedbar
Schmiedbarer Stahl	früher in teigigem Zustande gewonnen (Puddelofen), jetzt in flüssigem Zustand gewonnen (BESSEMER-, THOMAS-Birne, MARTIN-Ofen)	Schweißstahl	0,6···2,3%	sehnig, schlackenhaltig, härtbar
		Schweißschmiedestahl	0,05···0,6%	sehnig, schlackenhaltig, nicht härtbar
		Flußstahl	0,1···0,6%	körnig, schlackenrein, härtbar
		Flußschmiedestahl	0,05···0,6%	körnig, schlackenrein, nicht härtbar

Tabelle 1.75: Fremdstoffgehalt gebräuchlicher Stahl- und Gußsorten und der Stahlgattierungen (Stahlmischungen)

Stahl- bzw. Gußsorte	Kohlenstoff %	Silizium (Sand) %	Mangan (Metall) %	Phosphor %	Schwefel %	Kupfer %
	erniedrigt den Schmelzpunkt und macht spröde	begünstigt C-Ausscheidung, graue Farbe; faulbrüchig	erhöht Schmelzbarkeit und Härte	macht dünnflüssig, vermindert Festigkeit; kaltbrüchig	macht dickflüssig und rotbrüchig	macht dicht und erhöht die Schmelzbarkeit
Grauguß, grau (über 1% Silizium)	3···5	1···3,3	0,5···2	0,1···0,5	0,2···0,4	0···0,06
Grauguß, weiß (unter 1% Silizium)	3···5	bis 1	bis 6 (über 4,5% Spiegeleisen)	0,2···1,0	0,2···0,4	0···0,06
Maschinenguß	2,5···4	1···3	0,3···0,9	0,2···1	unter 0,07	0···0,06
Hämatitguß	3,5···4,5	2···3	≈ 1	≈ 0,1	unter 0,07	≈ 0,025
Bauguß	2,5···3,5	1···3	0,5···1,2	0,2···1	0,08···0,15	–
Hartguß	unter 3,8	0,5···0,9	0,2···0,5	0,2···0,5	0,08···0,15	bis 0,3
Temperguß (vor dem Tempern)	≈ 3	0,5···1	0,2···0,3	unter 0,1	–	–
Stahlguß	0,4···1	0,2···0,4	0,5···1	0,016	0,03	0,07···1,5 Ni
Dynamostahlguß	0,1···0,2	0,2···0,4	0,2···0,3	Spuren	Spuren	–
Feinkornstahl	0,05···0,6	bis 0,1	0,1···0,15	≈ 0,1	≈ 0,01	–
BESSEMER-Flußstahl	0,2···0,6	0,25···0,35	0,4···1	0,06···0,1	0,03···0,06	–
THOMAS-Flußstahl	0,05···0,5	0···0,01	0,6···1	0,04···0,1	0,02···0,04	–
SIEMENS-MARTIN-Stahl	0,15···0,5	bis 0,01	0,5···1	0,05···0,1	0,02···0,05	–

Während bei *Eisen-Kohlenstoff-Stählen* die Härtungsabkühlung von 700 °C auf 200 °C in etwa 6···7 s zu erfolgen hat, geht die Härtung der *Edelstähle* mit Metallzusatz (Ni Nickel, Cr Chrom, Mn Mangan, Mo Molybdän, W Wolfram, V Vanadin) bei langer und sehr langer Abkühlungszeit vor sich. Je nach der Menge (und Art) der Zusatzmetalle teilt man die Edelstähle in *Ölhärter, Lufthärter, Selbsthärter* und *naturharte Stähle* ein.
Je langsamer die Abkühlung erfolgt, desto weniger innere Spannungen weisen die Stahlstücke auf.

Schnellarbeitsstahl enthält außer Kohlenstoff und geringen Zusätzen von Cr und V hauptsächlich W. Durch den hohen Wolframgehalt ist die Wärmeleitfähigkeit gering. Man erhitzt ihn deshalb langsam auf Kirschrotglut und darauf (zur Oberflächenbeeinflussung) schnell auf Weißglut; dann wird er in Öl abgekühlt. Schnellarbeitsstahl verträgt bis zu 1350 °C Hitze, ohne daß er grobkörnig wird oder verbrennt.

Stahlguß von etwa 1,5%···2,3% Kohlenstoffgehalt wird technisch nicht verwertet.
Die Anteile von Fremdstoffen in gebräuchlichen Stahl- und Gußsorten sind in Tabelle 1.75 angegeben.

1.6.5.1. Allgemeine Baustähle

Die mechanischen Eigenschaften von allgemeinen Baustählen sind nach TGL 7960 auszugsweise in Tabelle 1.76 angegeben. Dieser Standard *gilt* für diejenigen unlegierten und niedrig legierten Stähle, die üblicherweise im warmverformten Zustand, in geringerem Umfang auch nach Normalglühen vor allem wegen ihrer Zugfestigkeit und Streckgrenze bei klimatischen Temperaturen verwendet werden. Er gilt weiter für Schmiedestücke, Stabstahl, Profilstahl, Breitflachstahl, Bandstahl, Stahldraht und Grobblech aus diesen Stählen und das entsprechende warmverformte Vormaterial.

Tabelle 1.76: Mechanische Eigenschaften von allgemeinen Baustählen

Stahlmarke der Gütegruppe			Streckgrenze N/mm² bei Dicken in mm			Zugfestigkeit σ_{zB} MPa
1	2	3	20	20···40	40···100	
St 33	—	—	keine Forderung			330
St 34	St 34 u–2	St 34–3	220	210	200	340···420
	St 34 hb–2					
	St 34 b–2					
St 38	St 38 u–2	St 38–3	240	230	220	380···470
St 38 S	St 38 hb–2					
	St 38 b–2					
St 42	St 42 u–2	St 42–3	260	250	240	420···520
	St 42 hb–2					
	St 42 b–2					
St 50	St 50 –2	—	300	290	280	500···620
—	—	St 52–3	360	350	340	520···620
St 60	St 60 –2	—	340	330	320	600···720
St 70	St 70 –2	—	370	360	350	700···850

Er *gilt nicht* für den Stahlbetonbau und nicht für Stahl, der durch Kaltverformung, z. B. durch Kaltwalzen, Ziehen, Pressen, Schlagen, Bördeln, in seinen Eigenschaften verändert worden ist.

Ferner gelten für

Kettenstähle	TGL 6544,
Nietstähle	TGL 6545,
Einsatzstähle	TGL 6546,
Vergütungsstähle	TGL 6547,
nahtlose Stahlrohre, warm gewalzt	☆ TGL[1]) 9012,
kalt gezogen	☆ TGL[1]) 9013.

Stahl wird in verschiedenen *Gütegruppen* gemäß Herstellungsverfahren angeboten:

[1]) ☆ bedeutet, Standard ist auch in anderen sozialistischen Staaten gültig.

Gütegruppe 1. Der Stahl wird im Konverter erschmolzen und unberuhigt (u) oder beruhigt (b) vergossen. SIEMENS-MARTIN-Stahl oder das Sauerstoffaufblasverfahren entspricht der gleichen Forderung.

Gütegruppe 2. Der Stahl wird im SIEMENS-MARTIN-Ofen erschmolzen und unberuhigt (u), beruhigt (b) oder halbberuhigt (hb) vergossen.

Gütegruppe 3. Der Stahl wird im SIEMENS-MARTIN-Ofen erschmolzen und besonders beruhigt (z. B. mit Aluminium) in Feinkornstählen vergossen. Sonderverfahren, z. B. Sauerstoffaufblasverfahren, können die gleichen Forderungen erfüllen.

Die *farbige Kennzeichnung* allgemeiner Baustähle und deren Gütegruppen ist in Tabelle 1.77 nach TGL 7960 mit den zugehörigen Kennzahlen angegeben.

Tabelle 1.77: Kennzeichnung von allgemeinen Baustählen

Gütegruppe	Stahlmarke	Kennfarbe	Kennzahl
1	St 33	—	—
	St 34	gelb-weiß	0100
	St 38	gelb-rot	0130
	St 42	gelb-schwarz	0150
	St 50	gelb-lila	0170
	St 60	gelb-grau	0180
	St 70	gelb-braun	0190
	St 38 S		
2	St 34 u–2	gelb	0010
	St 34 b–2	grün	0020
	St 38 u–2	rot	0030
	St 38 b–2	blau	0040
	St 42 u–2	schwarz	0050
	St 42 b–2	orange	0060
	St 50–2	lila	0070
	St 60–2	grau	0080
	St 70–2	braun	0090
	St 34 hb–2	rot-weiß	0300
	St 38 hb–2	rot-gelb	0310
	St 42 hb–2	rot-grün	0320
3	St 34–3	rot-schwarz	0350
	St 38–3	rot-orange	0360
	St 42–3	rot-lila	0370

1.6.5.2. Werkzeugstähle und Hartmetalle

Werkzeugstähle sind besonders harte und temperaturbeständige Stahlsorten, deren Eigenschaften durch besondere *Legierungszusätze* erreicht werden.

Hartmetalle bestehen aus hochschmelzenden Metallkarbiden, den sog. *Hartstoffen*, z. B. Wolframkarbid, Titankarbid oder Mischkarbiden beider oder ähnlicher Metalle, sowie den sog. *Bindemetallen*, z. B. Kobalt, Eisen oder Nickel.

Wolfram-Karbidgruppe, z. B. G1, G2, H1; 2···6% C, 80 bis 95% W, 6···11% Co und Mo, V, Ni.

Wolfram-Titankarbidgruppe, z. B. F1, S1, S2, S3; 4···8% C, 70···80% W, 6···8% Co, 6···12% Ti, Mo, V, Ni.

Kobaltstahl leistet etwa das 1,2fache, *gegossene Hartmetall-Legierung* das 2fache, *Sinterhartmetalle* das 3fache *des Schnellarbeitsstahls* (beim Schruppen).
Sinterhartmetalle können beim Arbeiten hellrot (über 900 °C) werden, ohne daß die Schneide an Schärfe verliert. Sinterhartmetalle werden durch Mischen, Pressen und Sintern (Zusammenbacken) von Karbid- und Metallpulvern hergestellt. Sinterhartmetalle, fast diamanthart, eignen sich zur Bearbeitung aller Werkstoffe und werden als Plättchen auf die Werkzeuge gelötet; Schnittgeschwindigkeit bis zu 1000% höher als bei Schnellarbeitsstählen; besondere Schleifscheiben sind notwendig.

1.6.6. Nichteisenmetalle

Einigen Nichteisenmetallen, außer Leiterwerkstoffen und Loten, kommt Bedeutung für besondere Zwecke zu. Die Tabellen 1.78···1.80 geben für einige Nichteisenmetalle die Zusammensetzung und die Verwendungsgebiete an.

Tabelle 1.78: Zusammensetzung von Bleisorten (nach TGL 14719)

Benennung	Kurzzeichen	Pb % (mind.)	Zulässige Beimengungen in %								Anwendung
			Gesamt	Bi	Ag	Cu	As	Sb + Sn	Fe	Zn	
Feinblei	Pb 99,99	99,99	0,01	0,005	0,001	0,001	0,001	Sb 0,001 Sn 0,001	0,001	0,001	Herstellung von Bleimennige, Bleiweiß, Bleiglätte und optischen Gläsern, Akkumulatorenplatten und chemischen Apparaten
	Pb 99,985	99,985	0,015	0,01	0,001	0,001	0,001	Sb 0,002 Sn 0,001	0,001	0,001	
Hüttenblei	Pb 99,94	99,94	0,06	0,05	0,001	0,005	0,005	0,01	0,005	0,005	Kabelummantelung; Legierungen für chemischen Apparatebau, je nach Anforderung, Akkumulatorenzubehör
	Pb 99,90	99,90	0,10	0,09	0,002	0,05	0,005	0,02	0,005	0,005	

Tabelle 1.79: Nickel- und Nickellegierungen für Elektronenröhren und Glühlampen (nach TGL 8251)

Benennung	Kurzzeichen	Ni % (mind.)	Zulässige Beimengungen (höchstens) in %								Anwendung
			Mg	Mn	Si	Fe	Cu	C	S	Pb + Zn + Cd + As	
Reinstnickel	NiR 99,9	99,9	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	—	0,003	0,005	hochbeanspruchte Katoden in Spezialröhren und für Katoden in Röhren mit starker Bereitschaftsstellung
Nickel	Ni 99	99	0,07	0,15	0,1	0,3	0,2	0,1	0,005	Pb; Zn; Cd; As; Bi je 0,005	Anoden, Bleche, Streben für Elektronenröhren sowie Aufbauteile und thermisch hochbelastete Elektroden für Glühlampen
	Ni 98	98	0,15	0,5	0,2	0,5	0,3	0,1	0,05	0,005	Aufbauteile und Elektroden in Glühlampen

Tabelle 1.80: Zusammensetzung von Zinksorten (nach ☆ TGL 14706)

Benennung	Kurzzeichen	Zn % (mind.)	Zulässige Begleitelemente (höchstens) in %						Anwendung
			Gesamt	Pb	Cd	Sn	Fe	Cu	
Feinzink	Zn 99,995	99,995	0,005	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	Hochbau für Rinnen, Rohre, Verkleidungen; Elektrotechnik (verzinkter Draht) Zinkplatten (galvanische Elemente)
	Zn 99,99	99,99	0,010	0,005	0,003	0,001	0,003	0,001	
	Zn 99,975	99,975	0,025	0,02	0,005	0,001	0,007	0,002	
	Zn 99,96	99,96	0,04	0,015	0,01	—	0,01	0,001	
	Zn 99,9	99,9	0,1	0,05	0,02	—	0,04	0,002	
Hüttenzink	Zn 98,5	98,5	1,5	1,3	—	—	—	—	

1.6.7. Halbzeuge

1.6.7.1. Dynamoblech

Feinbleche aus Siliziumstahl werden für magnetische Kreise verwendet. Tabelle 1.81 gibt die Blechsorten warm gewalzter Bleche mit Ummagnetisierungsverlusten bei 50 Hz nach TGL 10475 an.

1.6.7.2. Stahlblech

Tabelle 1.82 enthält die Abmessungen von Stahlfeinblech, warm gewalzt, nach TGL 8445. Die Abmessungen von Stahlgrobblech, warm gewalzt, nach TGL 8446 sind Tabelle 1.83 zu entnehmen.

1.6.7.3. Flachstahl und Stahlprofile

Charakteristische Größen von *Flachstahl*, warm gewalzt, sind nach TGL 7973 der Tabelle 1.84 zu entnehmen. Die Tabellen 1.85 und 1.86 enthalten Angaben über *Winkelstahl*, warm gewalzt, gleichschenklig und ungleichschenklig.
In den Tabellen 1.87···1.89 sind Daten von *Stahlleichtprofilen*, kalt geformt, enthalten, und zwar nach TGL 7966 Daten von gleichschenkligem *Winkelstahl* in Tabelle 1.87, nach TGL 7967 Daten von ungleichschenkligem Winkeleisen in Tabelle 1.88. Weitere Daten sind den genannten Standards zu entnehmen. Tabelle 1.89 enthält Daten für eine Auswahl von *U-Stahl* $h \neq b$, kalt geformt, aus TGL 7969. (Im Standard TGL 7968 sind die Werte für U-Stahl $h = b$, kalt geformt, festgelegt.)

Tabelle 1.81: Dynamobleche

Blechsorte	Dicke	Ummagnetisierungsverluste (höchstens) in W/kg bei		Verlustzunahme durch Alterung bei 1,5 Wb/m²
	mm	$l'_{1,0}$	$l'_{1,5}$	%
I 8,0	1	8,0	19,0	—
I 3,6	0,5	3,6	8,6	9
I 3,2		3,2	7,5	7
II 2,8		2,8	6,5	
III 2,5		2,5	6,1	6
III 2,2		2,2	5,3	
III 2,0		2,0	4,9	5
IV 1,8		1,8	4,4	
IV 1,6		1,6	3,9	4
IV 1,4		1,4	3,4	
IV 1,4	0,35	1,4	3,4	
IV 1,3		1,3	3,1	
IV 1,2		1,2	2,9	
IV 1,1		1,1	2,7	
IV 1,0		1,0	2,6	
IV 0,6		0,9	2,4	

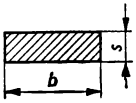
Tabelle 1.82: Stahlfeinblech (warm gewalzt)

Blechdicke	Tafelbreite in mm									
	600	650	710	750	800	900	1000	1250	1400	1500
mm	Maximale Länge (unterhalb der maximalen Längen in Stufungen von 100 mm zu 100 mm)									
0,5	1900	1900	1900	1900	1900	2000	2000			
0,55	1900	1900	1900	1900	1900	—	—			
0,6	1900	1800	1800	1800	1800	2000	2000			
0,65	1800	1800	1800	1800	1800	—	—			
0,7	1800	1800	1800	1800	1800	2000	2000			
0,75	1800	1800	1800	1800	1800	2000	—			
0,8	1800	1800	1800	1800	1800	2000	2000			
0,9	1800	1800	1800	1800	1800	2000	2000			
1	1800	1800	1800	1800	1800	2200	2200	2500		
1,25	1800	1800	1800	1800	1800	1700	2000	2500		
1,5	1800	1800	1800	1800	1800	2500	2500	—		
1,75					1600	2000	2000	—		
2					1600	2000	2500	3000	3000	3000
2,25					—	2000	2000	3000	3000	3000
2,5					—	1800	2000	2500	2500	2500
2,75					—	1600	2000	2000	2000	2000
3					1600	1600	2200	2500	2200	2200
3,25							2000	2300	2000	2000
3,5							2000	2000	1800	1800
3,75							2500	1800	1600	1600

Tabelle 1.83: Stahlgrobblech (warm gewalzt)

Blechdicke	Tafelbreite in mm										
	600	800	1000	1250	1400	1500	1600	(1700)	1800	(1900)	2000
mm	Maximale Länge in mm										
4	2000	2000	2600	2600							
4,5	2000	2000	2200	2200							
5			2000	—							
5,5			2000	—							
6			6500	—							
7			5200	—							
8			6000	—	8300	7800	7300	6900	7300	6900	6600
9			5500	8400	7400	6900	6500	6100	6400	6100	5800
10			9000	8400	7500	7000	6600	6200	5800	5500	5300

Tabelle 1.84: Flachstahl (Maße in mm)

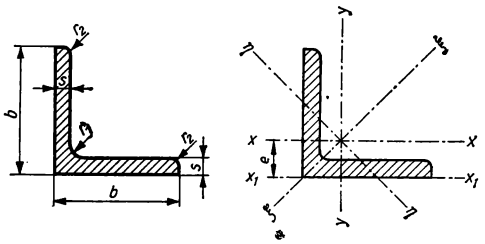


Breite b	zulässige Abweichung	Dicke s						
		4	5	6	7	8	9	10
		zulässige Abweichung						
		+0,3 −0,5			+0,2 −0,5			
		Masse je m in kg						
12		0,38	0,47	0,57	0,66	0,75	—	—
14		0,44	0,55	0,66	0,77	0,88	—	—
16		0,50	0,63	0,75	0,86	1,00	1,15	1,26
18		0,57	0,71	0,85	0,99	1,13	1,27	1,41
20		0,63	0,79	0,94	1,10	1,26	1,41	1,57
22		0,69	0,86	1,04	1,21	1,38	1,55	1,73
24		0,754	0,94	1,13	1,32	1,51	1,70	1,88
25		0,79	0,98	1,18	1,37	1,57	1,77	1,96
26		0,816	1,02	1,22	1,43	1,63	1,84	2,04
28	+0,5	0,88	1,10	1,32	1,54	1,76	1,98	2,20
30	−1,0	0,94	1,18	1,41	1,65	1,88	2,12	2,36
32		1,01	1,25	1,50	1,76	2,0	2,26	2,54
34		1,07	1,33	1,60	1,87	2,14	2,40	2,67
36		1,13	1,41	1,69	1,97	2,26	2,51	2,82
38		1,19	1,49	1,79	2,09	2,39	2,69	2,98

Tabelle 1.84 (Fortsetzung)

Breite b	zulässige Abweichung	Dicke s						
		4	5	6	7	8	9	10
		zulässige Abweichung						
		+0,3 −0,5			+0,2 −0,5			
		Masse je m in kg						
40		1,26	1,57	1,88	2,20	2,51	2,83	3,14
42		1,32	1,65	1,98	2,38	2,64	2,97	3,30
45		1,41	1,77	2,12	2,47	2,83	3,18	3,53
48		1,51	1,88	2,26	2,64	3,01	3,39	3,77
50		1,57	1,96	2,36	2,75	3,14	3,53	3,93
53	+0,5 −1,2	1,66	2,08	2,50	2,91	3,33	3,70	4,16
56	−1,1	1,76	2,20	2,64	3,08	3,52	3,95	4,39
60	+0,5 −1,3	1,88	2,36	2,83	3,30	3,77	4,24	4,71
65	+0,5	2.04	2,55	3,06	3,57	4,08	4,59	5.10
70	+0,5	2,20	2,75	3,30	3,85	4,40	4,95	5,50
75	−1,4	2,36	2,94	3,53	4,12	4,71	5,30	5,89
80	+0,7	2,51	3,14	3,77	4,40	5,02	5,65	6,28
85	−1,6	2,67	3,34	4,00	4,67	5,34	6,01	6,67
90	+0,9	2,83	3,53	4,24	4,95	5,65	6,36	7,07
95	−1,8	2,98	3,73	4,47	5,22	5,97	6.71	7,46
100	+1,0 −2,0	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85

Tabelle 1.85: Gleichschenkliger Winkelstahl (warm gewalzt)

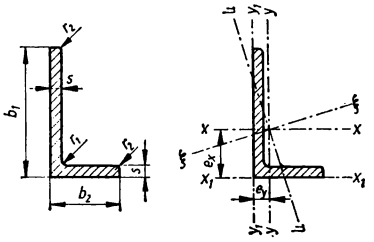


b	Schenkelbreite
s	Schenkeldicke
r_1	Innenhalbmesser
r_2	Rundungshalbmesser
I	Trägheitsmoment
W	Widerstandsmoment
i	Trägheitshalbmesser
e	Abstand des Schwerpunkts von der Achse $x_1 - x_1$

Kurzzeichen	b	s	r_1	r_2	Quer-schnitt	Masse[1]) je 1 m	Statische Werte für die Achsen										e
							$x-x=y-y$			$\xi-\xi$			$\eta-\eta$			x_1-x_1	
⌞ E	mm	mm	mm	mm	cm²	kg	I_x cm⁴	W_x cm³	i_x cm	I_ξ cm⁴	W_ξ cm³	i_ξ cm	I_η cm⁴	W_η cm³	i_η cm	I_{x1} cm⁴	cm
20 × 3	20	3	3,5	1,5	1,13	0,88	0,39	0,28	0,59	0,62	0,44	0,74	0,17	0,20	0,38	0,80	0,60
4		4			1,46	1,14	0,49	0,36	0,58	0,77	0,55	0,73	0,21	0,24	0,38	1,09	0,64
22 × 3	22	3	3,5	1,5	1,25	0,98	0,54	0,35	0,66	0,85	0,55	0,83	0,22	0,24	0,42	1,06	0,65
4		4			1,62	1,27	0,68	0,45	0,65	1,06	0,68	0,81	0,29	0,30	0,42	1,44	0,69
25 × 3	25	3	3,5	1,5	1,43	1,12	0,81	0,46	0,75	1,28	0,72	0,95	0,34	0,33	0,49	1,56	0,72
4		4			1,86	1,46	1,02	0,59	0,74	1,61	0,91	0,93	0,43	0,40	0,48	2,10	0,76
28 × 3	28	3	4	1,5	1,61	1,27	1,16	0,58	0,85	1,84	0,93	1,07	0,48	0,43	0,55	2,19	0,80
4		4			2,10	1,65	1,47	0,75	0,84	2,33	1,18	1,05	0,62	0,52	0,54	2,95	0,84
32 × 3	32	3	4,5	1,5	1,68	1,46	1,77	0,77	0,98	2,81	1,24	1,23	0,74	0,58	0,63	3,26	0,89
4		4			2,43	1,91	2,26	1,00	0,96	3,58	1,58	1,21	0,94	0,71	0,62	4,39	0,94
36 × 3	36	3	4,5	1,5	2,10	1,65	2,56	0,98	1,10	4,06	1,60	1,39	1,06	0,75	0,71	4,64	0,99
4		4			2,75	2,16	3,29	1,28	1,09	5,21	2,05	1,38	1,36	0,93	0,70	6,24	1,04
40 × 3	40	3	5	2	2,35	1,84	3,53	1,21	1,23	5,60	1,98	1,54	1,46	0,95	0,79	6,31	1,09
4		4			3,08	2,42	4,56	1,59	1,22	7,22	2,55	1,53	1,89	1,18	0,78	8,49	1,13
5		5			3,79	2,97	5,51	1,95	1,21	8,72	3,08	1,52	2,29	1,38	0,78	10,7	1,17
45 × 3	45	3	5	2	2,65	2,08	5,10	1,55	1,39	8,09	2,54	1,75	2,11	1,23	0,89	8,99	1,21
4		4			3,48	2,73	6,60	2,03	1,38	10,5	3,29	1,74	2,72	1,53	0,89	12,1	1,26
5		5			4,29	3,36	8,01	2,50	1,37	12,7	3,99	1,72	3,31	1,81	0,88	15,2	1,30
50 × 3	50	3	5,5	2	2,96	2,32	7,08	1,93	1,55	11,2	3,18	1,95	2,94	1,56	1,00	12,3	1,33
4		4			3,89	3,05	9,19	2,54	1,54	14,6	4,13	1,94	3,79	1,95	0,99	16,6	1,38
5		5			4,80	3,77	11,2	3,12	1,53	17,7	5,02	1,92	4,62	2,30	0,98	20,8	1,42
6		6			5,69	4,46	13,0	3,68	1,51	20,7	5,85	1,91	5,42	2,63	0,98	25,1	1,46
56 × 3,5	56	3,5	6	2	3,86	3,03	11,6	2,83	1,73	18,4	4,65	2,18	4,80	2,26	1,12	20,3	1,50
4		4			4,38	3,44	13,1	3,21	1,73	20,8	5,25	2,18	5,41	2,51	1,11	23,3	1,52
5		5			5,41	4,25	16,0	3,96	1,72	25,4	6,40	2,16	6,59	2,97	1,10	29,2	1,57
6		6			6,42	5,04	18,7	4,68	1,71	29,6	7,48	2,15	7,69	3,38	1,09	35,3	1,61
63 × 4	63	4	7	2,5	4,96	3,89	18,7	4,06	1,94	29,7	6,67	2,45	7,68	3,20	1,24	32,9	1,70
5		5			6,13	4,81	22,9	5,02	1,93	36,4	8,17	2,44	9,38	3,81	1,24	41,4	1,74
6		6			7,28	5,71	27,0	5,97	1,93	42,9	9,62	2,43	11,2	4,44	1,24	50,0	1,78

[1]) berechnet mit einer Dichte von 7,85 kg/dm³

Tabelle 1.86: Ungleichschenkliger Winkelstahl (warm gewalzt)

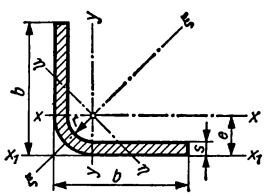


b_1, b_2 Schenkelbreite
s Schenkeldicke
r_1 Innenhalbmesser
r_2 Rundungshalbmesser der Schenkel
I Trägheitsmoment
W Widerstandsmoment
i Trägheitshalbmesser
e_x Abstand des Schwerpunkts von der Achse $x_1 - x_1$
e_y Abstand des Schwerpunkts von der Achse $y_1 - y_1$
α Neigungswinkel der Achse $\eta - \eta$ zur Achse $y - y$

Kurzzeichen	b_1	b_2	s	r_1	r_2	Querschnitt	Masse[1]) je 1 m	Statische Werte für die Achsen													tan α
								$x - x$			$y \quad y$			$x_1 - x_1$		$y_1 - y_1$		$\eta - \eta$			
⌞ E	mm	mm	mm	mm	mm	cm²	kg	I_x cm⁴	W_x cm³	i_x cm	I_y cm⁴	W_y cm³	i_y cm	I_{x_1} cm⁴	e_{x_1} cm	I_{y_1} cm⁴	e_{y_1} cm	I_η cm⁴	W_η cm³	i_η cm	
25 × 16 × 3	25	16	3	3,5	1,5	1,16	0,91	0,69	0,42	0,77	0,22	0,18	0,43	1,54	0,86	0,42	0,42	0,13	0,15	0,33	0,391
32 × 20 × 3	32	20	3	3,5	1,5	1,49	1,17	1,51	0,71	1,01	0,46	0,30	0,55	3,24	1,08	0,81	0,49	0.27	0,25	0,43	0,383
4			4			1,94	1,52	1,91	0,92	0,99	0,57	0,39	0,54	4,35	1,12	1,11	0,53	0,35	0,32	0,42	0,376
40 × 25 × 3	40	25	3	4	1,5	1,88	1,48	3,05	1,14	1,27	0,92	0,48	0,70	6,35	1,32	1,57	0,59	0,55	0,40	0,54	0,386
4			4			2,47	1,94	3,93	1,49	1,26	1,17	0,62	0,69	8,50	1,36	2,13	0,62	0,71	0,52	0,53	0,380
45 × 28 × 3	45	28	3	5	2	2,14	1,68	4,36	1,44	1,43	1,30	0,60	0,78	8,97	1,47	2,18	0,64	0,78	0,51	0,60	0,379
4			4			2,80	2,20	5,62	1,88	1,42	1,66	0,78	0,77	12,0	1,51	2,96	0,68	0,99	0,65	0,60	0,380
50 × 32 × 3	50	32	3	5,5	2	2,42	1,90	6,14	1,80	1,59	1,98	0,80	0,90	12,3	1,60	3,25	0,72	1,17	0,67	0,70	0,404
4			4			3,17	2,49	7,93	2,36	1,58	2,53	1,04	0,89	16,5	1,65	4,39	0,77	1,50	0,86	0,69	0,402
56 × 36 × 3,5	56	36	3,5	6		3,16	2,48	10,1	2,65	1,79	3,29	1,18	1,02	20.3	1,80	5,43	0,82	1,94	0,99	0,78	0,408
4			4			3,58	2,81	11,3	3,00	1,78	3,69	1,34	1,02	23,2	1,82	6,24	0,84	2,17	1,11	0,78	0,407
5			5			4,41	3,46	13,8	3,69	1,77	4,45	1,64	1,00	29,1	1,87	7,90	0,88	2,63	1,35	0,77	0,404
63 × 40 × 4	63	40	4		2,5	4,04	3,17	16,3	3,81	2,01	5,14	1,66	1,13	32,9	2,03	8,49	0,91	3,06	1,39	0,87	0,397
5			5			4,98	3,91	19,9	4,70	2,00	6,23	2,04	1,12	41,3	2,08	10,7	0,95	3,71	1,70	0,86	0,396
6			6			5.90	4,63	23,2	5,56	1,98	7,25	2,41	1,11	49,8	2,12	13,0	0,99	4,33	1,99	0,86	0,393
8			8			7,68	6,03	29,5	7,20	1,96	9,10	3,10	1,09	66,8	2,20	17,9	1,07	5,54	2,57	0,86	0,386

[1]) berechnet mit einer Dichte von 7,85 kg/dm³

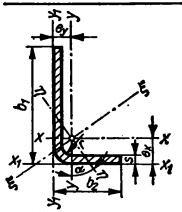
Tabelle 1.87: Gleichschenkliger Winkelstahl (kalt geformt)



b Schenkelbreite
s Schenkeldicke
r Innenhalbmesser
I Trägheitsmoment
i Trägheitshalbmesser
W Widerstandsmoment
e Schwerpunktabstand

Kurzzeichen	*b*	*s* = *r*	Querschnitt	Masse je 1 m	Statische Werte für die Achsen								*e*
					x − *x* = *y* − *y*			*ξ* − *ξ*		*η* − *η*		$x_1 - x_1$	
L	mm	mm	cm²	kg	I_x cm⁴	W_x cm³	i_x cm	I_ξ cm⁴	i_ξ cm	I_η cm⁴	i_η cm	I_{x_1} cm⁴	cm
16 × 0,4	16	0,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,7		0,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1		1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5		1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2		2,0	0,57	0,45	0,14	0,12	0,49	0,22	0,62	0,05	0,29	0,28	0,49
20 × 0,4	20	0,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,7		0,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1		1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5		1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2		2,0	0,73	0,58	0,28	0,20	0,61	0,45	0,79	0,10	0,37	0,54	0,59
25 × 0,7	25	0,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1		1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5		1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2		2,0	0,93	0,73	0,56	0,32	0,78	0,92	0,99	0,21	0,47	1,04	0,72
2,5		2,5	1,15	0,90	0,70	0,39	0,77	1,11	0,99	0,25	0,46	1,31	0,74
32 × 1	32	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5		1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2		2,0	1,21	0,95	1,22	0,53	1,00	1,98	1,28	0,46	0,62	2,19	0,89
2,5		2,5	1,50	1,18	1,49	0,65	1,00	2,42	1,27	0,55	0,61	2,74	0,92
32 × 3	32	3,0	1,77	1,39	1,73	0,77	0,99	2,83	1,26	0,63	0,60	3,29	0,94
40 × 1	40	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5		1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2		2,0	1,53	1,20	2,44	0,84	1,26	3,95	1,61	0,94	0,79	4,27	1,09
2 5		2,5	1,90	1,49	2,99	1,04	1,25	4,84	1,60	1,13	0,77	5,35	1,11
3		3,0	2,25	1,77	3,50	1,22	1,25	5,70	1,59	1,31	0,76	6,42	1,14
4		4,0	2,94	2,31	4,45	1,58	1,23	7,29	1,58	1,62	0,74	8,58	1,18
50 × 2	50	2,0	1,93	1,52	4,86	1,33	1,59	7,84	2,01	1,88	0,99	8,34	1 34
2,5		2,5	2,40	1,88	5,97	1,64	1,58	9,65	2,01	2,29	0,98	10,4	1,36
3		3,0	2,85	2,24	7,03	1,95	1,57	11,4	2,00	2,67	0,97	12,5	1,39
4		4,0	3,74	2,93	9,04	2,53	1,56	14,7	1,98	3,36	0,95	16,7	1,43
63 × 2	63	2,0	2,45	1,93	9,87	2,13	2,00	15,9	2,54	3,84	1,25	16,7	1,67
2,5		2,5	3,05	2,39	12,2	2,64	2,00	19,6	2,54	4,70	1,24	20,9	1,69
3		3,0	3,63	2,85	14,4	3,14	1,99	23,2	2,53	5,52	1,23	25,0	1,71
4		4,0	4,78	3,75	18,6	4,11	1,98	30,2	2,52	7,05	1,21	33,4	1,76

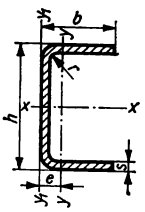
Tabelle 1.88: Ungleichschenkliger Winkelstahl (kalt geformt)



b_1 Schenkelbreite (großer Schenkel)
b_2 Schenkelbreite (kleiner Schenkel)
s Schenkeldicke
r Innenhalbmesser
I Trägheitsmoment
i Trägheitshalbmesser
W Widerstandsmoment
e_x, e_y Schwerpunktabstände
α Winkel zwischen $y-y$- und $\eta-\eta$-Achse

Kurzzeichen	b_1	b_2	$s = r$	Querschnitt	Masse je 1 m	Statische Werte für die Achsen														Lage der Achse $\eta-\eta$
						$x-x$			$y-y$			x_1-x_1		y_1-y_1		$\xi-\xi$		$\eta-\eta$		
L	mm	mm	mm	cm²	kg	I_x cm⁴	W_x cm³	i_x cm	I_y cm⁴	W_y cm³	i_y cm	I_{x_1} cm⁴	e_x cm	I_{y_1} cm⁴	e_y cm	I_ξ cm⁴	i_ξ cm	I_η cm⁴	i_η cm	tan α
16 × 10 × 0,7	16	10	0,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1			1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5			1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2			2,0	0,45	0,36	0,11	0,11	0,50	0,03	0,05	0,27	0,27	0,60	0,07	0,28	0,13	0,53	0,02	0,19	0,415
20 × 12 × 0,7	20	12	0,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1			1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5			1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2			2,0	0,57	0,45	0,23	0,18	0,63	0,06	0,07	0,33	0,53	0,73	0,12	0,31	0,26	0,67	0,03	0,24	0,386
25 × 16 × 1	25	16	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5			1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2			2,0	0,75	0,59	0,48	0,29	0,80	0,16	0,13	0,46	1,04	0,86	0,28	0,40	0,55	0,86	0,08	0,33	0,432
2,5			2,5	0,92	0,72	0,57	0,36	0,79	0,18	0,16	0,45	1,31	0,89	0,35	0,42	0,65	0,84	0,11	0,35	0,396
32 × 12 × 1,5	32	12	1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2			2,0	0,81	0,64	0,85	0,44	1,02	0,07	0,07	0,29	2,19	1,28	0,12	0,25	0,87	1,04	0,04	0,23	0,177
2,5			2,5	1,00	0,78	1,02	0,54	1,01	0,08	0,09	0,28	2,73	1,31	0,15	0,27	1,05	1,02	0,05	0,22	0,176
32 × 20 × 2	32	20	2,0	0,97	0,76	1,04	0,49	1,03	0,32	0,21	0,58	2,19	1,09	0,54	0,47	1,18	1,10	0,18	0,42	0,413
2,5			2,5	1,20	0,94	1,25	0,60	1,02	0,39	0,26	0,57	2,74	1,11	0,68	0,49	1,43	1,09	0,21	0,41	0,414
3			3,0	1,41	1,11	1,45	0,70	1,01	0,44	0,30	0,56	3,28	1,14	0,82	0,52	1,66	1,08	0,23	0,40	0,415
40 × 16 × 2	40	16	2,0	1,05	0,83	1,76	0,72	1,29	0,18	0,14	0,41	4,27	1,54	0,28	0,31	1,82	1,31	0,11	0,33	0,197
2,5			2,5	1,30	1,02	2,13	0,88	1,28	0,21	0,16	0,40	5,34	1,57	0,35	0,34	2,21	1,30	0,13	0,32	0,197
3			3,0	1,53	1,20	2,47	1,03	1,27	0,23	0,19	0,39	6,40	1,60	0,43	0,36	2,56	1,29	0,15	0,31	0,196
40 × 25 × 3	40	25	3,0	1,80	1,41	2,95	1,13	1,28	0,91	0,48	0,71	6,41	1,38	1,58	0,61	3,38	1,37	0,49	0,52	0,414
40 × 32 × 2	40	32	2,0	1,37	1,08	2,27	0,81	1,28	1,31	0,55	0,98	4,27	1,21	2,19	0,80	2,96	1,47	0,62	0,67	0,647
2,5			2,5	1,70	1,33	2,77	1,00	1,28	1,60	0,67	0,97	5,34	1,23	2,74	0,82	3,61	1,46	0,75	0,66	0,647
3			3,0	2,01	1,58	3,24	1,18	1,27	1,86	0,79	0,96	6,42	1,26	3,30	0,84	4,24	1,45	0,86	0,66	0,648
50 × 16 × 2	50	16	2,0	1,25	0,98	3,24	0,87	1,61	0,18	0,14	0,38	8,34	2,01	0,28	0,28	3,30	1,62	0,12	0,31	0,138
2,5			2,5	1,55	1,21	3,94	1,34	1,60	0,22	0,17	0,37	10,4	2,05	0,36	0,30	4,02	1,61	0,15	0,31	0,138
3			3,0	1,83	1,44	4,60	1,57	1,58	0,25	0,19	0,37	12,5	2,08	0,44	0,32	4,68	1,60	0,16	0,30	0,137
50 × 32 × 2	50	32	2,0	1,57	1,24	4,18	1,24	1,63	1,40	0,56	0,94	8,34	1,63	2,19	0,71	4,81	1,75	0,77	0,70	0,430
2,5			2,5	1,95	1,53	5,12	1,53	1,62	1,70	0,69	0,93	10,4	1,65	2,75	0,73	5,89	1,74	0,93	0,69	0,430
3			3,0	2,31	1,81	6,01	1,81	1,61	1,99	0,81	0,93	12,5	1,68	3,30	0,75	6,93	1,73	1,07	0,68	0,431
63 × 20 × 2	63	20	2,0	1,59	1,25	6,62	1,75	2,04	0,37	0,22	0,48	16,7	2,51	0,54	0,33	6,74	2,06	0,26	0,40	0,144
2,5			2,5	1,97	1,55	8,09	2,15	2,03	0,45	0,27	0,48	20,8	2,54	0,69	0,35	8,24	2,04	0,30	0,39	0,144
3			3,0	2,34	1,84	9,50	2,55	2,01	0,52	0,32	0,47	25,0	2,57	0,84	0,37	9,67	2,03	0,35	0,38	0,143
63 × 40 × 2	63	40	2,0	1,99	1,57	8,48	1,98	2,06	2,79	0,89	1,18	16,7	2,03	4,28	0,86	9,72	2,21	1,55	0,88	0,424
2,5			2,5	2,47	1,94	10,4	2,46	2,05	3,42	1,10	1,18	20,8	2,05	5,35	0,88	12,0	2,20	1,89	0,87	0,424
3			3,0	2,94	2,31	12,3	2,92	2,05	4,03	1,30	1,17	25,0	2,08	6,45	0,91	14,1	2,19	2,21	0,87	0,425
4			4,0	3,86	3,03	15,9	3,81	2,03	5,13	1,68	1,15	33,4	2,13	8,61	0,95	18,2	2,17	2,77	0,85	0,425

Tabelle 1.89: U-Stahl (kalt geformt)



h	Profil- oder Steghöhe
b	Flanschbreite
s	Steg- und Flanschdicke
r	Innenhalbmesser
I	Trägheitsmoment
W	Widerstandsmoment
i	Trägheitshalbmesser
e	Schwerpunktabstand

Kurzzeichen	h	b	s	Querschnitt	Masse je 1 m	Statische Werte für die Achsen						
						$x-x$			$y-y$			y_1-y_1
						I_x	W_x	i_x	I_y	W_y	i_y	I_{y_1}
[	mm	mm	mm	cm²	kg	cm⁴	cm³	cm	cm⁴	cm³	cm	cm⁴
16 × 10 × 1	16	10	1	0,32	0,25	–	–	–	–	–	–	–
1,5			1,5	0,46	0,36	0,17	0,21	0,60	0,04	0,04	0,31	0,10
20 × 10 × 1,5	20	10	1,5	0,52	0,41	0,29	0,29	0,74	0,05	0,07	0,30	0,10
2			2	0,67	0,52	0,34	0,34	0,72	0,06	0,08	0,29	0,13
25 × 10 × 1,5	25	10	1,5	0,60	0,47	0,50	0,40	0,91	0,05	0,07	0,30	0,10
2			2	0,77	0,60	0,61	0,49	0,89	0,06	0,09	0,28	0,14
25 × 16 × 1,5	25	16	1,5	0,78	0,61	0,75	0,60	0,98	0,20	0,18	0,51	0,41
2			2	1,01	0,79	0,92	0,74	0,96	0,25	0,23	0,49	0,55
32 × 10 × 1,5	32	10	1,5	0,70	0,55	0,92	0,58	1,15	0,06	0,08	0,28	0,10
2			2	0,91	0,71	1,14	0,71	1,12	0,07	0,09	0,27	0,14
32 × 20 × 2	32	20	2	1,31	1,03	2,04	1,27	1,25	0,51	0,38	0,63	1,07
2,5			2,5	1,59	1,25	2,39	1,49	1,22	0,61	0,46	0,62	1,34
3			3	1,85	1,45	2,66	1,66	1,20	0,70	0,54	0,61	1,62
63 × 20 × 2	63	20	2	1,93	1,51	10,4	3,29	2,32	0,64	0,42	0,58	1,08
2,5			2,5	2,37	1,86	12,4	3,95	2,29	0,77	0,51	0,57	1,35
3			3	2,79	2,19	14,4	4,56	2,27	0,88	0,59	0,56	1,63
63 × 25 × 2	63	25	2	2,13	1,67	12,2	3,88	2,40	1,18	0,63	0,73	2,09
2,5			2,5	2,62	2,06	14,7	4,67	2,37	1,47	0,80	0,75	2,62
3			3	3,09	2,43	17,1	5,42	2,35	1,70	0,94	0,73	3,16
80 × 20 × 2	80	20	2	2,27	1,78	18,7	4,67	2,87	0,68	0,43	0,55	1,08
2,5			2,5	2,79	2,19	22,5	5,64	2,84	0,82	0,52	0,54	1,36
3			3	3,30	2,59	26,1	6,53	2,81	0,94	0,61	0,53	1,64
80 × 32 × 2	80	32	2	2,75	2,16	26,0	6,49	3,07	2,62	1,09	0,98	4,38
2,5			2,5	3,39	2,66	31,6	7,89	3,05	3,19	1,34	0,97	5,49
3			3	4,02	3,16	36,8	9,20	3,02	3,73	1,58	0,96	6,60
4			4	5,23	4,11	46,2	11,6	2,97	4,68	2,03	0,95	8,83
80 × 50 × 2	80	50	2	3,47	2,72	36,0	9,23	3,26	9,03	2,57	1,61	16,7
2,5			2,5	4,29	3,37	45,1	11,3	3,24	11,1	3,17	1,61	20,9
3			3	5,10	4,01	52,8	13,2	3,22	13,0	3,76	1,60	25,0
4			4	6,67	5,24	67,0	16,8	3,17	16,7	4,39	1,58	33,4
100 × 20 × 2	100	20	2	2,67	2,09	32,7	6,54	3,50	0,72	0,44	0,52	1,08
2,5			2,5	3,29	2,59	39,7	7,93	3,47	0,86	0,53	0,51	1,37
3			3	3,90	3,06	46,2	9,25	3,44	0,99	0,62	0,50	1,66
100 × 32 × 2	100	32	2	3,15	2,47	44,2	8,84	3,75	2,80	1,12	0,94	4,39
2,5			2,5	3,89	3,06	53,9	10,8	3,72	3,40	1,38	0,93	5,49
3			3	4,62	3,63	63,2	12,6	3,70	3,98	1,63	0,93	6,61
100 × 50 × 2	100	50	2	3,87	3,04	61,5	12,3	3,99	9,72	2,66	1,59	16,7
2,5			2,5	4,79	3,76	75,3	15,1	3,96	11,9	3,28	1,58	20,9
3			3	5,70	4,48	88,6	17,7	3,94	14,1	3,89	1,57	25,1
4			4	7,44	5,84	112	22,5	3,89	18,1	5,08	1,56	33,5
125 × 63 × 3	125	63	3	7,23	5,68	178	28,5	4,97	28,7	6,27	1,99	50,1
4			4	9,51	7,47	230	36,8	4,92	37,2	8,20	1,98	66,8
5			5	11,7	9,16	276	44,2	4,86	45,2	10,1	1,97	83,8
140 × 80 × 4	140	80	4	11,5	9,01	363	51,8	5,62	74,9	13,2	2,55	137
5			5	14,2	11,1	441	62,9	5,57	91,4	16,2	2,54	171
6			6	16,7	13,1	511	73,0	5,52	107	19,2	2,53	206

Tabelle 1.89 (Fortsetzung)

Kurzzeichen	h	b	s	Querschnitt	Masse je 1 m	Statische Werte für die Achsen						
						$x-x$			$y-y$			y_1-y_1
[	mm	mm	mm	cm²	kg	I_x cm⁴	W_x cm³	i_x cm	I_y cm⁴	W_y cm³	i_y cm	I_{y_1} cm⁴
160 × 50 × 3	160	50	3	7,50	5,89	269	33,6	5,99	16,2	4,14	1,47	25,1
4			4	9,84	7,22	345	43,2	5,93	20,9	5,42	1,46	33,7
5			5	12,1	9,52	418	52,2	5,87	25,4	6,64	1,45	42,3
180 × 80 × 4	180	80	4	13,1	10,3	649	72,1	7,04	81,2	13,7	2,49	137
5			5	16,1	12,7	788	87,5	6,99	99,3	16,9	2,48	171
200 × 100 × 4	200	100	4	15,5	12,1	984	98,4	7,97	155	21,2	3,17	267
5			5	19,2	15,1	1200	120	7,93	190	26,2	3,15	333
6			6	22,7	17,9	1410	141	7,87	225	31,2	3,15	401
250 × 100 × 5	250	100	5	21,6	17,0	2026	162	9,67	204	27,0	3,07	334
300 × 100 × 5	300	100	5	25,2	19,8	3640	228	12,0	218	27,8	2,94	333

1.6.7.4. Rohre

Stahlrohre für Wasser- und Gasleitungen werden geschweißt und nahtlos gezogen geliefert. Die Werkstoffzuordnung zum Herstellungsverfahren gibt Tabelle 1.90 an. Die Daten dieser Rohre entsprechend TGL 14514 sind Tabelle 1.91 zu entnehmen.
Nahtlos gezogene *Rechteckrohre* aus Aluminium werden für Antennenanlagen verwendet. Tabelle 1.92 enthält Daten für Rechteckrohre mit scharfen Kanten. Tabelle 1.93 enthält Daten für Rechteckrohre mit gerundeten Kanten.
Die verwendeten Werkstoffe für beide Rohrarten sind in Tabelle 1.94 zusammengestellt.

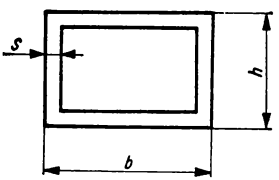
Tabelle 1.90: Wasser- und Gasrohrsorten

Werkstoff	Herstellungsverfahren
StR	geschweißt
St33	geschweißt
St33	nahtlos

Tabelle 1.91: Abmessungen von Wasser- und Gasrohren

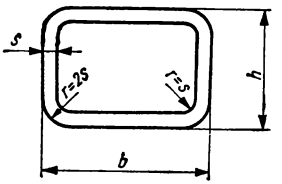
Nennweite	Außendurchmesser	Wanddicke leicht	Wanddicke mittelschwer	Masse des schwarzen Rohres je 1 m in kg ohne Muffe leicht	Masse des schwarzen Rohres je 1 m in kg ohne Muffe mittelschwer	Gewindelänge	Muffenlänge
mm	mm	mm	mm			mm	mm
1/8 6	10,2	–	2,0	–	0,407	7,4	25
1/4 8	13,5	–	2,35	–	0,650	11,0	27
3/8 10	17,2	–	2,35	–	0,852	11,0	30
1/2 15	21,3	2,35	2,65	1,10	1,22	15,0	36
3/4 20	26,9	2,35	2,65	1,41	1,58	17,0	39
1 25	33,7	2,9	3,25	2,21	2,44	19,0	45
1 1/4 32	42,4	2,9	3,25	2,84	3,14	22,0	50
1 1/2 40	48,3	2,9	3,25	3,26	3,61	23,0	55
2 50	60,3	3,25	3,65	4,56	5,10	26,0	65
2 1/2 65	76,1	–	3,65	–	6,51	30,0	74
3 80	88,9	–	4,05	–	8,47	32,0	80
4 100	114,3	–	4,5	–	12,1		
5 125	139,7	–	4,85	–	16,2		

Tabelle 1.92: Rechteckrohr aus Aluminium (mit scharfen Kanten)



Nennmaß b mm	Nennmaß h mm	Masse je 1 m (Dichte = 2,7 kg/dm³) kg für Wanddicke s in mm 1	1,5	2	2,5	3
12	12	0,12	–	–	–	–
16	10	0,13	0,19	–	–	–
16	16	0,16	0,23	–	–	–
22	22	0,23	0,33	0,43	0,53	–
32	32	0,33	0,49	0,65	0,8	0,94
45	45	–	–	0,95	1,15	1,30

Tabelle 1.93: Rechteckrohr aus Aluminium (mit gerundeten Kanten)

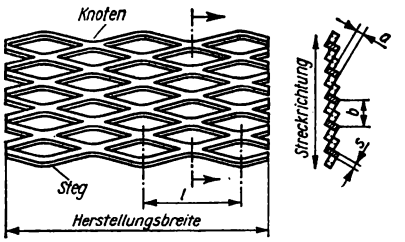


Nennmaß b mm	Nennmaß h mm	Masse je 1 m (Dichte = 2,7 kg/dm³) kg für Wanddicke s in mm 1	1,5	2	2,5	3
12	12	0,12	–	–	–	–
16	10	0,12	0,17	–	–	–
16	16	0,15	0,22	–	–	–
22	22	0,22	0,32	0,40	0,48	–
32	32	0,32	0,48	0,62	0,75	0,87
45	45	–	–	0,91	1,08	1,24

Tabelle 1.94: Werkstoffe für Rechteckrohre

Werkstoff Kurzzeichen	Festigkeitseigenschaften nach
Al 99,5 zh	
AlMgSi 1 F 20	TGL 14746/01
AlMgSi 1 F 32	

Tabelle 1.95: Streckmetall (nach TGL 7756)



Bezeichnung eines Streckmetalls von Maschenlänge l = 16 mm, Maschenweite b = 6,3 mm, Stegbreite a = 1 mm und Blechdicke s = 0,75 mm aus Stahlblech (St...)[1]:

Streckmetall 16 × 6,3 × 1 × 0,75 TGL 7756 St.

Als *Werkstoff* stehen zur Wahl

St	Stahlblech
St-Al	Stahlblech mit Aluminium, beiderseitig plattiert
St-Ni	Stahlblech mit Nickel, beiderseitig plattiert
Cu	Kupferblech
AlMg3	Aluminiumlegierung
FS	Formstoff

Maschenlänge mm	Maschenweite mm	Stegbreite mm	Blechdicke mm	Masse[2]) kg	Herstellungsbreite höchstens
6,3	2,5	0,6	0,32	1,25	500 mm
10	4	0,6	0,32	0,78	
		1	0,75	2,9	
		1,6	1	6,3	
12,5	5	0,6	0,32	0,63	1000 mm
		1	0,75	2,34	
		1,6	1	4,9	
16	6,3	0,6	0,32	0,5	
		1	0,75	1,84	
		1,6	1	3,9	
25	8	1,25	0,75	1,85	
		1,6	1	3,15	
		2	1,25	4,9	
40	12,5	1,6	1	1,96	
		2	1,25	3,1	
		2,5	1,5	4,7	
		3,15	2	7,85	
63	20	2	1,25	1,96	2000 mm
		3,15	2	4,9	
		5	2,5	9,8	
		7,1	3	16,8	
90	31,5	3,15	2	3,14	
		5	2,5	6,15	
		7,1	3	10,5	
125	40	3,15	2	2,5	
		5	3	5,9	
		8	4	12,5	

[1]) gewählter Werkstoff
[2]) Die Masse von Streckmetall aus Cu beträgt etwa das 1,1-fache, aus Al-Legierungen das 0,357fache und von Streckgitter aus Formstoff das 0,2fache der angegebenen Werte.

1.6.7.5. Streckmetall

Abmessungen und Angaben über zu verwendende Werkstoffe sind in Tabelle 1.95 enthalten.

Kaltbiegen von Streckmetall aus Stahl ist nach TGL 20602 durchzuführen.
Voraussetzung für das einwandfreie Kaltbiegen ist die Ermittlung des Streckfaktors. Dieser kann nach der Formel

$$f = \frac{b}{2a}$$

(f Streckfaktor, a Stegbreite, b Maschenweite) berechnet oder aus dem Nomogramm (Bild 1.94) ermittelt werden.

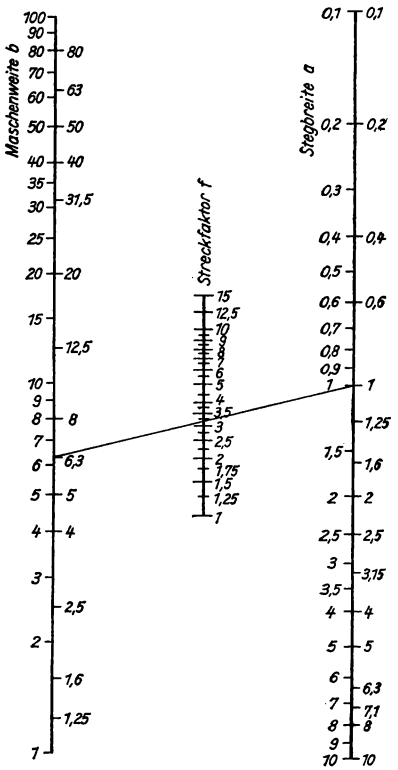


Bild 1.94. Nomogramm zur Ermittlung des Streckfaktors von Streckmetall

Erläuterung des Nomogramms:
In dem Nomogramm ist die Markierung für die Maschenweite b mit der für die Stegbreite a durch eine Gerade zu verbinden. Der Schnittpunkt mit der Streckfaktorskale ergibt den Wert des Streckfaktors f.

Beispiel:
Für Streckmetall 16 × 6,3 × 1 × 0,75 TGL 7756-St.

a = 1 mm; b = 6,3 mm

f aus Nomogramm abgelesen ≈ 3,15.

$$f = \frac{b}{2a} = \frac{6{,}3\text{ mm}}{2\text{ mm}} = 3{,}15.$$

Als *Biegerichtung* sind zu bevorzugen:
in Streckrichtung über Knoten,
in Streckrichtung über Steg,
senkrecht zur Streckrichtung über Knoten
senkrecht zur Streckrichtung über Steg.

1.6.8. Schrauben, Muttern und Zubehör

Schrauben und Muttern weisen als kraftschlüssige Verbindungselemente die *Schraubenlinie* als bestimmendes Merkmal auf. Diese Schraubenlinie entsteht durch Aufwickeln einer schiefen Ebene um einen Zylinder. Der *Steigungswinkel* α der schiefen Ebene bestimmt das Kraftverhalten der Gewinde (Bild 1.95). Im folgenden werden nur *selbsthemmende Gewinde* (*Befestigungsgewinde*) abgehandelt. Das *metrische* (Tabelle 1.96) und das WHITWORTH-*Gewinde* (Tabelle 1.97) liegen mit $\alpha \approx 2{,}5°$ im Gebiet der Selbsthemmung, bedürfen aber bei Erschütterungen trotzdem einer zusätzlichen Sicherung gegen unbeabsichtigtes Lockern.
Befestigungsgewinde sind in der Regel *rechtsgängig*. Metrisches Gewinde weist einen *Flankenwinkel* von 60° auf, bei WHITWORTH-Gewinde beträgt er 55°. Als *Gewinde-Nenndurchmesser* gilt der Außendurchmesser des Gewindebolzens, nur das WHITWORTH-*Rohrgewinde* (Tabelle 1.98) wird nach dem lichten Rohrdurchmesser benannt.

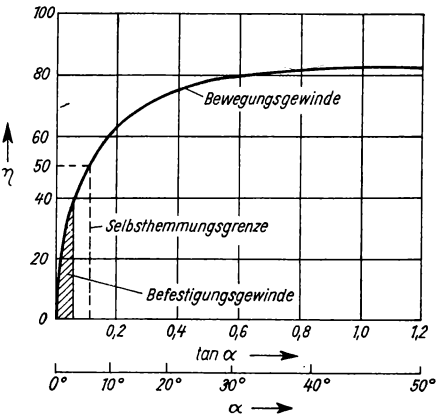
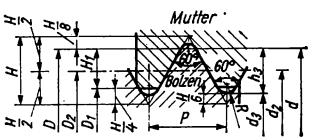


Bild 1.95. Gewindewirkungsgrad in Abhängigkeit von der Steigung

Tabelle 1.96: Metrisches ISO-Gewinde (nach TGL 7907) (Nennmaße)

Bezeichnung eines metrischen ISO-Grobgewindes vom Gewinde-Nenndurchmesser $d = 12$ mm: M 12[1])



$H = 0{,}86603P$
$H_1 = 0{,}54127P$
$h_3 = 0{,}61343P$
$R = 0{,}14434P$

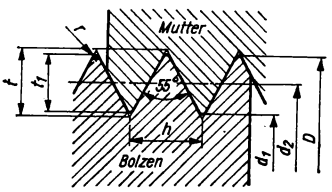
Gewinde-Nenndurchmesser $d = D$ in mm			Steigung	Flanken-durchmesser	Kerndurchmesser		Profiltiefe des Bolzen-gewindes	Nenn-tragtiefe	Rundung	Kern-quer-schnitt	Spannungs-quer-schnitt
					Bolzen	Mutter					
Spalte 1	2	3	P mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	h_3 mm	H_1 mm	R mm	A_q mm²	A_s mm²
0,4	–	–	0,1	0,335	0,277	0,292	0,061	0,054	0,014	0,060	0,074
–	0,45	–	0,1	0,385	0,327	0,342	0,061	0,054	0,014	0,084	0,100
0,5	–	–	0,125	0,419	0,347	0,365	0,077	0,068	0,018	0,095	0,115
–	0,55	–	0,125	0,469	0,397	0,415	0,077	0,068	0,018	0,124	0,147
0,6	–	–	0,15	0,503	0,416	0,438	0,092	0,081	0,022	0,136	0,166
–	0,7	–	0,175	0,586	0,485	0,511	0,107	0,095	0,025	0,185	0,225
0,8	–	–	0,2	0,670	0,555	0,583	0,123	0,108	0,029	0,242	0,295
–	0,9	–	0,225	0,754	0,624	0,656	0,138	0,122	0,032	0,306	0,373
1	–	–	0,25	0,838	0,693	0,729	0,153	0,135	0,036	0,377	0,460
–	1,1	–	0,25	0,938	0,793	0,829	0,153	0,135	0,036	0,494	0,588
1,2	–	–	0,25	1,038	0,893	0,929	0,153	0,135	0,036	0,626	0,732
–	1,4	–	0,3	1,205	1,032	1,075	0,184	0,162	0,043	0,836	0,983
1,6	–	–	0,35	1,373	1,171	1,221	0,215	0,189	0,051	1,08	1,27
–	1,8	–	0,35	1,573	1,371	1,421	0,215	0,189	0,051	1,48	1,70
2	–	–	0,4	1,740	1,509	1,567	0,245	0,217	0,058	1,79	2,07
–	2,2	–	0,45	1,908	1,648	1,713	0,276	0,244	0,065	2,13	2,48
2,5	–	–	0,45	2,208	1,948	2,013	0,276	0,244	0,065	2,98	3,39
3	–	–	0,5	2,675	2,387	2,459	0,307	0,271	0,072	4,47	5,03
–	3,5	–	0,6	3,110	2,764	2,850	0,368	0,325	0,087	6,00	6,77
4	–	–	0,7	3,545	3,141	3,242	0,429	0,379	0,101	7,75	8,78
–	4,5	–	0,75	4,013	3,580	3,688	0,460	0,406	0,108	10,1	11,3
5	–	–	0,8	4,480	4,019	4,134	0,491	0,433	0,115	12,7	14,2
6	–	–	1	5,350	4,773	4,917	0,613	0,541	0,144	17,9	20,1
–	–	7	1	6,350	5,773	5,917	0,613	0,541	0,144	26,2	28,9

[1]) Das jeweilige Toleranzkurzzeichen f (fein) und g (grob) für die Flankendurchmessertoleranzen ist hinzuzufügen, z. B. M 12f. Bei Gewinden mit Flankendurchmessertoleranz m (mittel) braucht das Toleranzzeichen »m« nicht hinzugefügt zu werden. Grenzmaße für Bolzen- und Mutterngewinde s. Standard.

Tabelle 1.96 (Fortsetzung)

Gewinde-Nenndurchmesser $d = D$ in mm			Steigung	Flanken-durchmesser	Kerndurchmesser		Profiltiefe des Bolzen-gewindes	Nenn-tragtiefe	Rundung	Kern-quer-schnitt	Span-nungs-quer-schnitt
					Bolzen	Mutter					
Spalte 1	2	3	P mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	h_3 mm	H_1 mm	R mm	A_q mm²	A_s mm²
8	–	–	1,25	7,188	6,466	6,647	0,767	0,677	0,180	32,8	36,6
–	–	9	1,25	8,188	7,466	7,647	0,767	0,677	0,180	43,8	48,1
10	–	–	1,5	9,026	8,160	8,376	0,920	0,812	0,217	52,3	58,0
–	–	11	1,5	10,026	9,160	9,376	0,920	0,812	0,217	65,9	72,3
12	–	–	1,75	10,863	9,853	10,106	1,074	0,947	0,253	76,2	84,3
–	14	–	2	12,701	11,546	11,835	1,227	1,083	0,289	105	115
16	–	–	2	14,701	13,546	13,835	1,227	1,083	0,289	144	157
–	18	–	2,5	16,376	14,933	15,294	1,534	1,353	0,361	175	192
20	–	–	2,5	18,376	16,933	17,294	1,534	1,353	0,361	225	245
–	22	–	2,5	20,376	18,933	19,294	1,534	1,353	0,361	281	303
24	–	–	3	22,051	20,319	20,752	1,840	1,624	0,433	324	352
–	27	–	3	25,051	23,319	23,752	1,840	1,624	0,433	427	459
30	–	–	3,5	27,727	25,706	26,211	2,147	1,894	0,505	519	561
–	33	–	3,5	30,727	28,706	29,211	2,147	1,894	0,505	647	694
36	–	–	4	33,402	31,093	31,670	2,454	2,165	0,577	759	817
–	39	–	4	36,402	34,093	34,670	2,454	2,165	0,577	913	976
42	–	–	4,5	39,077	36,479	37,129	2,760	2,436	0,650	1045	1121
–	45	–	4,5	42,077	39,479	40,129	2,760	2,436	0,650	1224	1306
48	–	–	5	44,752	41,866	42,587	3,067	2,706	0,722	1377	1473
–	52	–	5	48,752	45,866	46,587	3,067	2,706	0,722	1652	1758
56	–	–	5,5	52,428	49,252	50,046	3,374	2,977	0,794	1905	2030
–	60	–	5,5	56,428	53,252	54,046	3,374	2,977	0,794	2227	2362
64	–	–	6	60,103	56,639	57,505	3,681	3,248	0,866	2520	2676
–	68	–	6	64,103	60,639	61,505	3,681	3,248	0,866	2888	3055

Tabelle 1.97: WHITWORTH-*Gewinde* (nach TGL 0-11)



Steigung
$h = 25{,}400\,95 : z$
(z Gangzahl auf 1")

$t = 0{,}960\,49\,h$
$t_1 = 0{,}640\,33\,h$
$r = 0{,}137\,33\,h$

Äußerer Gewindedurchmesser des Bolzens D		Kern-durch-messer d_1	Kern-quer-schnitt	Flanken-durch-messer d_2	Steigung h	Gang-zahl z
"	mm	mm	cm²	mm	mm	auf 1"
1/8	12,7	9,99	0,78	11,35	2,12	12
5/8	15,9	12,9	1,31	14,40	2,31	11
3/4	19,1	15,8	1,96	17,42	2,54	10
7/8	22,2	18,6	2,72	20,42	2,82	9
1	25,4	21,3	3,58	23,37	3,18	8
1 1/8	28,6	23,9	4,50	26,25	3,63	7
1 1/4	31,8	27,1	5,77	29,43	3,63	7
1 3/8	34,9	29,5	6,84	32,22	4,23	6
1 1/2	38,1	32,7	8,39	35,39	4,23	6
1 3/4	44,5	37,9	11,31	41,20	5,08	5
2	50,8	43,6	14,91	47,19	5,65	4 1/2
2 1/4	57,2	49	18,87	53,09	6,35	4
2 1/2	63,5	55,4	24,08	59,44	6,35	4
2 3/4	69,9	60,6	28,80	65,21	7,26	3 1/2
3	76,2	66,9	35,16	71,56	7,26	3 1/2
3 1/2	88,9	78,9	48,89	83,90	7,82	3 1/4
4	101,6	90,8	64,70	96,18	8,47	3
4 1/2	114,3	103,0	83,31	108,65	8,84	2 7/8

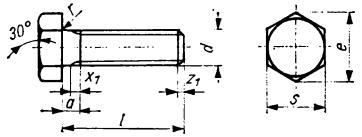
Tabelle 1.98: WHITWORTH-*Rohrgewinde* (nach TGL 0-259)

Innerer Rohr-durchmesser	Äußerer Gewinde-durchmesser	Kern-durchmesser	Gangzahl
"	mm	mm	auf 1"
R 1/8	9,7	8,6	28
R 1/4	13,2	11,4	19
R 3/8	16,7	15,0	19
R 1/2	21,0	18,6	14
R 3/4	26,4	24,1	14
R 1	33,3	30,3	11
R 1 1/4	41,9	39,0	11
R 1 1/2	47,8	44,9	11
R 2	59,6	56,7	11
R 2 1/2	75,2	72,2	11
R 3	87,9	85,0	11
R 3 1/2	100,3	97,4	11
R 4	113,0	110,1	11

1.6.8.1. Schrauben

Bei der Herstellung von Schrauben, Gewindebolzen usw. ist der Bolzen auf das Nennmaß zu bringen, und danach ist das Gewinde aufzuschneiden (z. B. für M 10 auf 10 mm Durchmesser).
Kennwerte verschiedener Schraubenarten sind in den Tabellen 1.99···1.102 enthalten.

Tabelle 1.99: Sechskantschrauben für elektrische Verbindungen Gewinde bis Kopf (nach TGL 0-933)[1])

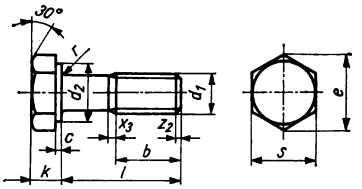


d_1	M 5	M 6	M 8	M 10	M 12	M 16
a Größtmaß	1,8	2,5	3	4	4	4,5
c	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
d_s Kleinstmaß	7,5	9	12,8	15,8	17,7	22,6
$e \approx$	9,2	11,5	16,2	19,6	21,9	27,7
k	3,5	4	5,5	7	8	10
r	0,2	0,3	0,5	0,5	1	1
s	8	10	14	17	19	24

Länge *l* mm	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³) kg					
20	4,29	6,14	13,3	23,2	33,0	65,5
22	4,54	6,48	13,9	24,2	34,4	68,2
25	4,91	6,99	14,9	25,7	36,6	72,2
30	5,53	7,85	16,5	28,2	40,2	78,9
35	6,15	8,71	18,1	30,7	43,8	85,5
40	6,77	9,57	19,7	33,2	47,4	92,2
45	7,39	10,4	21,3	35,7	51,0	99,1
50	8,01	11,3	22,8	38,2	54,5	105
55	8,63	12,2	24,4	40,7	58,1	112
60	9,25	13,0	26,0	43,3	61,7	119
65	9,87	13,9	27,6	45,8	65,3	125
70	10,5	14,7	29,2	48,3	68,9	132
75	11,1	15,6	30,8	50,8	72,5	139
80		16,5	32,4	53,3	76,1	146
90		18,2	35,6	58,3	83,3	159
100			38,7	63,3	90,5	172

[1]) Festigkeitseigenschaften (Werkstoff): 4 D, 6 D, 8 G, 10 K, Sm nach TGL 10826
z_2 nach TGL 0-78

Tabelle 1.100: Sechskantschrauben für elektrische Verbindungen mit Schaft (nach TGL 0-931)[1])



d_1	M 5	M 6	M 8	M 10	M 12	M 16
b bis *l* = 150 mm	16	18	22	26	30	38
l > 150 mm	–	–	–	–	36	44
c mm	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
d_s Kleinstmaß mm	7,5	9	12,8	15,8	17,1	22,6
$e \approx$ mm	9,2	11,5	16,2	19,6	21,9	27,7
k mm	3,5	4	5,5	7	8	10
r mm	0,2	0,3	0,5	0,5	1	1
s mm	8	10	14	17	19	24

[1]) Festigkeitseigenschaften (Werkstoff): 4D, 6D, 8G, 10K, Sm nach TGL 10826
z_2 nach TGL 0-78

Tabelle 1.100 (Fortsetzung)

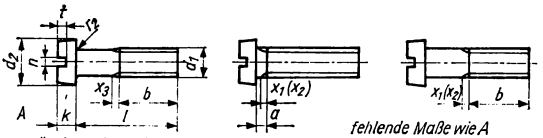
d_1	M 5	M 6	M 8	M 10	M 12	M 16
l mm	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³) kg					
45	8,28	11,6	23,2	38,0	53,6	102
50	9,04	12,7	25,2	41,1	58,1	109
55	9,81	13,6	26,8	43,8	62,6	117
60	10,6	14,7	28,8	46,8	67,0	125
65	11,4	15,7	30,8	50,0	70,3	132
70	12,9	16,8	32,8	53,2	74,7	141
75	13,7	17,9	34,7	56,2	79,1	149
80		18,9	36,7	59,2	83,6	157
90		21,1	40,6	65,4	92,4	171
100			44,6	71,6	100	186
110			48,5	77,7	109	202
120				83,9	118	218
130				90,0	127	234
140				96,2	136	250
150				102	145	265
160					153	281

Tabelle 1.101: Zylinderschrauben (nach TGL 0-84)[1])

A
Schaftdurchmesser ≈ Flankendurchmesser nur bei Längen unter der ····-Stufenlinie

B
Gewinde annähernd bis Kopf

C
Schaftdurchmesser = Gewindedurchmesser nur bei Längen unter der ····-Stufenlinie



zulässige Neigung 5°

fehlende Maße wie A

d_1		M 3	M 3,5	M 4	M 5	M 6	M 8	M 10
a	mm	1	1,2	1,2	1,5	2	2,5	3
b	mm	12	13	14	16	18	22	26
d_2	mm	5	6	7	8,5	10	12,5	15
k	mm	2	2,4	2,8	3,5	4	5	6
n	mm	0,8	0,8	1	1,2	1,6	2	2,5
r_2	mm	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5
t	mm	1	1,2	1,4	1,7	2	2,5	3

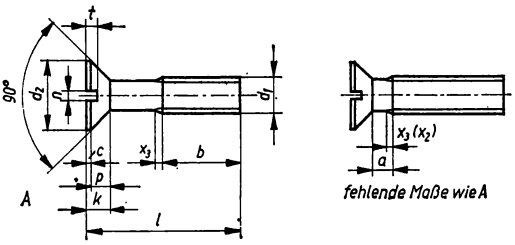
l mm	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³) kg						
6	0,615	0,870	1,28	2,41			
8	0,703	0,989	1,43	2,66	3,80		
10	0,799	1,11	1,59	2,91	4,16	8,33	
12	0,910	1,24	1,74	3,16	4,51	8,96	15,3
14	1,02	1,39	1,94	3,43	4,85	9,60	16,3
16	1,12	1,55	2,14	3,71	5,19	10,2	17,3
18	1,24	1,70	2,33	3,99	5,57	10,9	18,3
20	1,35	1,85	2,53	4,30	6,01	11,5	19,3
22	1,46	2,00	2,73	4,63	6,46	–	–
25	1,63	2,23	3,03	5,04	7,12	13,3	21,8
(28)	1,80	2,46	3,32	5,53	5,79	14,5	23,6
30	1,91	2,61	3,57	5,84	8,23	15,3	24,9
35		2,99	4,02	6,61	9,34	17,3	27,9
40			4,51	7,38	10,5	19,3	31,0
45			5,00	8,15	11,6	21,2	34,1
50			5,49	8,92	12,7	23,2	37,2
55					13,8	25,2	40,3
60					14,9	27,2	43,4
65							46,5
70							49,6

[1]) Festigkeitseigenschaften (Werkstoff): 4S, 5S, Sm nach TGL 10826

Tabelle 1.102: Senkschrauben (nach TGL 5683)[1])

A
Schaftdurchmesser ≈ Flankendurchmesser nur bei Längen unter der ····Stufenlinie

B
mit Gewinde annähernd bis Kopf



d_1		M 3	M 3,5	M 4	M 5	M 6	M 8	M 10
a Größtmaß	mm	1,6	2,2	2,2	2,7	3,55	4,25	4,9
b	mm	12	13	14	16	18	22	26
c	mm	0,2	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,8
d_3	mm	6	7	7,5	9	11	15	18
k	mm	1,6	2	2	2,5	3	4	4,8
n	mm	0,8	0,8	1	1,2	1,6	2	2,5
p	mm	1,4	1,75	1,75	2	2,5	3,5	4
r	mm	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5
t	mm	0,8	1	1	1,2	1,4	2	2,4

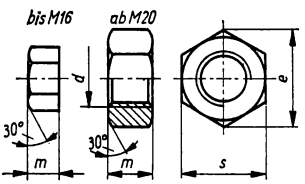
l mm	Masse je 1000 Stück kg						
6	0,396	0,515	0,702				
8	0,484	0,634	0,857	1,47	2,04		
10	0,573	0,753	1,01	1,72	2,39	4,63	
12	0,677	0,872	1,17	1,96	2,74	3,22	8,45
14	0,800	1,02	1,33	2,27	3,10	5,91	9,46
16	0,888	1,16	1,52	2,46	3,44	6,54	10,5
18	1,01	1,32	1,72	2,73	3,80	7,18	11,5
20	1,12	1,47	1,92	3,04	4,15	7,82	12,5
22	1,23	1,62	2,11	3,34	4,56	8,45	13,5
25	1,40	1,84	2,41	3,81	5,23	9,41	15,0
30	1,68	2,22	2,90	4,58	6,34	11,4	17,6
35	1,98	2,60	3,40	5,75	7,45	13,4	20,7
40			3,89	6,12	8,56	15,3	23,8
45			4,35	6,89	9,67	17,3	26,9
50			4,85	7,62	10,8	19,3	30,0
55			5,32	8,37	11,9	21,3	33,1
60							36,1
65							39,1
70							42,2

[1]) Festigkeitseigenschaften (Werkstoff): 4S, 5S, Sm nach TGL 10826

1.6.8.2. Muttern

Bei der Herstellung von Muttern, Gewindelöchern usw. gilt als Faustregel bis etwa M 10:
Bohrdurchmesser = Gewindeinnenmaß · 0,8,
z. B. Gewindeloch M 6 ist mit 6 mm · 0,8 = 4,8 mm zu bohren.
Kennwerte verschiedener Muttern sind in den Tabellen 1.103 bis 1.105 enthalten.

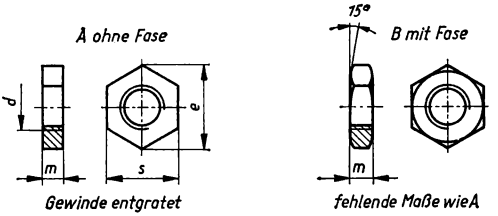
Tabelle 1.103: Sechskantmuttern (nach TGL 0-555)[1])



d	*e* mm	*m* mm	*s* mm	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³) kg
M 5	9,2	4	8	1,57
M 6	11,5	5	10	2,32
M 8	16,2	6	14	5,59
M 10	19,6	8	17	10,9
M 12	21,9	9,5	19	15,9
M 16	27,7	13	24	30,8
M 20	34,6	16	30	60,3
M 24	41,6	18	36	≈103
M 30	53,1	22	46	≈216

[1]) Festigkeitseigenschaften (Werkstoff): 4D oder 4P nach TGL 10826

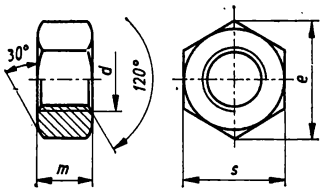
Tabelle 1.104: Flache Sechskantmuttern (nach TGL 0-439)[1])



d	*e* mm	*m* mm	*s* mm	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³) kg
M 3	6,4	1,6	5,5	0,241
M 3,5	6,9	2	6	0,375
M 4	8,1	2	7	0,508
M 5	9,2	2,5	8	1,070
M 6	11,5	3	10	1,510
M 8	16,2	4	14	4,100
M 10	19,6	5	17	7,320

[1]) Festigkeitseigenschaften (Werkstoff): 4D, 5S, Sm, L nach TGL 10826

Tabelle 1.105: Sechskantmuttern für elektrische Verbindungen (nach TGL 0-934[1])



d	e	m	s	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³)
	mm	mm	mm	kg
M 3	6,4	2,4	5,5	0,384
M 3,5	6,9	2,8	6	0,514
M 4	8,1	3,2	7	0,812
M 5	9,2	4	8	1,69
M 6	11,5	5	10	2,50
M 8	16,2	6	14	5,90
M 10	19,6	8	17	11,6
M 12	21,9	9,5	19	17,3
M 16	27,7	13	24	33,3

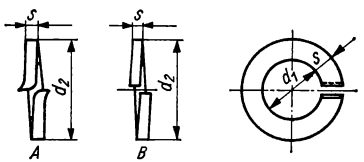
[1]) Festigkeitseigenschaften (Werkstoff): 5S, 6D, Sm nach TGL 10826

1.6.8.3. Federringe

Federringe sollen Schrauben und Muttern mit planer Auflagefläche gegen Verdrehen und Lösen bei Stoßbeanspruchung sichern. In Tabelle 1.106 sind Kennwerte von Federringen zusammengestellt.

Tabelle 1.106: Federringe (nach TGL 7403)

A	B
aufgebogener Federring	glatter Federring

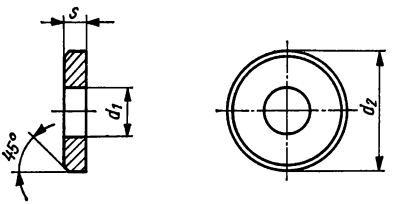


Nennmaß	d_1	d_2	s
	mm	mm	mm
2	2,1	3,6	0,5
2,5	2,6	4,3	0,6
3	3,1	5,2	0,8
3,5	3,6	6,1	1,0
4	4,1	6,6	1,0
5	5,1	8,0	1,2
6	6,1	9,5	1,4
8	8,2	12,8	2,0
10	10,2	16,1	2,5
12	12,2	19,3	3,0
16	16,3	24,7	3,5
20	20,5	30,9	4,5
24	24,5	36,9	5,5
30	30,5	45,3	6,5
36	36,5	54,3	8,0
42	42,5	62,3	9,0
48	48,5	70,5	10,0

1.6.8.4. Scheiben

Scheiben werden vorwiegend zum Schutz von Oberflächen vor Beschädigung durch das Anziehen von Schrauben und Muttern und bei Verwendung von Federscheiben eingesetzt. Eine Übersicht über mögliche Scheibenarten enthält TGL 12967. In Tabelle 1.107 sind die Maße der Scheiben und die Zuordnung zu den Schrauben nach TGL 0-125 angegeben.

Tabelle 1.107: Scheiben (nach TGL 12967)

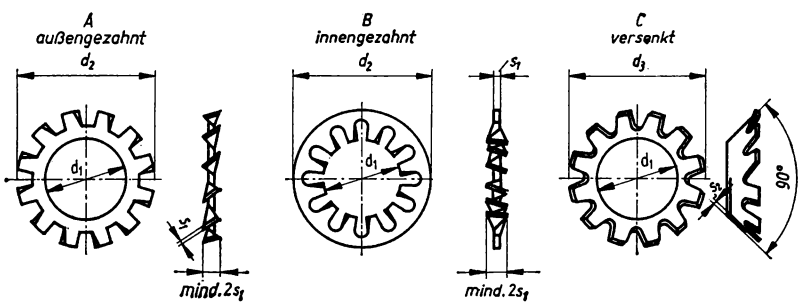


d_1	d_2	s	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³)	für Schrauben
mm	mm	mm	kg	
1,8	4,5	0,3	0,031	M 1,6
2,2	5,5	0,5	0,079	M 2
2,7	6,5	0,5	0,108	M 2,5
3,2	7	0,5	0,120	M 3
3,7	8	0,8	0,248	M 3,5
4,3	9	0,8	0,341	M 4
5,3	10	1	0,452	M 5
6,4	12	1,5	0,953	M 6
8,4	17	1,5	2,16	M 8
10,5	21	2	4,16	M 10
13	24	2	6,25	M 12
15	28	3	10,3	M 14
17	30	3	11,3	M 16
19	34	3	14,7	M 18
21	36	4	21,1	M 20
23	40	4	26,4	M 22
25	45	4	34,4	M 24
28	50	5	52,9	M 27
31	56	5	67,0	M 30
34	60	5	75,3	M 33
37	67	6	115	M 36
40	72	6	133	M 39
43	78	6	156	M 42
50	90	8	276	M 48

1.6.8.5. Federnde Zahnscheiben

Ist bei Schraubverbindungen ein eindeutiger elektrischer Kontakt notwendig, sind Zahnscheiben einzusetzen. Zahnscheiben bewirken während des Festziehens von Mutter oder Schraube eine mechanische Reinigung der Oberfläche. Kennwerte von federnden Zahnscheiben sind in Tabelle 1.108 angegeben.

Tabelle 1.108: Federnde Zahnscheiben (nach TGL 0-6797)[1])



Nennmaß	d_1	d_2	d_3	s_1	s_2	Anzahl der Zähne A und B	Anzahl der Zähne C	Masse je 1000 Stück (7,85 kg/dm³) kg A	B	C	für Schrauben
	mm	mm	mm	mm	mm						
3	3,2	6	6,2	0,3	0,25	6	6	0,039	0,050	0,035	M 3
3,5	3,7	7	6,7	0,45	0,3	6	6	0,067	0,099	0,044	M 3.5
4	4,3	8	7,8	0,45	0,3	8	8	0,084	0,102	0,066	M 4
5	5,3	10	10	0,65	0,4	8	8	0,171	0,228	0,126	M 5
6	6,4	11	11	0,7	0,6	8	10	0,247	0,330	0,305	M 6
8	8,4	15	14,5	0,85	0,6	8	10	0,454	0,605	0,497	M 8
10	10,5	18	18	1,1	0,7	9	10	0,960	1,13	0,970	M 10
12	12,5	20,5	26	1,2	0,8	10	10	1,38	1,70	1,85	M 12
14	14,5	24	29	1,3	0,9	10	12	1,90	2,34	2,14	M 14
16	16,5	26	32	1,4	1	12	12	2,48	2,94	2,21	M 16
18	19	30	—	1,4	—	12	—	3,50	3,72	—	M 18
20	21	33	—	1,6	—	12	—	4,36	4,66	—	M 20
24	25	38	—	1,8	—	14	—	7,06	7,90	—	M 24

[1]) Werkstoff: Federstahl, wärmebehandelt auf 410···490 HV; Bronze Sn Bz 8 (bei Bestellung besonders angeben)

1.7. Schaltzeichen

1.7.1. Standardübersicht

Tabelle 1.109: Schaltzeichen der Elektrotechnik

Standard	Titel	Bemerkung
TGL 16001	Begriffe	
TGL 16004	Frequenzen, Frequenzbänder	
TGL 16005	Allgemeine Kennzeichen	
TGL 16006	Kennzeichen für Strom-, Spannungs- und Schaltarten	
TGL 16007	Leitungen und Leitungsverbindungen	
TGL 16008/01	Widerstände, allgemein	
TGL 16008/02	Widerstände, Darstellung der Belastbarkeit	
TGL RGW 864	Kondensatoren, allgemein	Ersatz für TGL 16009/01
TGL RGW 869	Induktionsspulen, Drosseln, Transformatoren, Transduktoren, Magnetverstärker	Ersatz für TGL 16010/01 bis 04

Tabelle 1.109 (Fortsetzung)

Standard	Titel	Bemerkung
TGL RGW 652	Antennen	Ersatz für TGL 16011
TGL RGW 862	Ableiter, Sicherungen	Ersatz für TGL 16012
TGL RGW 653	Elektrochemische Quellen, elektrothermische Quellen	Ersatz für TGL 16013
TGL RGW 865	Elektronenröhren und Gasentladungsröhren	Ersatz für TGL 16014/01 bis 03
TGL 16017	Piezoelektrische und magnetostriktive Elemente	
TGL RGW 867	Höchstfrequenzelemente	Ersatz für TGL 16018/01 bis 02
TGL RGW 661	Halbleiterbauelemente	Ersatz für TGL 16016
TGL 16019	Elektromechanische und mechanische Elemente	
TGL 16020	Magnetspulen und Thermorelaisspulen	
TGL RGW 287	Schaltgeräte und Kontaktverbindungen	

Tabelle 1.109 (Fortsetzung)

Standard	Titel	Bemerkung
TGL RGW 655	Rotierende elektrische Maschinen	Ersatz für TGL 16025
TGL 16026	Meßinstrumente, Meßgeräte und elektrische Uhren	
TGL RGW 866	Lichtquellen	
TGL RGW 868	Elektroakustik	
TGL 16051/01	Anlagen der Leistungselektrik, Kraftwerke und Stationen (Kurzzeichen)	
TGL 16052/01	Ein- und Ausgabegeräte der Informationstechnik, allgemein	
TGL 16052/02	Ein- und Ausgabegeräte der Informationstechnik, Fernwirktechnik	
TGL RGW 657	Fernsprechapparate	
TGL RGW 658	Fernsprechvermittlungsstellen und -plätze	
TGL RGW 659	Fernsprechvermittlungssysteme	
TGL RGW 654	Maser und Laser	
TGL 16056/01	Logische binäre Elemente; Übersicht und allgemeine Festlegungen	
TGL 16056/02	– ; Ein- und Ausgänge	
TGL 16056/03	– ; logische Verknüpfungsglieder	
TGL 16056/04	– ; Trigger	
TGL 16056/05	– ; kombinierte Elemente	
TGL 16060	Installationstechnik	
TGL 16091	Anschlüsse und Leiter	

1.7.2. Begriffe

Schaltzeichen sind Symbole zur zeichnerischen Darstellung von elektrotechnischen Bauteilen, Geräteteilen, Geräten, Anlagenteilen, Anlagen und Leitungen auf Schaltplänen.
Es werden 3 Arten von Schaltzeichen unterschieden:

Schaltzeichen ausführlich sind Schaltzeichen, die die elektrotechnischen Merkmale ausführlich erkennen lassen. Sie tragen den konstruktiven Merkmalen nur insoweit Rechnung, als diese zum Verständnis unerläßlich sind.

Schaltzeichen vereinfacht sind Schaltzeichen von einem oder mehreren Bauteilen einer Schaltung, die die elektrotechnischen Einzelheiten nicht erkennen lassen. Sie werden in Schaltplänen angewendet, bei denen Einzelheiten, z. B. Klemmen, Buchsen, zum Verständnis nicht erforderlich sind.

Schaltungskurzzeichen sind Schaltzeichen zur zusammenfassenden Darstellung der Wirkungsweise eines Bausteines, Gerätes, Anlagenteiles oder einer Anlage.

Elektrotechnische Kennzeichen sind Teile von Schaltzeichen. Sie dienen zur Ergänzung der Schaltzeichen in Schaltplänen (s. Tabelle 1.110).

Tabelle 1.110: Elektrotechnische Kennzeichen

Benennung	Zeichen
positiv	+
negativ	—
Mittelpunkt, neutraler Punkt	N
Energiefluß in einer Richtung	→ oder ←
in beiden Richtungen, nicht gleichzeitig	⟷
in beiden Richtungen, gleichzeitig	⟷
Lineare Verstellbarkeit	↗
Abgleichbare Verstellbarkeit	↗
Abschirmung einer Baueinheit	▭
Begrenzungslinie	—·—
Gehäuse mit Abschirmung Gehäuse mit Masse verbunden Abschirmung mit Erde verbunden	▭ ⏚
Gleichspannung, Gleichstrom	—
Wechselspannung, Wechselstrom niedriger Frequenz	~
Tonfrequenz	≋
Hochfrequenz	≋
Wechselstrom mit Phasen-, Frequenz- und Spannungsangabe, z. B. Vierleiterdrehstrom, 3 Außenleiter, neutraler Leiter, 50 Hz, 380/220 V	3 N ~ 50 Hz 380/220 V
Gleich- und Wechselstrom	⎓
Dreiphasen-Sternschaltung mit Mittelanzapfung	Y
Dreiphasen-Dreieckschaltung	△
Dreiphasen-Zickzackschaltung	Y

1.7.3. Schaltzeichen, Schaltkurzzeichen

In den Tabellen 1.111 und 1.112 sind die in der Standardübersicht (Tabelle 1.109) erfaßten Schaltzeichen auszugsweise dargestellt.

Tabelle 1.111: Schaltzeichen

Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Leitungen		
Leitung, Kabel, Schiene, Gruppenverbindungsleitung, einadrig, allgemein Anmerkung: Falls erforderlich, sind für Gruppenverbindungsleitungen breite Linien zu verwenden.		
Leitung *n*-adrig Anmerkung: Leitungen zweiadrig, dreiadrig und vieradrig werden durch die entsprechende Anzahl von Querstrichen gekennzeichnet, z. B. Leitung dreiadrig		
Zusammengefaßte Darstellung für mehrere Leiter		
Kreuzung von 2 Leitungen einadrig		
Gruppe von *n* Leitungen mit einer Abzweigung von *n* Leitungen		
Grafische Zusammenführung zu einer Gruppenverbindungsleitung oder zum Kabelbaum		
Leiter auf der ganzen Länge abgeschirmt Anmerkung: Es ist zulässig, die Kennzeichnung nur auf einzelnen Streckenabschnitten anzugeben.		
Koaxialkabel		
Leitungsverbindungen		
Erdung		
Schutzerdung		
Elektrische Verbindung mit dem Gehäuse Anmerkung: Falls erforderlich, kann die Strichelung fortgelassen werden. In diesem Fall muß das Gehäuse durch eine breite Linie dargestellt werden.		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Isolationsfehler		
zwischen den Leitern		
zwischen Leiter und Erde		
Widerstände		
allgemein		
verstellbar, mit möglichen Stromkreisunterbrechungen		
verstellbar, ohne Stromkreisunterbrechung		
Kondensatoren		
allgemein		
Elektrolytkondensator, gepolt		
Elektrolytkondensator, ungepolt		
Drehkondensator		
Trimmer		
Spulen und Transformatoren	vereinfacht	ausführlich
Spule, Wicklung allgemein Anmerkung: Die Anzahl der Halbkreise ist beliebig, jedoch nicht < 2.		
Spule mit Eisenkern, Kern mit Luftspalt		
Spule mit verstellbaren Anzapfungen		
Drosselspule		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

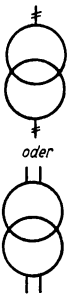
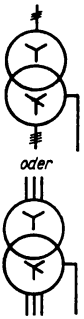
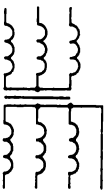
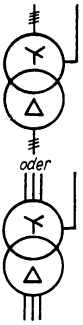
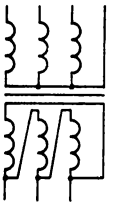
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Einphasen-Transformator		
Bezeichnung eines Einphasen-Transformators 6/0,4 kV, U_K 4%, 1000 kVA, 50 Hz		
Dreiphasen-Transformator Stern-/Sternschaltung mit herausgeführtem Mittelpunkt		
Sternschaltung mit herausgeführtem Mittelpunkt/Dreieckschaltung		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

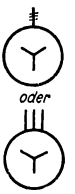
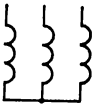
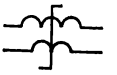
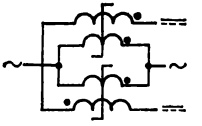
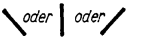
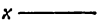
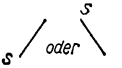
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Dreiphasen-Drosselspule in Sternschaltung		
Spartransformator, allgemein		
Transduktor, allgemein		
Transduktor mit parallel geschalteten Arbeitswicklungen und in Reihe geschalteten Steuerwicklungen		
Speichertransformatoren (Ringkernspeicher) allgemein		
Kern		
Treibleitung x		
Treibleitung y		
Leseleitung, Schreibleitung		
Blockierungsleitung		
Wicklung mit 3 Windungen auf einem Kern		
Wandler		
Stromwandler Primärwicklung		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

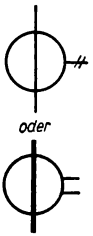
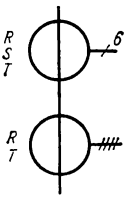
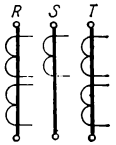
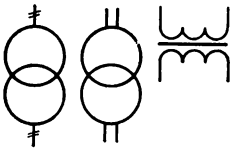
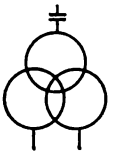
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Sekundärwicklung		
mit einer Primär- und einer Sekundärwicklung		
Stromwandler in einer Drehstromleitung; 2 Wandler mit 2 Sekundärwicklungen 1 Wandler mit einer Sekundärleitung		
Spannungswandler, allgemein		
Kapazitiver Spannungswandler mit einer Wicklung zur Erdschlußerfassung		
Sicherungen und Ableiter		
Sicherung, allgemein		
Trennsicherung		
Leitungsschutzschalter		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

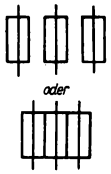
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Durchschlagsicherung		
Beispiel: 3 Sicherungen, nebeneinander gezeichnet		
Ableiter, allgemein		
Vakuumableiter		
Antennen		
allgemein		
Sendeantenne		
Empfangsantenne		
Dipol, allgemein		
Schleifendipol mit Direktoren und Reflektor		
Antenne mit rotierendem Richtdiagramm		
Antenne mit schwenkendem Richtdiagramm		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

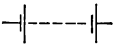
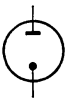
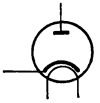
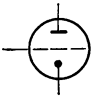
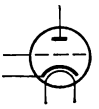
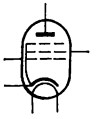
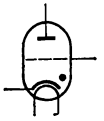
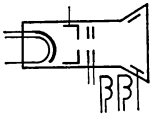
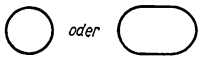
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Batterien und Thermoelemente		
Galvanisches Element, allgemein		
Batterie, bestehend aus Primär- oder Sekundärzellen, z. B. 48 V		
Thermoelement		
Röhren		
Diode, indirekt beheizt		
Triode, indirekt beheizt		
Pentode, Bremsgitter im Innern mit Katode verbunden		
Thyratron		
Bildröhre mit Fokussierung und elektromagnetischer Ablenkung in zwei zueinander senkrechten Richtungen		
Halbleiter		
Gehäuse eines Halbleiterbauelementes		
Anschluß eines Halbleiterbauelementes		
– elektrisch mit dem Gehäuse nicht verbunden		
– elektrisch mit dem Gehäuse verbunden		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

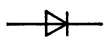
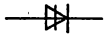
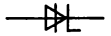
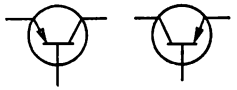
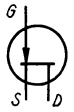
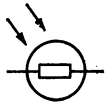
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
– Außenanschluß des Gehäuses		
Diode, allgemein		
Kapazitätsdiode		
Tunneldiode		
Thyristordiode, rückwärts sperrend		
Thyristordiode, rückwärts leitend		
Thyristor, allgemein		
pnp-Transistor		
npn-Transistor, Kollektor mit Gehäuse verbunden		
pnp-Transistor mit Anschluß des Schirms		
Feldeffekt-Transistor mit n-Kanal G gate (Tor) S source (Quelle) D drain (Senke)		
Feldeffekt-Transistor mit isoliertem Tor, Anreicherungstyp mit p-Kanal		
Feldeffekt-Transistor mit isoliertem Tor, Verarmungstyp mit p-Kanal		
Optoelektrische Elemente		
Fotoelement mit symmetrischer Leitfähigkeit (Fotowiderstand)		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

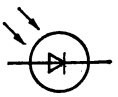
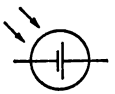
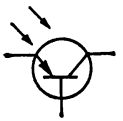
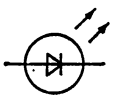
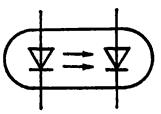
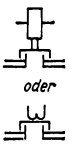
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Fotozelle mit asymmetrischer Leitfähigkeit (Fotodiode)		
Foto-Spannungs-Zelle (Solarzelle)		
Foto-Transistor Typ pnp		
Fotolumineszenzdiode (Leuchtdiode)		
Optoelektronischer Koppler und Leuchtdiode (Diodenoptron)		
Elektromechanische und mechanische Elemente		
Antriebselemente Betätigung durch Hand		
elektromagnetisch		
pneumatisch oder hydraulisch		
elektromotorisch		
Schwimmer		
Feststellvorrichtung, allgemein		
Sperrklinke, allgemein		
Schaltschloß, allgemein (Einrichtungen für Sperrung und Freigabe des selbsttätigen Rückgangs, Freiauslösung)		
Elektromagnetische Kupplung, gelöst		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

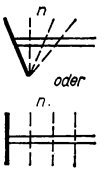
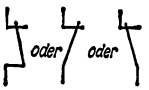
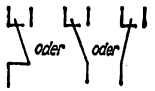
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Bremse, allgemein		
Rolle, allgemein		
Kennzeichnung von Schaltstellungen (breite Linie ist die Ausgangsstellung)		
Schaltgeräte		
Kontakte eines Schaltgeräts, allgemeine Schaltzeichen		
Schließer		
Öffner		
Umschalter		
Kontakt zu einer Kontaktgruppe, der früher als die anderen Kontakte der Gruppe anspricht, z. B. Schließer		
Kontakte in einer Kontaktgruppe, der später als die anderen Kontakte der Gruppe anspricht, z. B. Schließer		
Verzögerungsschließkontakt beim Ansprechen		
Verzögerungsöffnungskontakt beim Ansprechen		
Kontakt ohne selbsttätige Rückkehr, z. B. Schließer		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

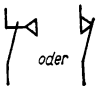
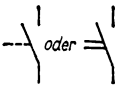
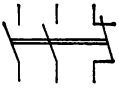
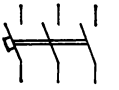
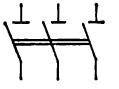
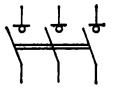
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Kontakt mit selbsttätiger Rückkehr, z. B. Öffner		
Leistungskontakt (Schützkontakt)		
Schließer		
Schließer mit Lichtbogenlöschung		
Kontakt eines Trenners		
Kontakt mit automatischer Auslösung		
Kontakt mit mechanischer Verbindung Schließer		
Thermokontakt Schließer		
Dreipoliger Schalter mit Schließern und 1 Öffner		
Dreipoliger Schalter mit automatischer Auslösung bei Überstrom		
Wegeschalter, einpolig		
Dreipoliger Trenner		
Dreipoliger Lasttrennschalter		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

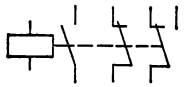
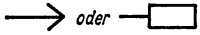
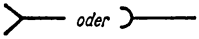
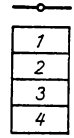
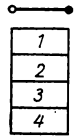
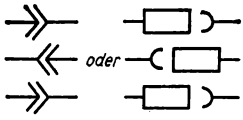
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Druckknopfschalter mit Schließkontakt		
Elektrisches Relais mit einem Schließer, einem Öffner und einem Umschalter		
Anmerkung: Die Schaltzeichen der Kontakte von Schaltgeräten dürfen mit nebenstehenden Ergänzungen versehen werden.		
Kontaktverbindungen		
Steckverbindung:		
Stecker		
Buchse		
Trennbare Verbindung		
Untrennbare Verbindung		
Steckkontaktverbindung		
Kontaktbrücke		
Klemmleiste z. B. mit trennbaren Verbindungen		
z. B. mit trennbaren und nichttrennbaren Verbindungen		
Steckverbindung mit Schutzkontakt		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

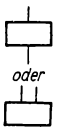
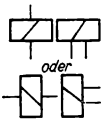
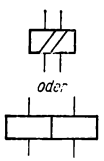
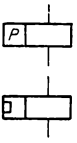
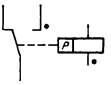
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Elektromagnetische Spulen		
Spule, Relais, Schütze, allgemein		
Spule mit 2 Wicklungen		
Spule mit Differentialwicklung		
Spule mit Arbeitsstromwicklung		
Spule mit Ruhestromwicklung		
Spule mit Überstromwicklung		
Spule einer gepolten elektromagnetischen Einrichtung		
Anmerkung: Der mit einem Punkt gekennzeichnete Kontakt schließt sich bei Anlegen einer Gleichspannung, deren positiver Pol an dem mit einem Punkt gekennzeichneten Anschluß liegt.		
Rotierende elektrische Maschinen		
Gleichstromgenerator, allgemein		
Gleichstrommotor, allgemein		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

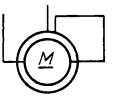
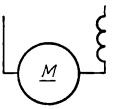
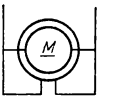
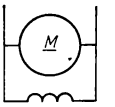
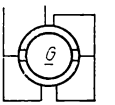
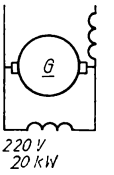
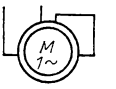
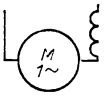
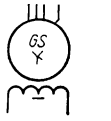
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Reihenschlußmotor		
Nebenschlußmotor		
Generator mit Verbunderregung, z. B. 220 V 20 kW		
Wechselstromgenerator, allgemein		
Wechselstrommotor, allgemein		
Einphasen-Kommutatormotor mit Reihenschlußerregung		
Synchrongenerator für Dreiphasenstrom, Wicklungen in Sternschaltung mit herausgeführtem Nulleiter		
Asynchronmotor mit kurzgeschlossenem Läufer, Angabe der Schaltung und Phasenzahl, z. B. Dreieckschaltung, 3 Phasen		
Dreiphasen-Asynchronmotor mit Schleifringläufer		
Meßinstrumente		
Spannungsmesser, allgemein		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

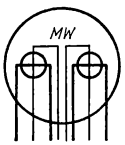
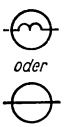
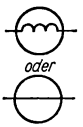
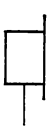
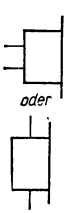
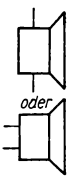
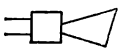
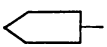
Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Strommesser, allgemein		
Drehstromleitungsmesser mit 2 Meßwerten, Skale in MW geeicht		
Meßwerke		
Strommesser mit einer Wicklung		
Spannungsmesser mit einer Wicklung		
Einphasiger Leitungsmesser		
Lichtquellen		
allgemein		
Glühlampe		
Gasentladungslampe		
Elektroakustik		
Fernhörer		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

Benennung	Schaltzeichen vereinfacht	ausführlich
Mikrofon		
Lautsprecher		
Wecker, allgemein		
Elektrischer Gong		
Summer		
Hupe		
Sirene		
Aufzeichnungs- oder Wiedergabekopf		
Piezoelektrisches Element		
Magnetostriktives Element		

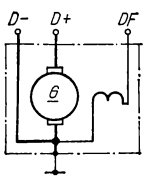
Benennung	Schaltzeichen Kurzzeichen	Beispiel
Elektrische Ausrüstung/Straßenfahrzeuge		
Gleichstromlichtmaschinen		

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

Benennung	Schaltzeichen Kurzzeichen	Beispiel
Wechselstromlichtmaschine mit eingebautem Gleichrichter	DF R D- N 30	ausführlich D- DF N R 30
Anlasser, Einschaltung einstufig	30 50	ausführlich 30 50
Regler	61 51 Reg. D- D+ DF	
Zündkerze mit Störschutzwiderstand		
Zündspule	15 1 4	15 1 4
Blinkgeber, allgemein	49a C 49	ausführlich 49 49a C

Tabelle 1.111 (Fortsetzung)

Benennung	Schaltzeichen Kurzzeichen	Beispiel
Blinkgeber für Richtungs- und Warnblinken		
Kombinationsleuchte, bestehend aus Blinkleuchte, links; Schlußleuchte, Rückfahrleuchte, Bremsleuchte	4	54L 58 58 54
Scheinwerfer mit Fern-, Abblend- und Standlicht	3 56a 56b 58 31	56a 56b 58 31
Umlaufwischermotor mit Endausschalter	M 31b 54 54d 31	ausführlich M 31b 54 54d 31
Zündanlaßschalter	15 50 30	
Fahrtrichtungsanzeige, Lichthupe und Horn (einkreisig)	L R 56a 31b 49a 15 31	L R 56a 31b 49a 15 31

Tabelle 1.112: Schaltungskurzzeichen

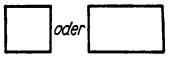
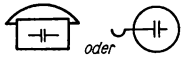
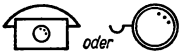
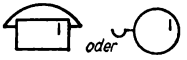
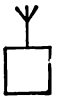
Benennung	Schaltungskurzzeichen
Geräte, z. B. anzeigendes Meßgerät	
registrierendes Meßgerät	
integrierendes Meßgerät	
Hauptuhr	
Fernsprechapparat, allgemein	
Fernsprechapparat, OB-Betrieb	
Fernsprechapparat mit Nummernwählscheibe	
Fernsprechapparat mit Drucktastenwahl	
Münzfernsprechapparat (Taxofon)	
Fernsprechvermittlungsamt, z. B. Hauptamt	
Handvermittlungsamt	
Funkstelle, allgemein	
Verstärker	
Filter	
Transduktor, allgemein	

Tabelle 1.112 (Fortsetzung)

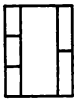
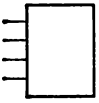
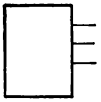
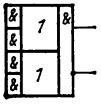
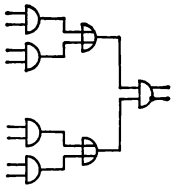
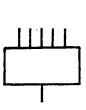
Benennung	Schaltungskurzzeichen
Maser als Quantenverstärker für Höchstfrequenzen	
Laser als optischer Quantengenerator	
Heizgerät mit direkter Erwärmung	
Ofen mit indirekter Erwärmung	
Anlage mit direkter Erwärmung	
Logisches binäres Element	
Hauptfeld mit Nebenfeldern, die in Zonen unterteilt sind	
Hauptfeld mit Eingängen	
Hauptfeld mit Ausgängen	
Gruppe mit dreistufiger Verknüpfungsschaltung	
im Vergleich dazu die bisherige Darstellung	
Schaltungskurzzeichen in Installationsplänen	
Ausschalter, einpolig	

Tabelle 1.112 (Fortsetzung)

Benennung	Schaltungskurzzeichen
Ausschalter, zweipolig	
Gruppenschalter	
Serienschalter	
Wechselschalter	
Kreuzschalter	
Taster	
Leuchttaster	
Elektrischer Türöffner	
Zähler oder Zählertafel mit Sicherungen	
Elektrisches Heizgerät	
Elektrokühlschrank	
Elektroherd	
Waschmaschine	
Verteilung, z. B. mit 5 Abgängen	
Leuchte für Leuchtstofflampe	
Leuchte	

1.8. Schaltpläne

Der Schaltplan ist die Darstellung elektrischer Einrichtungen durch Schaltzeichen, einfache geometrische Figuren oder Listen.

1.8.1. Standardübersicht

Tabelle 1.113: Standardübersicht

Standard	Titel
TGL 16081	Schaltpläne der Elektrotechnik; ESKD des RGW; Grundlagen für Schaltpläne der Elektrotechnik, Begriffe, Klassifikation, Arten
TGL 16082/01	Kurzbezeichnungen; Begriffe, Systematik
TGL 16082/02	Kurzbezeichnungen; Kodebuchstaben für die Bezeichnung von Bauelementen und Bauteilen/Geräten
TGL 16083/01	Schaltpläne zur Übersicht; Übersichtsschaltplan
TGL 16083/02	Schaltpläne zur Übersicht; Schutzrelaisplan
TGL 16083/03	Schaltpläne zur Übersicht; Gruppenverbindungsplan
TGL 16084/01	Schaltpläne zum Erkennen der Funktion; Stromlaufplan
TGL 16084/02	Schaltpläne zum Erkennen der Funktion; Funktionsschaltplan
TGL 16084/03	Schaltpläne zum Erkennen der Funktion; Geräteschaltplan
TGL 16084/04	Schaltpläne zum Erkennen der Funktion; Wirkungsplan
TGL 16084/05	Schaltpläne zum Erkennen der Funktion: Schaltteilliste
TGL 16084/06	Schaltpläne zum Erkennen der Funktion; Potentialliste
TGL 16084/07	Schaltpläne zum Erkennen der Funktion; Eindrucke in Zeichnungsvordrucken
TGL 16085/01	Schaltpläne zur Fertigung; Bauschaltplan
TGL 16085/02	Schaltpläne zur Fertigung; Bauschaltliste
TGL 16085/03	Schaltpläne zur Fertigung; Anschlußplan
TGL 16085/04	Schaltpläne zur Fertigung; Anschlußliste
TGL 16085/05	Schaltpläne zur Fertigung; Belegungsplan
TGL RGW 649	ESKD des RGW; Darstellung von Formkabeln und Leitungen
TGL 16085/07	Schaltpläne zur Fertigung; Legeliste
TGL 16085/08	Schaltpläne zur Fertigung; Eindrucke in Zeichnungsvordrucken
TGL 16085/09	Schaltpläne zur Fertigung; Mischungsplan
TGL 16085/10	Schaltpläne zur Fertigung; Aufstellungsplan
TGL 16087/01	Schaltpläne zur Installation; Installationsplan
TGL 16087/02	Schaltpläne zur Installation; Installationsbauteilliste
TGL 16087/03	Schaltpläne zur Installation; Installationsliste
TGL 16091	ESKD des RGW; Bezeichnung elektrischer Anschlüsse und Leiter

1.8.2. Bezeichnung

Die Bezeichnung der Schaltzeichen in Schaltplänen erfolgt nach TGL 16082/01 und /02 »Kurzbezeichnungen«.

Zusammensetzung der Kurzbezeichnung

Obergruppe

Setzt sich zusammen aus Bestimmungssymbol »=« und Buchstaben und/oder Ziffern. Buchstaben und Ziffern sind nicht standardisiert.

Untergruppe

Setzt sich zusammen aus Bestimmungssymbol »+« und Buchstaben und/oder Ziffern. Buchstaben und Ziffern sind nicht standardisiert.

Bauelement, Bauteil/Gerät

Setzt sich zusammen aus Bestimmungssymbol »–« und Buchstaben für die Art und Ziffern für die laufende Nummer des Bauelementes, Bauteiles/Gerätes sowie aus Ziffern für die

Funktion des Bauelementes. Kodebuchstaben für die Bezeichnung der Art und allgemeinen Funktion des Bauelementes und Bauteiles/Gerätes sind in TGL 16082/02 festgelegt. Eine gekürzte Übersicht enthält Tabelle 1.114.

Tabelle 1.114: Bezeichnung der Art des Bauelementes und Bauteiles/Gerätes

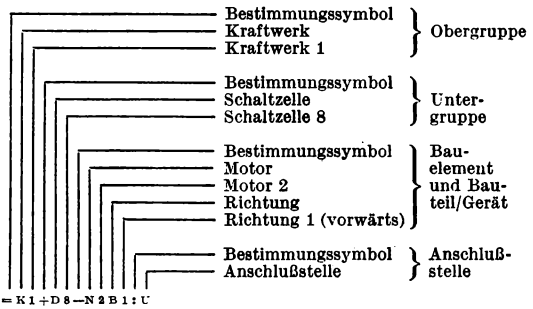
1	2	3
Kodebuchstabe	Art	Beispiel
A	Bauteil-/Geräteeinheiten	Verstärker mit Röhren oder Transistoren, Laser, Leitgeräte für Regler, integrierte Schalteinheiten
B	Energiewandler von nichtelektrischen Größen in elektrische Größen und umgekehrt	thermoelektrische Fühler, Thermozellen, Fotozellen, Drehmelder, Meßumformer, Füllstandsgeber, Buchholzschutz
C	Kondensatoren	Leistungskondensatoren, Störschutzkondensatoren
D	Verzögerungsvorrichtungen, Speichervorrichtungen, binäre Elemente	Verzögerungsleitungen, Magnetplattenspeicher, Magnetbandspeicher, Registrierwerke
E	Verschiedenes	Beleuchtungseinrichtungen, Heizungsvorrichtungen, elektrische Regler, elektrohydraulische Regler
F	Schutzvorrichtungen	Sicherungen, Ableiter, Leitungsschutzschalter, Überstromauslöser
G	Generatoren, Versorgungseinrichtungen	Drehstromgeneratoren, Batterien, Induktoren, Gleichrichter
H	Signaleinrichtungen	Melder, Signallampen
K	Relais, Schütze	Schutzrelais, Hilfsrelais, Zeitrelais, Hilfsschütze
L	Spulen	Induktionsspulen, Drosselspulen
M	Motoren	Drehstrommotoren, Gleichstrommotoren
P	Meßeinrichtungen, Prüfeinrichtungen	Anzeige-, Registrier- und Integrationsmeßgeräte, Signalgeneratoren, Uhren
Q	Leistungs-Schalteinrichtungen	Leistungsschalter, Leistungsschaltschütze, Trenner, Kurzschließer, Lastschalter
R	Widerstände	Vorwiderstände, Nebenwiderstände, Thermistoren
S	Schalter mit mechanischer und Handbetätigung	Befehlsschalter, Steuerschalter, Endschalter, Taster, Installationsschalter, Wahlschalter
T	Transformatoren	Leistungstransformatoren, Spannungswandler, Stromwandler, Transduktoren
U	Modulatoren, Wechsler, Übertragungseinrichtungen	Kodierer, Zeichenumsetzer
V	Röhren, Halbleiter	Elektronenröhren, Transistoren, Thyristoren, Dioden
W	Übertragungswege, Wellenleiter, Antennen	Dipole, Antennen
X	Anschlußklemmen, Stecker, Buchsen, Fassungen	Trenn-Steckverbindungen, Lötanschlußleisten, Klemmenleisten
Y	elektrisch betätigte mechanische Einrichtungen	Kupplungen, pneumatische Ventile, Magnetventile, Magnete
Z	Filter, Begrenzer, Dynamikregler, Ausgleicher	Leitungsnachbildungen, Quarzfilter, Dynamikregler

Anschlußstelle

Setzt sich zusammen aus Bezeichnungssymbol »:« und der Anschlußstellenbezeichnung an Bauelementen und Bauteilen/Geräten, z. B. entsprechend der Festlegung des Herstellers.

Beispiele: Die Beispiele sind frei gewählt und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Vollständige Kurzbezeichnung:



Gekürzte Kurzbezeichnung:



Kodebuchstaben nach Tabelle 1.114.
Zahl frei gewählt, standardmäßig nicht festgelegt.
Bestimmungssymbol nicht erforderlich, Darstellung im Schaltplan gibt eindeutige Aussage.

Tabelle 1.115: Bezeichnungen elektrischer Leiter

Benennung	Bezeichnung
Gleichstrom	
Positiver Außenleiter	+
Negativer Außenleiter	−
Neutraler Leiter (Mittelleiter)	N
Einleiter-Wechselstrom	
Außenleiter R, S, T/jeweiliger neutraler Leiter (Mittelleiter)	R, S, T/N
Zweileiter-Wechselstrom	
Außenleiter R/Außenleiter S	R/S
Außenleiter S/Außenleiter T	S/T
Außenleiter T/Außenleiter R	T/R
Dreileiter-Wechselstrom	
Außenleiter R	R
Außenleiter S	S
Außenleiter T	T
Neutraler Leiter (Mittelleiter)	N
Unabhängiger Wechselstrom/Bahnstrom	
Leiter der Zuleitung des Fahrleitungsnetzes	
1. System	R
2. System	S
Rückleiter	T

1.8.3. Ausführungen

Die elektrischen Einrichtungen in Schaltplänen werden im spannungslosen Zustand, mechanisch betätigte Bauteile in ihrer Null- oder Ausstellung dargestellt. Abweichungen, die dem besseren Verständnis der Schaltung dienen oder die durch die Konstruktion der Bauteile bedingt sind, müssen in den Plänen gekennzeichnet sein.

Für die Darstellung von Schaltgliedern in Schaltplänen gilt: Betätigung von oben nach unten oder von links nach rechts. Leitungen unterschiedlicher Wichtigkeit, Spannung, Polarität oder Betriebsart können durch Liniendicke unterschieden werden. Zusätzliche Angaben, z. B. Meßgrößen, Leiterabmessungen, Leiter- und Gerätebezeichnungen, sind zulässig. Es ist auch zulässig, mehrere Schaltplanarten auf einem Blatt getrennt darzustellen.

Die Auswahl der Schaltzeichen und Kurzbezeichnungen und die Darstellung elektrischer Einrichtungen, z. B. Bauelemente oder Geräteteile, erfolgt nach verbindlichen Standards, Richtlinien und Katalogen der Hersteller oder Montagebetriebe.

In nachstehenden Beispielen sind unterschiedliche Schaltplanarten dargestellt. Die Beispiele sind frei gewählt und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1.8.3.1. Stromlaufplan

Der Stromlaufplan stellt alle Einzelheiten einer elektrotechnischen Schaltung dar (Bild 1.96).

1.8.3.2. Geräteschaltplan

Der Geräteschaltplan stellt die Innenschaltung eines Gerätes und lagerichtig die äußeren Anschlußstellen dar (Bild 1.97).

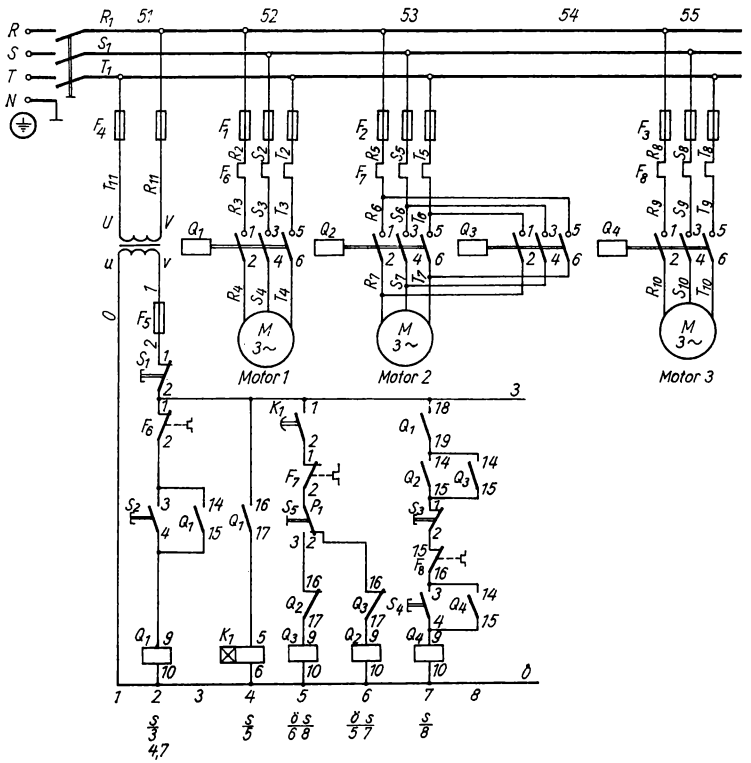


Bild 1.96. Stromlaufplan mit allpoliger Darstellung eines Leistungsteiles (mit Angabe der Stromweg- und Potentialnumerierung)

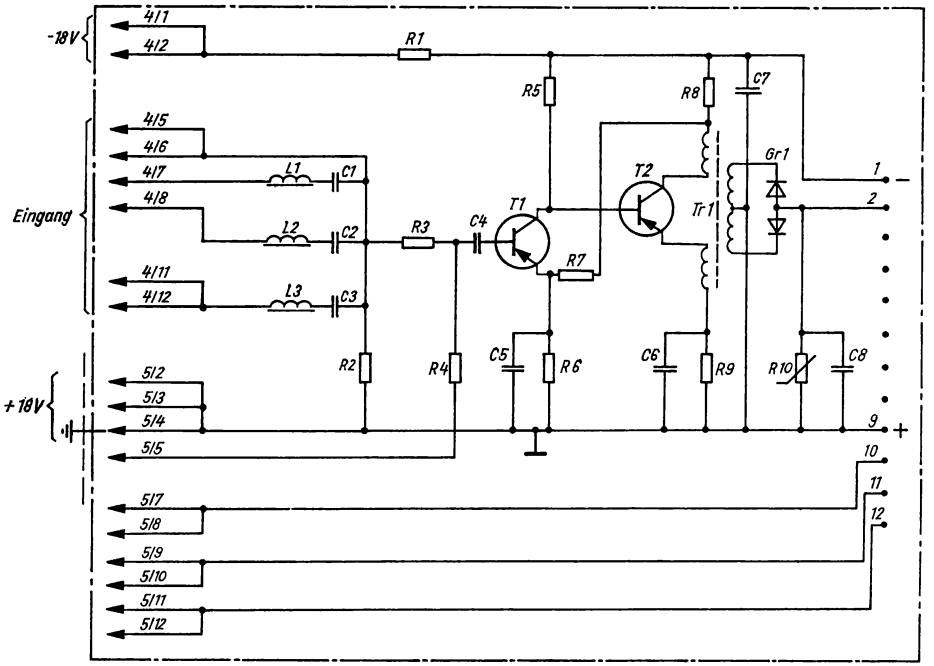


Bild 1.97. Geräteschaltplan am Beispiel eines Steckkartenbausteines

1.8.3.3. Gruppenverbindungsplan

Der Gruppenverbindungsplan stellt in Informationsanlagen die Art und die Anzahl der Verbindungsstufen und deren Verbindungen dar und kennzeichnet die Verbindungsmöglichkeiten (Bild 1.98).

1.8.3.4. Übersichtsschaltplan

Der Übersichtsschaltplan ist die Darstellung der Zusammenschaltung mehrerer Bauteile, Baugruppen und Geräte ohne Berücksichtigung von Einzelteilen. Er ist keine Aufstellung der elektrotechnischen Bauteile und Geräte (Bild 1.99).

1.8.3.5. Funktionsschaltplan

Der Funktionsschaltplan ist die Darstellung der bestimmten Funktion einer Schaltung. Er ist der Auszug aus einem oder mehreren Schaltplänen unterschiedlicher Schaltplangruppen (Bild 1.100).

1.8.3.6. Schutzrelaisplan

Der Schutzrelaisplan gibt eine Übersicht über die Einstellungen der Schutzeinrichtungen in elektrotechnischen Anlagen und Netzen (Bild 1.101).

1.8.3.7. Installationsplan

Der Installationsplan ist die zeichnerische Darstellung der Installation einer Starkstrom- oder Informationsanlage. Er muß die Einbauorte und die für die Montage der elektrotechnischen Bauteile, Baugruppen, Geräte, Leitungen und/oder Kabel erforderlichen Angaben enthalten. Der Installationsplan ist in Bau-, Grundrißzeichnungen oder Lageplänen einzuzeichnen.

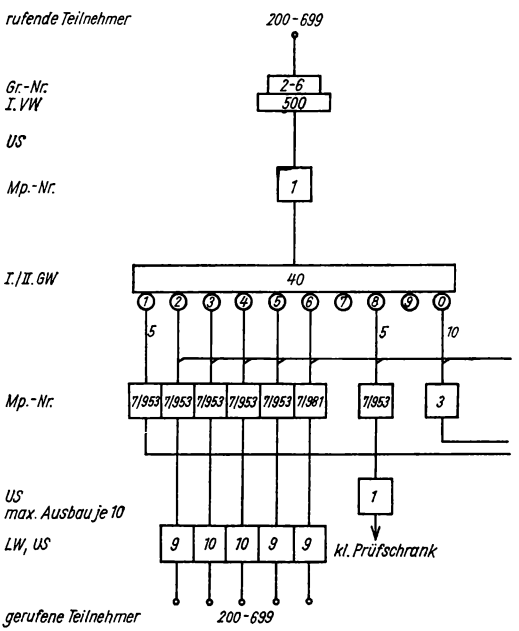


Bild 1.98. Aus dem Gruppenverbindungsplan einer Fernsprecheinrichtung

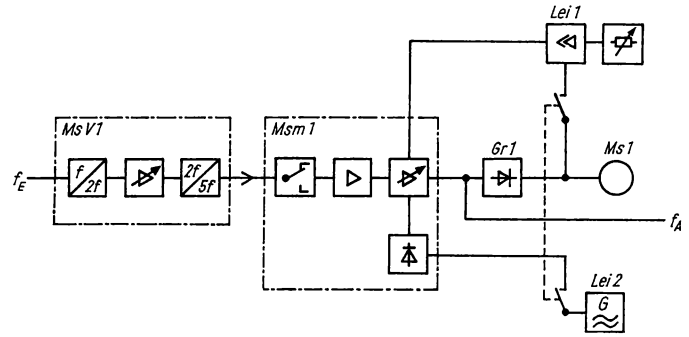


Bild 1.99. Aus dem Übersichtsschaltplan eines Meßgerätes

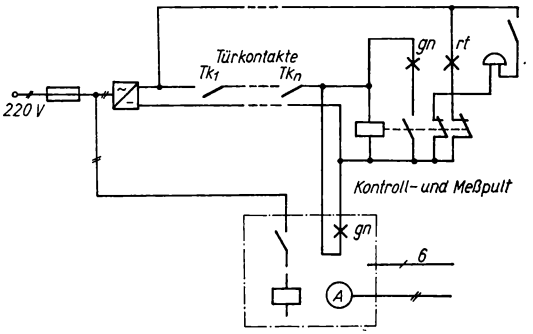


Bild 1.100. Aus dem Funktionsschaltplan einer Blockierungsschleife für Türen und Schränke einer Hochspannungsanlage

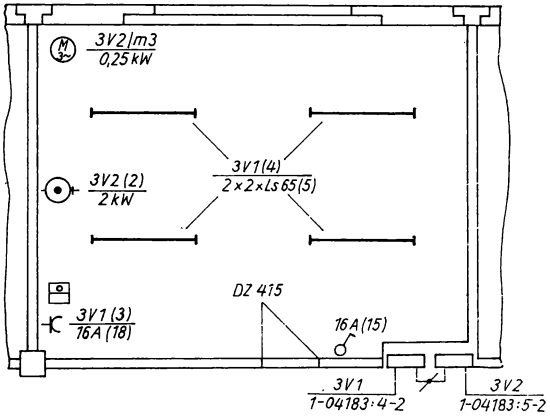


Bild 1.102. Beispiel eines Installationsplans ohne Leitungsführung

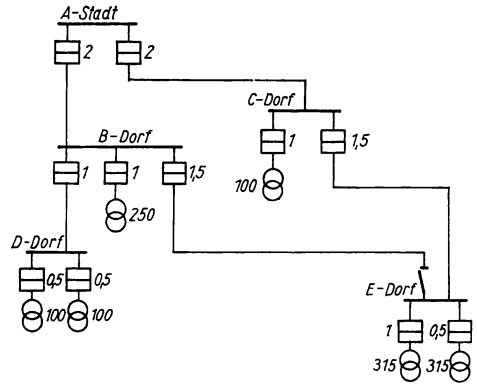


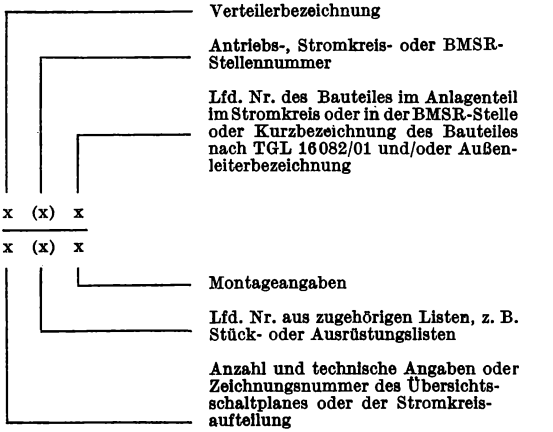
Bild 1.101. Schutzrelaisplan eines Hochspannungsrelais mit Überstromschutz

Vorzugsmaßstäbe

für Installationspläne von Bauwerken 1:50
für Installationspläne von Außenanlagen 1:500

Bauteile, Baugruppen, Geräte, Leitungen und/oder Kabel sind so zu kennzeichnen, daß eine eindeutige Materialauswahl und Montage möglich ist.

Kennzeichnungssystem



Ist die Eindeutigkeit der Aussage gewährleistet, dürfen nichterforderliche Kennzeichnungen entfallen.

Beispiel: An Verteilung 2 V, Feld 3, Stromkreis 25, Außenleiter R ist die Leuchte anzuschließen, bestückt mit 2 Leuchtstofflampen LS 65, lfd. Nr. 16 der Stückliste, Montagehöhe 2,5 m.

$$\frac{2\ V\ 3\ (25)\ R}{2 \times LS\ 65\ (16)\ 2{,}5\ m}$$

Das Beispiel eines Installationsplanes zeigt Bild 1.102.
Zur listenmäßigen Erfassung der im Installationsplan dargestellten Bauteile, Baugruppen und Geräte dient die *Installationsbauteilliste.*
Die Einbauorte und alle für die Montage der Bauteile, Baugruppen, Geräte, Leitungen und/oder Kabel erforderlichen Angaben enthält die *Installationsliste.*
Darstellung häufig angewendeter Schaltungen mit Installationsschaltern in Installationsplänen s. Bilder 1.103 bis 1.107.

1.8.3.8. Bauschaltplan

Der Bauschaltplan ist die lagerichtige Darstellung der Anschlußstellen (Bild 1.108). Er zeigt die Verbindungen innerhalb einer Baugruppe oder eines Geräts.
Er ist die Fertigungsunterlage zur Herstellung der Verbindungen zwischen den Anschlußstellen innerhalb eines Erzeugnisses. Die Vereinfachung des Bp wird neuerdings in der Industrie angestrebt. So entstand die Bauschaltliste (Bl). Sie ist ein Schaltplan mit listenmäßiger Aufstellung der Anschlußstellen.

1.8.3.9. Anschlußplan

Der Anschlußschaltplan ist die zeichnerische Darstellung der Anschlußstellen. Er zeigt die äußeren Verbindungen zwischen den Geräten, Gerätegruppen, Anlagenteilen und Einzelbausteinen. Er ist eine Fertigungsunterlage zur Herstellung der Verbindungen zwischen den äußeren Anschlußstellen mehrerer Erzeugnisse (Bild 1.109).
Genau wie beim Bauschaltplan wird auch beim Anschlußschaltplan eine Rationalisierung angestrebt. Dafür wurde die Anschlußliste geschaffen. Diese ist ein Schaltplan mit listenmäßiger Aufstellung der Anschlußstellen.

1.8.3.10. Belegungsplan

Der Belegungsplan ist ein Ergänzungsplan mit vereinfachter, lagerichtiger zeichnerischer Darstellung der Anordnung der Bauteile und Baugruppen. Er dient zur Eintragung der Kurzbezeichnungen (Bild 1.110). Angaben über Kontaktbestückung, Schaltfunktion, technologische Antriebsbezeichnung und Kabellegung erweitern seine Aufgabe. Er ist eine Fertigungsunterlage als Zwischenglied zwischen mechanischer Grundkonstruktion und Schaltplan. Bauteile, Baugruppen und Anschlußleisten sind als einfache geometrische Figuren darzustellen. Maßstab und Abmessungen sind nicht notwendig.

1.8.3.11. Formkabelplan

Der Formkabelplan ist ein Ergänzungsplan, auf dem ein Formkabel im Maßstab 1:1 zeichnerisch dargestellt ist. Er ist eine Fertigungsunterlage zur Herstellung von Formkabeln. Meist wird das Formkabel spiegelbildlich zu den Anschlußstellen im Gerät dargestellt (Bild 1.111).

1.8.3.12. Wirkungsplan

Der Wirkungsplan (nicht mit dem ehemaligen Wirkschaltplan zu verwechseln) stellt je nach Aufgabenstellung die Erregungs- oder Schaltzustände, die Schaltungsabhängigkeit, die Impulse, die Pegel einer Schaltung dar.
Es sind vier Arten der Darstellung möglich:

1. Darstellung der Schaltzustände oder Erregungszustände,
2. Darstellung der Schaltungsabhängigkeit,
3. Darstellung der Impulse,
4. Darstellung der Pegel.

Für den Schaltzustand oder für den Erregungszustand werden gesonderte Symbole verwendet, die in TGL 16084/04 enthalten sind. Bei Bedarf können diese erweitert werden, wenn die Bedeutung auf dem Wirkungsplan angegeben wird. Durch die aufgelöste Darstellung ist es gut möglich, die Reihenfolge bestimmter Schalthandlungen zu verfolgen. Werden noch zusätzlich Zeitangaben getroffen, lassen sich Programme abwickeln.
Das Beispiel eines Wirkungsplanes zeigt Bild 1.112.

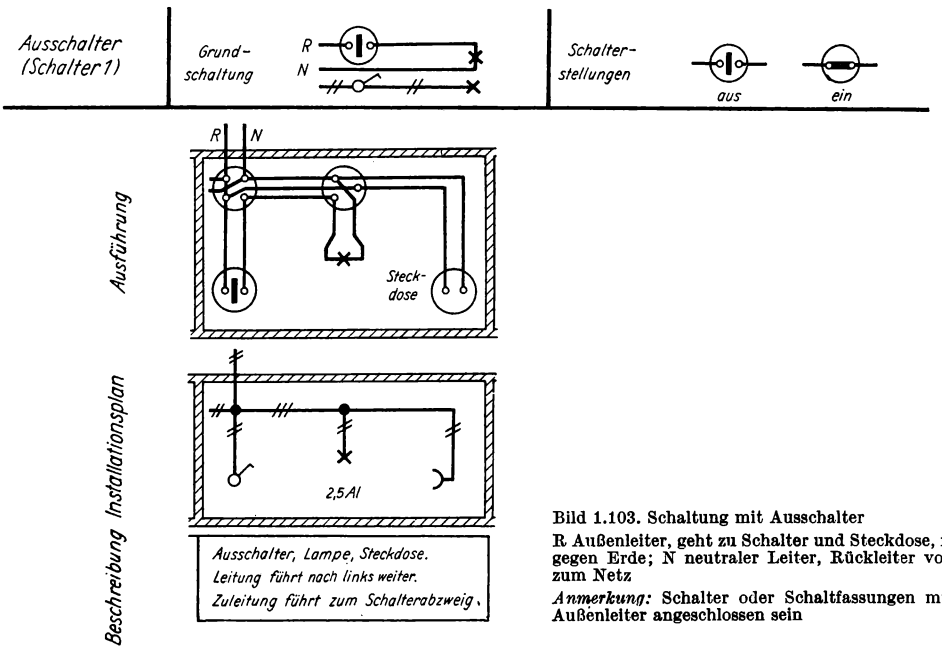


Bild 1.103. Schaltung mit Ausschalter

R Außenleiter, geht zu Schalter und Steckdose, führt Spannung gegen Erde; N neutraler Leiter, Rückleiter vom Verbraucher zum Netz

Anmerkung: Schalter oder Schaltfassungen müssen stets am Außenleiter angeschlossen sein

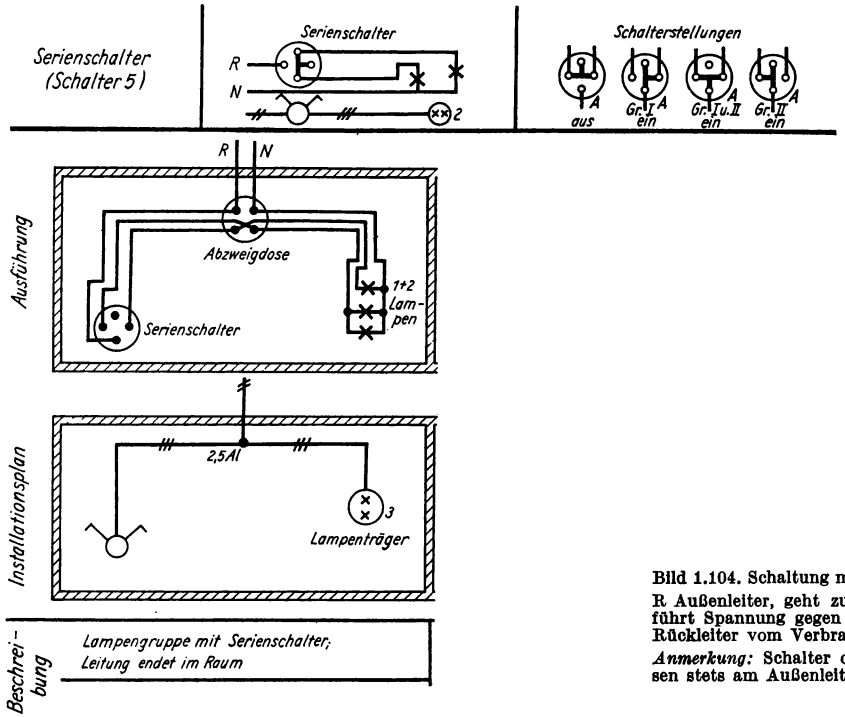


Bild 1.104. Schaltung mit Serienschalter
R Außenleiter, geht zu Schalter und Steckdose, führt Spannung gegen Erde; N neutraler Leiter, Rückleiter vom Verbraucher zum Netz
Anmerkung: Schalter oder Schaltfassungen müssen stets am Außenleiter angeschlossen sein

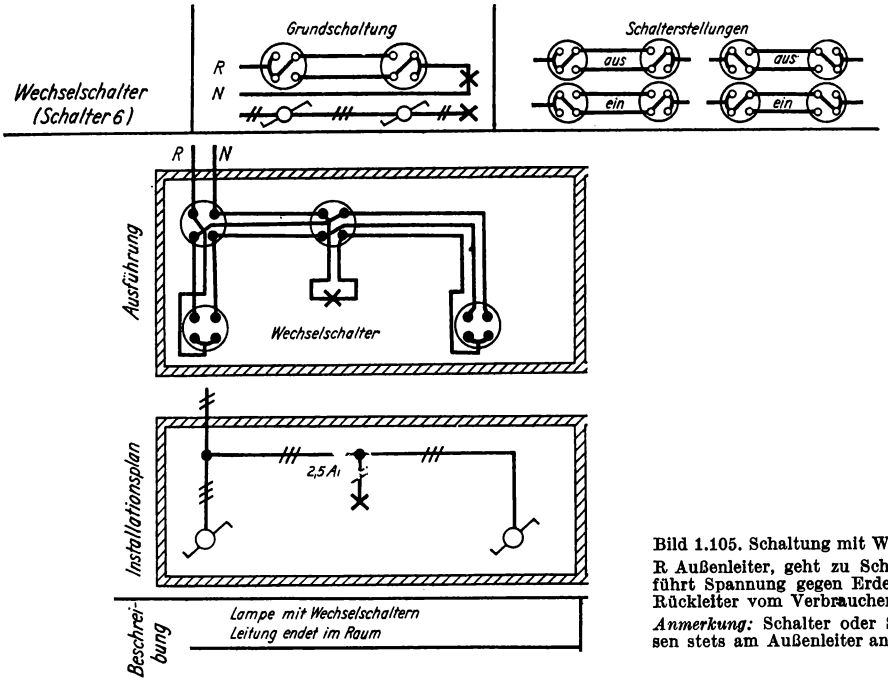


Bild 1.105. Schaltung mit Wechselschaltern
R Außenleiter, geht zu Schalter und Steckdose, führt Spannung gegen Erde; N neutraler Leiter, Rückleiter vom Verbraucher zum Netz
Anmerkung: Schalter oder Schaltfassungen müssen stets am Außenleiter angeschlossen sein

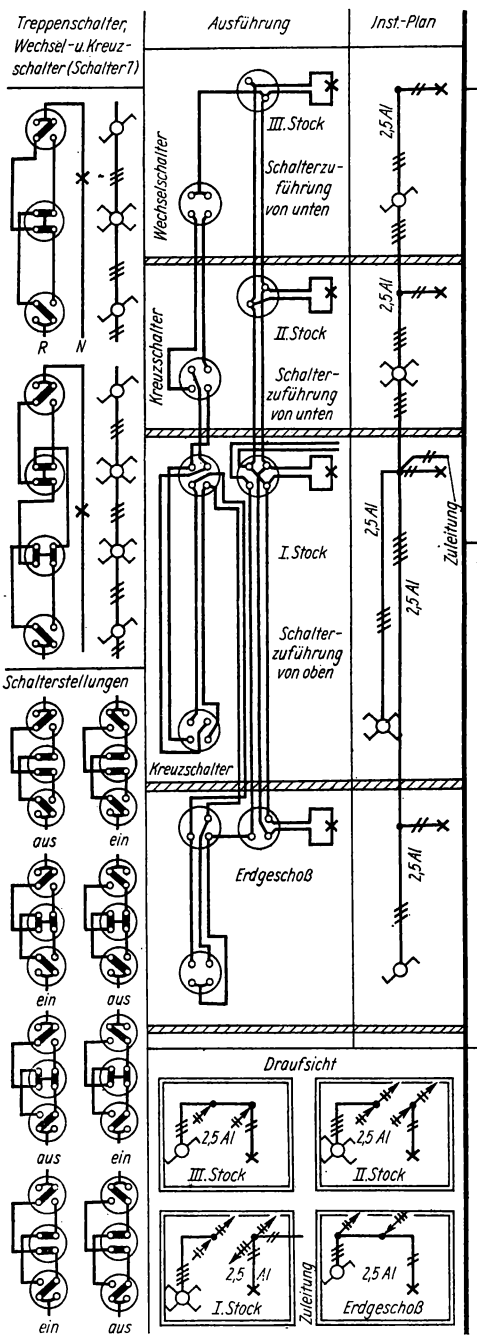


Bild 1.106. Schaltung mit Wechsel- und Kreuzschaltern, z. B. in Treppenhäusern

R Außenleiter, geht zu Schalter und Steckdose, führt Spannung gegen Erde; N neutraler Leiter, Rückleiter vom Verbraucher zum Netz

Anmerkung: Schalter oder Schaltfassungen müssen stets am Außenleiter angeschlossen sein

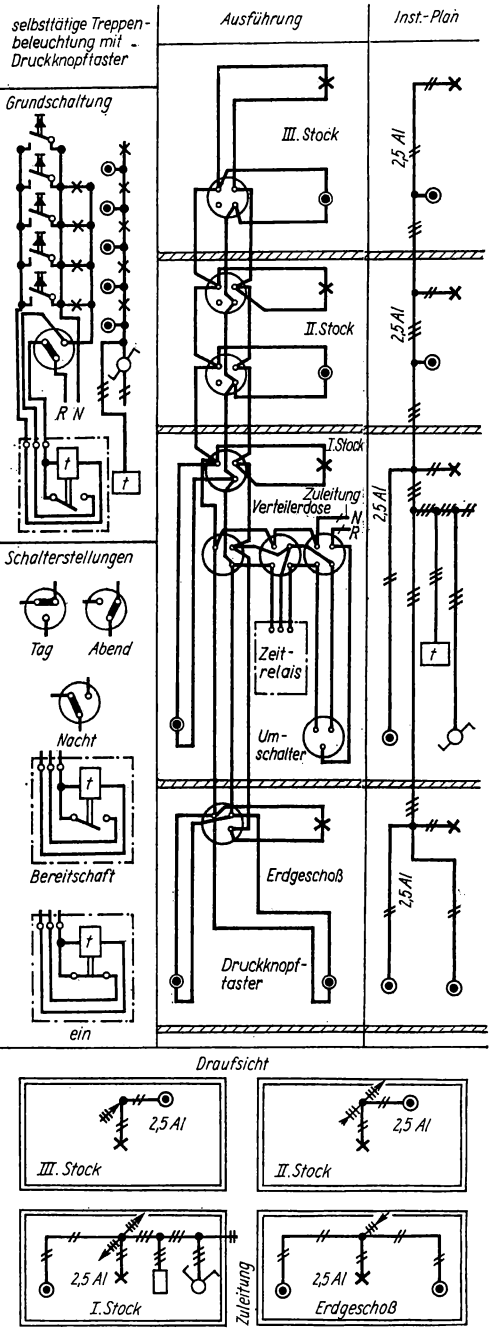


Bild 1.107. Schaltung für selbsttätige Treppenbeleuchtung

R Außenleiter, geht zu Schalter und Steckdose, führt Spannung gegen Erde; N neutraler Leiter, Rückleiter vom Verbraucher zum Netz

Anmerkung: Schalter oder Schaltfassungen müssen stets am Außenleiter angeschlossen sein

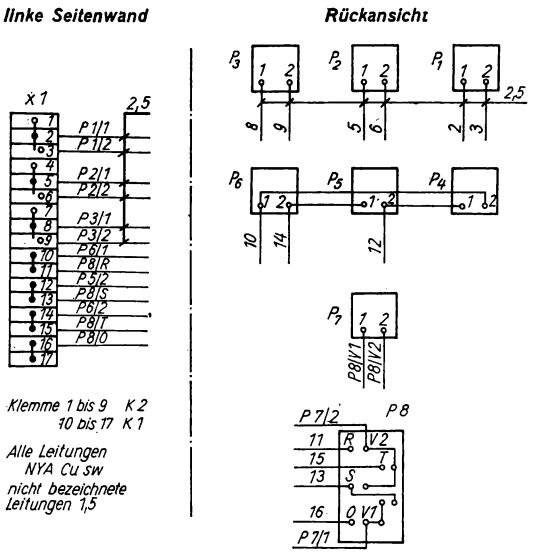


Bild 1.108. Bauschaltplan einer Meßtafel mit Zielbezeichnung

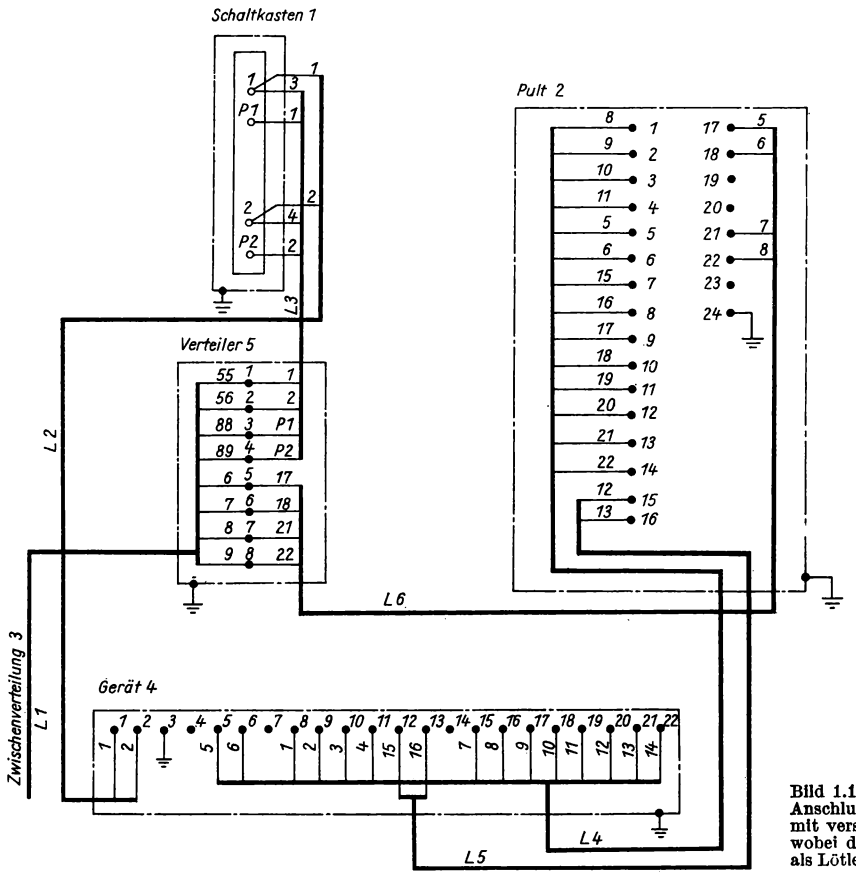


Bild 1.109. Beispiel eines Anschlußplanes für eine Anlage mit verschiedenen Anlagenteilen, wobei die Anschlußstellen als Lötleisten ausgeführt sind

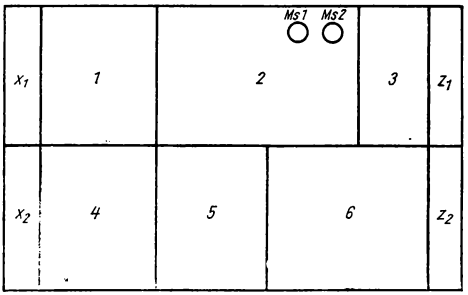


Bild 1.110. Belegungsplan eines Schrankes, bestehend aus 2 Baugruppen
X_1; X_2 Steckerleisten, Z_1; Z_2 Lötleisten, 1···6 Bauteile

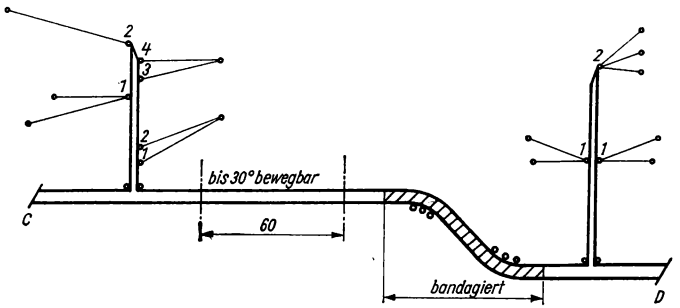


Bild 1.111. Teil eines Fernkabelplanes

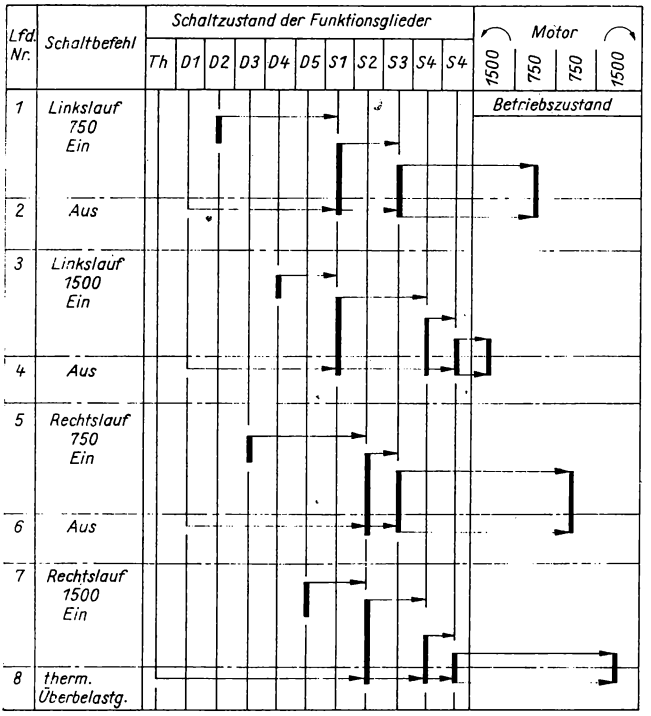


Bild 1.112. Beispiel eines Wirkungsplanes mit Darstellung der Schalterstände

Symbole für die Darstellung der Schaltzustände:

Beginn oder Ende der Erregung
Öffner, Ruhekontakt geschlossen
Schließer, Arbeitskontakt geschlossen
Überschneidung Öffner-Schließer



Beispiele für Schaltzustände

Bauteil mit Öffner
Öffner geschlossen
Betätigung
Öffner geschlossen



Bauteil mit Öffner und Schließer — ohne Überschneidung — mit Überschneidung

Öffner geschlossen
Betätigung
Schließer geschlossen
Betätigung
Öffner geschlossen



1.9. Elektrotechnische Grundlagen

1.9.1. Elektrizität

Die elektrische Ladung ist Bestandteil aller Stoffe. Jedes Atom aller Stoffe besteht aus einem elektrisch *positiv geladenen Kern* und einer Anzahl *negativ geladener Elektronen*, die den Kern umkreisen. Der Kernbaustein positiver Ladung ist das *Proton*, das Elementarteilchen negativer Ladung ist das *Elektron*. *Ladung* und *Ruhmasse* dieser Teilchen sind in Tabelle 1.116 angegeben.

Tabelle 1.116: Daten von Elektron und Proton

Teilchen	Ladung e	Ruhmasse m_0
Elektron	$-4{,}8 \cdot 10^{-19}$ C	$9{,}11 \cdot 10^{-28}$ g
Proton	$+4{,}8 \cdot 10^{-19}$ C	$1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g

Auffällig ist die um etwa drei Zehnerpotenzen größere Ruhmasse des Protons. Hieraus folgt: Die Hauptmasse eines Atoms, des kleinsten einheitlichen Bausteins von Stoffen, ist im Kern angeordnet.
Kern und Elektronen haben eine gleich große, aber elektrisch *entgegengesetzte Ladung* und ziehen sich an. Diese Anziehungskraft nimmt mit zunehmendem Radius der kreisenden Elektronen ab. Dadurch ist es gelegentlich möglich, durch Reibung, Stoß, Erhitzung, Feldeinwirkung oder Bestrahlung Elektronen, also negative Ladungen, vom Kern abzutrennen. Im zurückbleibenden Atom überwiegt dann die positive Ladung. In diesem Fall wird vom *positiv geladenen Ion* (*Kation*) gesprochen. Ein neutrales Atom, welches ein zusätzliches Elektron aufnimmt, wird zum *negativ geladenen Ion* (*Anion*).
Infolge der Masseverteilung zwischen Elektron und Proton ist die Beweglichkeit der Elektronen größer als die der Ionen.
Elektronen und Ionen (Anionen, Kationen) können durch eine elektrische Spannung in Leitern (vgl. 1.9.2.) zur Bewegung gebracht werden, es fließt ein Strom. Die Größe der elektrischen Spannung ist ein Maß für die Bewegungskraft, die auf Elektronen und Ionen wirkt. Dabei werden negative Ladungen (Elektronen, negative Ionen) von der positiven Elektrode und positive Ladungen (positive Ionen) von der negativen Elektrode der Spannungsquelle angezogen.

1.9.1.1. Elektrochemische Spannung

Wird Metall in eine Flüssigkeit getaucht, gehen positiv geladene Metallionen so lange in Lösung, bis ein gewisser *Sättigungszustand* erreicht ist. Der Sättigungszustand wird erreicht, wenn infolge von Rückdiffusion und des entstehenden elektrischen Feldes die gleiche Anzahl Ionen zum Metall zurückwandert wie in Lösung geht. Die Anzahl der im Sättigungszustand gelösten Metallionen entspricht einem für jedes Metall eigenen *Wert*. Der Wert ist temperaturabhängig.
Beim Lösen der positiven Metallionen in der Flüssigkeit nimmt die Flüssigkeit positive Ladung an, während die Metallelektrode infolge Fehlens positiver Ladungen negativ wird. Zwischen Metall und Lösung entsteht ein elektrischer *Potentialsprung*, eine *Spannung*. Diese ist ebenfalls temperaturabhängig.
Werden in eine Lösung zwei Metalle mit verschiedenen Lösungsdrücken getaucht, entsteht zwischen diesen eine *Quellspannung* U_{12}. Diese Urspannung ist gegeben durch die Differenz beider Potentialsprünge:

$$U_{12} = U_1 - U_2$$

Bild 1.113 verdeutlicht die Aussage dieser Gleichung.

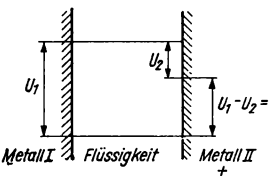


Bild 1.113. Prinzip einer elektrolytischen Spannungsquelle

Die Spannungen in Tabelle 1.117 sind gegen eine normale Wasserstoffelektrode angegeben. Zum Beispiel haben Eisen und Nickel eine Urspannung $U_{12} = -0{,}44 - (-0{,}22) = 0.22$ V gegeneinander, Zink und Kupfer bilden $E = -0{,}76 - (+0{,}345) = 1{,}105$ V. Ist die Lösung ein Elektrolyt und werden die verschiedenen Metallplatten elektrisch leitend miteinander verbunden, fließt infolge der Urspannung U_{12} ein Strom (*Akkumulatoren*). Die *Klemmenspannung* U stellt sich ein zu

$$U = U_{12} - R_i I$$

R_i innerer Widerstand der Spannungsquelle.

Je größer der Laststrom ist, desto stärker sinkt die Klemmenspannung ab. Wird $I = 0$ (Leerlauf), kann an den Klemmen die Urspannung U_{12} gemessen werden.

Tabelle 1.117: Elektrochemische Spannungsreihe

Element	U_n in V	Element	U_n in V
Magnesium	−1,55	Zinn	−0,146
Aluminium	−1,3	Blei	−0,130
Mangan	−1,11	Wasserstoff	−0
Zink	−0,76	Kupfer	+0,345
Chrom	−0,56	Quecksilber	+0,854
Eisen	−0,44	Silber	+0,799
Kadmium	−0.40	Platin	+0,9
Nickel	−0,22	Gold	+1,5

In der Meßtechnik spielen *Normalelemente* eine Rolle. Das WESTON-Normalelement hat bei 20 °C eine Urspannung von 1,018 65 V. Normalelemente dürfen nicht durch Strom belastet werden, da sich dann deren Spannung ändert. Sie können daher nur in Kompensationsschaltungen eingesetzt werden. Tabelle 1.118 gibt die Leistungsmasse galvanischer Elemente an.

Tabelle 1.118: Leistungsmasse galvanischer Elemente

Typ	Leistungsmasse kg/W
Primärelemente (Batterien)	
Zn/MnO_2	4,5
Zn/HgO	6,0
Sekundärelemente (Akkumulatoren)	
Pb/PbO_2	4,5
Ni/Cd	3,5
Ag/Zn	13,0
Brennstoffzellen	
H_2/O_2	44,0

1.9.1.2. Thermospannung

Die *Berührungsspannung* zwischen zwei Metallen beruht auf der unterschiedlichen *thermischen Bewegung der Elektronen*. Die thermische Bewegung der Elektronen und damit die Berührungsspannung nimmt mit der Temperatur zu (SEEBECK-*Effekt*). Im supraleitenden Gebiet verschwindet die Thermospannung.
Tabelle 1.119 gibt die Thermoelektrische Spannungsreihe bei Paarung mit Platin wieder. Die angegebenen Spannungen beziehen sich auf die Temperatur 100 °C.

Tabelle 1.119: Thermoelektrische Spannungsreihe

Positive Reihe Stoff	Spannung + mV
Platin	0,0
Graphit	0,2
Kohle	0.3
V 2 A-Stahl	0,39
Aluminium, Magnesium, Zinn	0,4
Blei, Iridium, Ruthenium (10 Ru)	0,45
Zäsium, Tantal	0,5
Phosphorbronze	0,52
Iridium	0,63
Platin-Rhodium (10 Rh)	0,65
Rhodium-Iridium (66 Rh)	0,66
Manganin (85 Cu, 12 Mn, 2 Ni)	0,69
Rhodium	0,69
Gold, Silber, Zink	0,7
Kupfer	0,76
Wolfram	0,8
Kadmium, Nickelstahl (65 Ni)	0,9
Rhodium-Iridium (60 Rh)	1,0
Molybdän, Uran	1,2
Platin-Rhenium	1,5
Eisen	1,9
Nickel-Chrom (12,5 Cr)	2,0
Nickel-Chrom (10 Cr, 85 Ni)	2,55
Antimon	4,8
Sllit	27
Silizium	45
Tellur	50

Tabelle 1.119 (Fortsetzung)

Negative Reihe Stoff	Spannung − mV
Platin	0,0
Thorium	0,1
Natrium	0,2
Palladium	0,3
Kalium	0,9
Neusilber (Cu, Ni, Zn)	1,0
Nickel	1,5
Kobalt	1,6
Pallaplat-Leg. 32	2,2
Konstantan (55 Cu, 45 Ni)	3,5
Wismut ⊥ zur Kristallachse	5,2
Wismut ∥ zur Kristallachse	7,7

Zur Messung von *Temperaturdifferenzen* wird die Schaltung nach Bild 1.114 verwendet. Die beiden Verbindungsstellen zwischen beiden Metallen werden auf unterschiedlichen Temperaturen gehalten. Die Thermospannung mit höherer Temperatur übertrifft diejenige mit niedrigerer Temperatur. Der

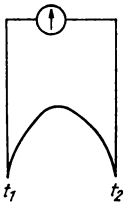


Bild 1.114. Schaltung von Thermoelementen zur Messung von Temperaturdifferenzen

Spannungsmesser zeigt eine Spannung an. Im Kreis fließt ein *Thermostrom*. Die beschriebene Vorrichtung wird *Thermoelement* genannt. Aus der Größe der Thermospannung kann die Temperaturdifferenz ($t_2 - t_1$) der beiden Verbindungsstellen nach Eichung sehr genau bestimmt werden.

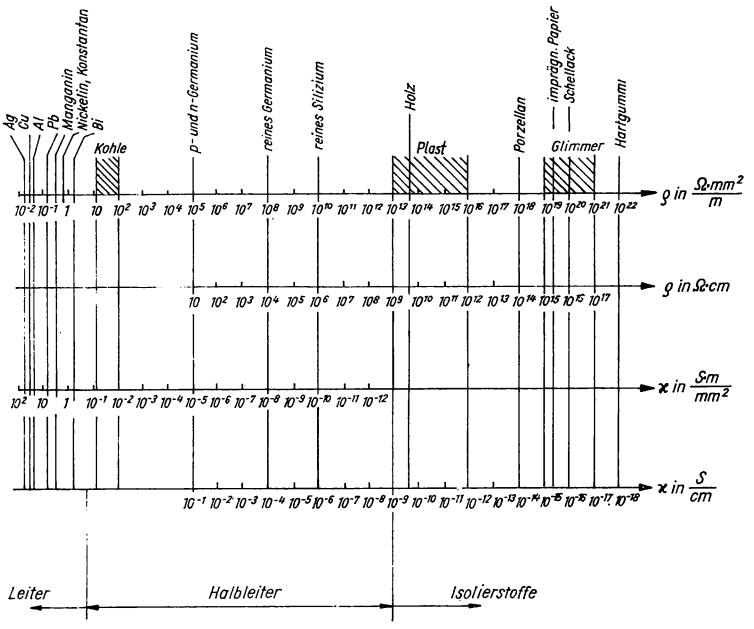


Bild 1.115. Übersicht zum spezifischen elektrischen Widerstand ϱ und zur elektrischen Leitfähigkeit einiger Stoffe

Die Umkehrung des Thermoeffekt ist der PELTIER-*Effekt*: Fließt ein Strom durch die Verbindungsstelle zweier Metalle, so tritt je nach Stromrichtung eine Erwärmung oder Abkühlung der Verbindungsstelle ein.

1.9.1.3. Piezoelektrizität

Gewisse Kristalle, die zunächst in mechanisch nicht beanspruchtem Zustand an der Oberfläche elektrisch neutral sind, zeigen bei Druck oder Zug an ihrer Oberfläche elektrische Ladungen (*Piezoeffekt*). Diese Ladung wird verursacht durch mechanische Beanspruchung, die eine Verschiebung der Ladungsträger im Kristalleiter aus dem Gleichgewichtszustand hervorruft. Zwischen der Größe der mechanischen Beanspruchung und der Menge der Oberflächenladung besteht Proportionalität.
Nachfolgend sind *piezoelektrische Kristalle* genannt:

Quarz,
Topas,
Turmalin,
Seignettesalz,
Zinkblende,
Bariumtitanat.

Damit ist es möglich, z. B. Druckmeßdosen, Abtasteinrichtungen von Schallplatten und Mikrofone nach diesem Prinzip aufzubauen.
Der gesamte Vorgang ist umkehrbar. Dabei verformen sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung diese Kristalle. Einige ziehen sich zusammen, andere dehnen sich aus (*Elektrostriktion*). Nach diesem Prinzip arbeiten z. B. Schwingquarze und andere elektromechanische Resonatoren. In der Regel ist die mechanische Wirkung dem Quadrat der angelegten Spannung proportional, also unabhängig vom Vorzeichen der angelegten Spannung.

1.9.2. Elektrischer Widerstand

Alle Stoffe können nach ihrer Fähigkeit des elektrischen Ladungstransportes unabhängig vom Leitungsmechanismus eingeteilt werden (Bild 1.115). Dabei setzen diese Stoffe dem elektrischen Ladungstransport einen mehr oder minder großen Widerstand entgegen. Je nach Grad dieses Widerstandes können insgesamt Leiter, Halbleiter und Isolierstoffe unterschieden werden. Dabei setzen Isolierstoffe dem elektrischen Ladungstransport den größten Widerstand entgegen.

1.9.2.1. Leiter

Elektronenleiter, Supraleitung

Den geringsten Widerstand besitzen infolge der geringen Elektronenmasse und einer großen Anzahl freier Elektronen die Elektronenleiter. Alle Metalle sind Elektronenleiter und werden demzufolge als Leiter 1. Klasse oder kurz als Leiter bezeichnet. Diese Leitfähigkeit wird durch den *spezifischen elektrischen Widerstand* ϱ gekennzeichnet. Der spezifische Widerstand eines Stoffes gibt den Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge bei einem Querschnitt von 1 mm² an. Der Kehrwert des spezifischen Widerstands gibt die *elektrische Leitfähigkeit* $\varkappa$ an:

$$\varkappa = \frac{1}{\varrho}.$$

Tabelle 1.120 enthält den spezifischen Widerstand und die Leitfähigkeit gebräuchlicher Leiterwerkstoffe.
Aus der Definition des spezifischen Widerstands folgt der Widerstand eines Stoffes bei 20 °C Raumtemperatur:

$$R_{20} = \frac{\varrho_{20} l}{A} = \frac{l}{\varkappa_{20} A}$$

A leitfähiger Querschnitt

Tabelle 1.121 gibt den leitfähigen Querschnitt von Runddrähten an.
Der Widerstand der Stoffe ist *temperaturabhängig*:

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha \Delta t)$$

Δt Temperaturdifferenz zu 20 °C, α Temperaturkoeffizient

Temperaturkoeffizienten sind ebenfalls in Tabelle 1.120 angegeben. Die meisten Metalle haben einen positiven Temperaturkoeffizienten, d. h., ihr Widerstand nimmt mit der Temperatur zu. Kohle ist ein typischer Vertreter der Stoffe, deren Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt; sie hat einen negativen Temperaturkoeffizienten.

Tabelle 1.120: Daten von Leitern (bei 20 °C)
(Widerstand, Leitfähigkeit bei 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt)

Werkstoff[1])	Spezifischer elektrischer Widerstand ϱ	Elektr. Leitfähigkeit $\varkappa$	Temperaturkoeff.[2]) α	Dichte
	$\Omega \cdot mm^2/m$	$m/(\Omega \cdot mm^2)$	K^{-1}	kg/dm^3
a) Reine Metalle				
Aluminium	0,028	36	+0,004	2,7
Aldrey	0,028	35,4	+0,003 6	2,7
Blei	0,208	4,8	+0,003 87	11,34
Eisen (WM 13)	0,13	7,7	+0,004 8	7,9
Kupfer	0,017 5	57,1	+0,003 92	8,9
Nickel	0,10	10,0	+0,004 4	8,9
Platin	0,108	9,3	+0,003 9	21,4
Quecksilber	0,955	1,05	+0,000 9	13,546
Silber	0,016 5	62,5	+0,003 6	10,5
Wolfram	0,055 5	18,2	+0,004 1	19,3
Zink	0,063	16,5	+0,003 7	7,1
Zinn	0,11	9,1	+0,004 4	7,3
b) Legierungen				
Konstantan, Rheotan	0,50	2,0	−0,000 005	8,9
Neusilber } WM30	0,30	3,3	0,000 2 bis 0,000 7	8,7
Nickelin(2) } WM30	0,30	3,3	+0,000 23	8,7
Nickel-Chrom-Stahl	1,0	1,0	+0,000 25	8,3
Chromnickel (WM 110)	1,1	0,91	+0,000 25	8,5
Stahlchrom-aluminium (WM 140)	1,4	0,71	+0,002	7,2
Messing	0,074	13,5	+0,001 5	8,5
Mg–Al-Legierungen (Elektron)	0,06···0,083	12···18	+0,002 5 bis 0,004	1,8
Manganin (WM 43)	0,43	2,3	+0,000 01	8,4
Rheotan	0,48	2,1	+0,000 23	8,4
c) Sonstige Leiter				
Retortenkohle	100	0,01		
Graphit	20···100	0,05···0,01		
Kohlenstifte, homogen	65	0,015	−0,000 2	
Dochtkohlenstifte	70	0,014	bis	≈ 2,0
Silit (SiC)	≈ 1000	0,001	−0,000 7	
Glühsalz BaCl bei 1000 °C	≈ 5000	0,000 2		

[1]) WM Widerstandsmetall
[2]) nicht zu verwechseln mit Temperaturkoeffizient der Längenausdehnung

Beispiel 1: Der Widerstand einer Kupferleitung bei einer Raumtemperatur von 20 °C hat bei einer Länge von $l = 5700$ m und einem Querschnitt von $A = 10$ mm² einen Widerstand

$$R_{20} = \frac{\varrho l}{A} = \frac{(0{,}017\,\Omega \cdot mm^2/m) \cdot 5700\ m}{10\ mm^2} \approx 10\,\Omega.$$

Beispiel 2: Eine Glühlampe mit Wolframwendel hat bei Raumtemperatur einen Widerstand von 88,5 Ω. Wie groß ist der Widerstand bei 2200 °C?

$$R_t = R_{20}(1 + \alpha \Delta t) = 88{,}5(1 + 0{,}004\,1 \cdot 2180)\,\Omega \approx 880\,\Omega.$$

Tabelle 1.121: Daten von Drähten

Nenndurchmesser[1]) mm	Querschnitt A mm²	Widerstand für 1 m Draht bei 20 °C in Ω Cu	Manganin
0,03	0,00071	24,65	605,63
0,04	0,00126	13,89	341,27
0,05	0,00196	8,93	219,39
0,06	0,00283	6,18	151,94
0,07	0,00385	4,55	111,69
0,08	0,00503	3,48	85,49
0,09	0,00636	2,76	67,61
0,10	0,00785	2,21	54,78
0,12	0,01131	1,54	38,02
0,14	0,01539	1,14	27,94
0,16	0,02011	0,871	21,39
0,18	0,02545	0,688	16,90
0,20	0,03142	0,557	13,69
0,22	0,03801	0,460	11,31
0,24	0,04524	0,386	9,51
0,26	0,05309	0,329	8,10
0,28	0,06158	0,283	6,98
0,30	0,07069	0,248	6,08
0,32	0,08042	0,218	5,35
0,35	0,09621	0,1824	4,47
0,37	0,10752	0,1632	4,00
0,40	0,1257	0,1396	3,42
0,45	0,1590	0,1103	2,70
0,50	0,1964	0,0895	2,19
0,55	0,2376	0,0738	1,81
0,60	0,2827	0,0621	1,52
0,65	0,3318	0,0529	1,30
0,70	0,3848	0,0455	1,12
0,75	0,4418	0,0397	0,973
0,80	0,5027	0,0348	0,855
0,90	0,6362	0,0275	0,676
1,00	0,7854	0,0223	0,548
1,20	1,1310	0,0155	0,380
1,50	1,7672	0,0099	0,243
1,80	2,5447	0,0069	0,169
2,00	3,1416	0,0056	0,137

[1]) Durchmesserzunahme durch Isolierung: bei Lack oder Seide 0,02 mm; bei Baumwolle, zweifach, 0,20 mm.

Es ist zu erkennen, daß mit abnehmender Temperatur, d. h. mit negativer Temperaturdifferenz, der Widerstand von reinen (metallischen) Leitern stetig abnimmt. In der Nähe des absoluten Nullpunkts von −273,16 °C = 0 K sinkt der elektrische Widerstand sprungartig auf den Wert Null ab (*Supraleiter*). Diese *Sprungtemperaturen*, bei denen Metalle supraleitend werden, sind in Tabelle 1.122 zusammengestellt.

Tabelle 1.122: Supraleiter

Leiterwerkstoff	Kurzzeichen	Protonenzahl im Kern (Kernladungszahl)	Sprungtemperatur K
Aluminium	Al	13	1,1
Titan	Ti	22	1,8
Vanadin	V	23	4,3
Zink	Zn	30	0,7
Gallium	Ga	31	1,1
Zirkon	Zr	40	0,7
Niob	Nb	41	9,2
Kadmium	Cd	48	0,6
Zinn	Sn	50	3,7
Quecksilber	Hg	80	4,2
Blei	Pb	82	7,3

Leiter haben unterhalb der Sprungtemperatur keine elektrischen Leistungsverluste. Das ist für die Übertragung großer Energiemengen sehr günstig (Kryotechnik).
Supraleitende Metalle kehren beim Überschreiten einer kritischen Stärke des Magnetfelds (Stromdichte) in den gewöhnlichen leitenden Zustand zurück.
Ein Leiter von 0,4 mm Durchmesser bei einem supraleitenden Kern von 0,25 mm Durchmesser kann einen Strom von 100 A verlustlos leiten. Das Erregen und Entregen von Supraleitern kann die Zeit von einigen Minuten bis zu einigen Tagen in Anspruch nehmen.
Auf Grund der hohen Sprungtemperatur haben Niob und dessen Legierungen die größte technische Bedeutung.

Ionenleiter

Ionenleiter haben infolge der großen Ionenmasse im Verhältnis zu Elektronenleitern einen größeren elektrischen Widerstand (Leiter 2. Klasse). Ionenleitung liegt in Elektrolyten (Flüssigkeiten mit frei beweglichen Ladungsträgern) vor. Die positiven und negativen Ionen werden von gelösten Salzen, Säuren oder Laugen bereitgestellt. Diese Stoffe zerfallen im Wasser in positive und negative Ionen. Bei Anlegen einer Spannung wandern die positiven Ionen zur Katode (Kationen) und die negativen zur Anode (Anionen) und scheiden sich unter Ladungsträgeraustausch dort stofflich ab. Wasserstoff und alle Metalle bilden positive Ionen, die meisten anderen Elemente negative Ionen (außer Edelgasen).

Das *1.* FARADAY*sche Gesetz* besagt: Die Menge m der elektrolytisch abgeschiedenen Stoffe ist der durchgegangenen Ladungsmenge Q proportional:

$$m = kQ = kIt$$

Der Proportionalitätsfaktor k ist die für eine Ionenart charakteristische Konstante, ihr *elektrochemisches Äquivalent.*

Das *2.* FARADAY*sche Gesetz* besagt: Die elektrochemischen Äquivalente der Ionen sind ihren Grammatommassen bzw. Molmassen M proportional:

$$k = \frac{M}{zF}$$

z elektrochemische Wertigkeit der Ionen, F FARADAY-Konstante: $9{,}65 \cdot 10^4$ A · s/mol

Die Ionenleitung hat bei galvanischen Elementen und in der Galvanik technische Bedeutung erlangt. Der spezifische Widerstand einiger Elektrolyte ist in Tabelle 1.123 angegeben.

Tabelle 1.123: Spezifischer elektrischer Widerstand von Elektrolyten

Elektrolyt	Konzentration	Temperatur °C	Spezifischer elektrischer Widerstand Ω · mm²/m
HCl (Salzsäure)	100%	25	12,69
H_2SO_4 (Schwefelsäure)	0,1 mol/l	20	$21{,}43 \cdot 10^4$
NaOH (Natronlauge)	0,1 mol/l	20	$54{,}64 \cdot 10^4$
KCl (Kaliumchlorid)	1 mol/l	18	$10{,}18 \cdot 10^4$
KNO_3 (Kaliumnitrat)	1 mol/l	340	$1{,}54 \cdot 10^4$

Elektrische Leitung in Gasen

Gase sind i. allg. elektrisch nichtleitend (Isolator). Sie können aber durch Erzeugen (selbständige Entladung) oder durch Einbringen von Ladungsträgern (unselbständige Entladung) elektrisch leitend gemacht werden. Die positiven Ladungsträger wandern zur Katode, die negativen zur Anode. Auf ihrem Weg dahin stoßen sie weitere Gasatome oder Moleküle an, die dadurch in Elektronen und positive Ionen zerfallen (Stoßionisation). Damit liegt bei Stromleitung in Gasen *Elektronen- und Ionenleitung* vor.
Technische Bedeutung hat diese Art der Stromleitung in der Lichterzeugungstechnik bei Entladungslampen gewonnen.

Infolge der großen Masse eines Ions gegenüber der Masse eines Elektrons ist zur Beschleunigung der Ionen eine größere Energie nötig als für die Beschleunigung der Elektronen. Demzufolge wird sich im Katodenraum ein größerer Spannungsabfall (Katodenfall) einstellen als im Anodenraum. Bild 1.116 zeigt hierzu den prinzipiellen Spannungsverlauf.

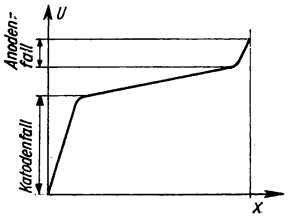


Bild 1.116. Spannungsverlauf über der Strecke einer Gasentladung (Glimmentladung)

1.9.2.2. Halbleiter

Halbleiter sind eine Gruppe von Stoffen, die auf Grund ihrer geringen Fähigkeit zur Leitung des elektrischen Stromes zwischen den Leitern und den Isolierstoffen stehen. Dazu zählen Elemente mit 4 Elektronen in der äußeren Elektronenbahn. Sie sind in der Lage, *Kristallgitter* nach Bild 1.117 zu bilden. Bei Zimmertemperatur wird bereits ein geringer Teil der Valenzelektronen aus dem Gitter herausgelöst. Diese stehen als freie Elektronen dem Stromfluß bei angelegter Spannung zur Verfügung (*Eigenleitfähigkeit*). Die Eigenleitfähigkeit nimmt mit der Temperatur zu.

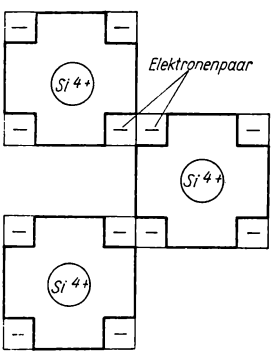


Bild 1.117. Kristallschema des reinen Siliziums

n-Leitung

Wird in das Halbleiter-Kristallgitter z. B. ein Antimonatom mit 5 freien Elektronen eingebaut, werden davon 4 Elektronen in der in Bild 1.118 angegebenen Weise gebunden, und ein freies Elektron steht zur Stromleitung (*Störstellenleitfähigkeit*) zur Verfügung. Das Antimon hat in diesem Fall ein Elektron gespendet und wird als *Donator* bezeichnet.

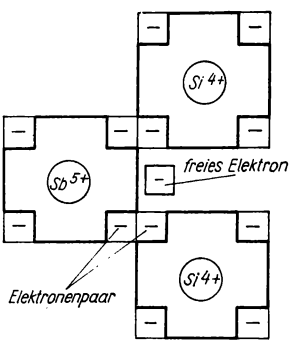


Bild 1.118. Kristallschema des n-dotierten Siliziums

p-Leitung

Eine p-Dotierung des Halbleiterkristalls läßt sich durch den Einbau eines dreiwertigen Metalls, z. B. Aluminium, nach Bild 1.119 erreichen. Das fehlende Elektron des Aluminiums läßt ein »Loch« im Kristallgitter entstehen.

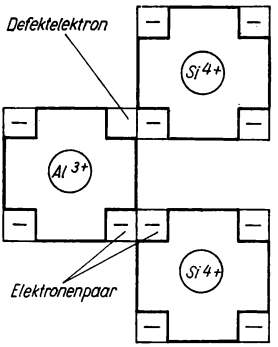


Bild 1.119. Kristallschema des p-dotierten Siliziums

Beim Anlegen einer genügend großen Spannung ist ein Elektron von einem naheliegenden Gitterplatz in der Lage, in das vorhandene »Loch« zu wandern. Es hinterläßt seinerseits ein »Loch«. Diese Löcher werden als *Defektelektronen* bezeichnet. Damit scheint es, als ob die Defektelektronen bei Anlegen einer Spannung sich entgegen der Richtung der Elektronen bewegen und damit das Verhalten positiver Ladungsträger zeigen.
Das Aluminiumatom, welches infolge des Fehlens eines 4. Elektrons in der Lage ist, ein benachbartes Elektron aufzunehmen, wird als *Akzeptor* bezeichnet.

pn-Übergang

Bei p- und n-Dotierung bleiben beide Kristallzonen jeweils nach außen hin neutral, da die Anzahl der Elektronen und die der Protonen gleich ist. Die *Störstellenleitfähigkeit* im Kristall nimmt mit der dotierten Störstellenanzahl zu.
Zwischen zwei unterschiedlich dotierten Gebieten eines Kristalls bildet sich eine Grenzfläche mit Gleichrichterwirkung aus. Wird ein pn-Übergang wie im Bild 1.120 gepolt, entsteht in-

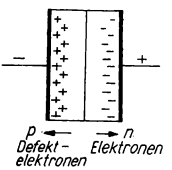


Bild 1.120. Sperrphase eines pn-Überganges

folge der elektrischen Kraftwirkungen eine ladungsträgerarme Zone mit hohem elektrischem Widerstand (*Sperrphase*). Der Sperrstrom wird infolge der thermischen Eigenleitfähigkeit nicht ganz Null.
Wird der pn-Übergang umgepolt (Bild 1.121), so ist die *Durchlaßphase* gegeben. Dabei verschwindet die an Ladungsträgern verarmte Zone, und der elektrische Widerstand nimmt um einige Zehnerpotenzen ab. Allerdings rekombiniert auch eine gewisse Anzahl von Elektronen mit Defektelektronen zu neutralen Atomen. Sie gehen damit der Stromleitung verloren.

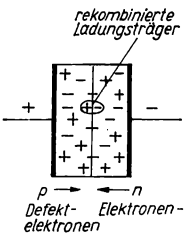


Bild 1.121. Durchlaßphase eines pn-Überganges

1.9.3. Ohmsches Gesetz

Werden die Anschlußklemmen einer Spannungsquelle leitend miteinander verbunden, fließt ein Strom. Die Größe des Stromes — die *Stromstärke* — ist bei konstanten Bedingungen (Temperatur, Spannung) proportional der *Spannung*. Das Verhältnis aus Spannung und Stromstärke ist konstant:

$$\frac{U}{I} = \text{const} = R.$$

Der Quotient aus Strom und Spannung wird als elektrischer *Widerstand* R definiert. Seine Größe hängt nur von den geometrischen Verhältnissen und dem Werkstoff ab (vgl. Abschnitt 1.9.2.). Die Einheit des Widerstands ist das Ohm (Ω). Der Kehrwert des Widerstands, der *Leitwert*, wird in Siemens (S) gemessen.
Das o. g. Gesetz kann in einfacher Weise umgeformt werden:

$$U = IR, \qquad I = \frac{U}{R}.$$

Wird in einem Stromkreis der Widerstand verdoppelt, geht die Stromstärke auf den halben Wert zurück. Wird die Spannung bei konstantem Widerstand verdoppelt, steigt die Stromstärke auf den zweifachen Wert an. Wird der Widerstand unendlich groß, fließt kein Strom (Leerlauf). Geht der Widerstand zwischen den Anschlußklemmen einer Spannungsquelle gegen Null, wird der Strom groß (Kurzschluß).

Beispiel: Eine Glühlampe von $R = 880\,\Omega$ wird mit einer Spannung von 220 V von einem Strom

$I = U/R = 220\ \text{V}/880\,\Omega = 0{,}25\ \text{A}$ durchflossen.

1.9.4. Kirchhoffsche Regeln

Die Berechnung der Strom- und Spannungsverhältnisse im Grundstromkreis und in verzweigten Stromkreisen kann mit den KIRCHHOFFschen Regeln erfolgen.

1. Kirchhoffsche Regel (Knotenpunktregel)

In jedem Punkt eines Leitersystems ist die *Summe der ankommenden gleich der Summe der abfließenden Ströme*. Anders ausgedrückt: Die Summe aller Ströme ist in jedem Punkt gleich Null:

$$\Sigma\, i_k = 0.$$

Dabei sind zufließende Ströme mit positivem, abfließende Ströme mit negativem Vorzeichen zu versehen.
Für den speziellen Fall des Bildes 1.122 gilt

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4 + i_5.$$

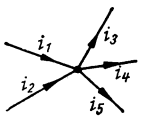


Bild 1.122. Stromverhältnisse an einem Knotenpunkt

2. Kirchhoffsche Regel (Maschensatz)

Für jeden geschlossenen Stromkreis und auch für jeden geschlossenen Teilstromkreis ist die *Summe der angelegten Spannungen* (Spannungsquellen) *gleich der Summe der abfallenden Spannungen* (Widerstände). Anders formuliert: Die Summe aller Spannungen in einem geschlossenen Stromkreis (Masche) ist gleich Null:

$$\Sigma\, U_k = 0.$$

Spannungsquellen haben positives, Spannungsabfälle negatives Vorzeichen.
Für den Fall des Bildes 1.123 wird $u_1 + u_2 = u_3 + u_4$.

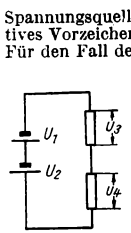


Bild 1.123. Spannungsverhältnisse an einer Masche

1.9.5. Reihen- und Parallelschaltung

Reihen- oder Serienschaltung bedeutet, daß Spannungsquellen oder Widerstände *hintereinander geschaltet* werden. Dabei werden alle diese Spannungsquellen bzw. Widerstände vom gleichen Strom durchflossen.

1.9.5.1. Reihenschaltung von Spannungsquellen

Bei der Reihenschaltung von Spannungsquellen ergibt sich die Gesamtspannung U aus der Addition der Teilspannungen U_k.

$$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n.$$

Bild 1.124 gibt im Prinzip diese Verhältnisse wieder. Ist eine Spannungsquelle entgegen einem festgelegten Sinne geschaltet, ist der Anteil dieser Quelle negativ in obige Gleichung einzuführen.

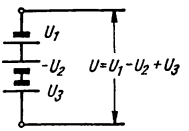


Bild 1.124. Reihenschaltung von Spannungsquellen

1.9.5.2. Reihenschaltung ohmscher Widerstände

Bei Widerständen ergibt sich der Spannungsabfall U bei Reihenschaltung zu

$$U = IR_1 + IR_2 + \cdots + IR_n = I(R_1 + R_2 + \cdots + R_n) = IR_{ges}.$$

Hiermit wird deutlich, daß die Teilwiderstände sich zum Gesamtwiderstand R_{ges} addieren:

$$R_{ges} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n.$$

Die Spannungsabfälle an den Einzelwiderständen verhalten sich wie ihre Widerstände:

$$U_1 : U_2 : \cdots : U_n = R_1 : R_2 : \cdots : R_n.$$

Hieraus folgt z. B. für zwei beliebige Widerstände

$$\frac{R_1}{R_n} = \frac{U_1}{U_n}.$$

Wenn die beiden Spannungsabfälle und ein Widerstand, z. B. R_1, bekannt sind, kann der andere Widerstand R_n berechnet werden:

$$R_n = R_1 \frac{U_n}{U_1}.$$

Wird berücksichtigt, daß $R_1 + R_n = R_{ges}$ oder $R_1 = R_{ges} - R_n$ ist, kann auch geschrieben werden:

$$R_n = R_{ges} \frac{U_n/U_1}{1 + U_n/U_1}.$$

1.9.5.3. Reihenschaltung von Kondensatoren

Die Gleichungen des Abschnittes 1.9.5.2. gelten auch für Blindwiderstände. Mit dem Blindwiderstand eines Kondensators $R_C = 1/\omega C$; $\omega = 2\pi f$ wird beispielsweise bei Reihenschaltung von zwei Kondensatoren die Gesamtkapazität

$$C_{ges} = \frac{C_1 C_2}{C_2 + C_1}.$$

Bei Reihenschaltung von 3 Kondensatoren wird

$$C_{ges} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}.$$

Merke: Die Gesamtkapazität von mehreren in Reihe geschalteten Kondensatoren ist stets kleiner als der kleinste beteiligte Kapazitätswert. Aus diesem Grunde wird der kleinere Kondensator auch »Verkürzungskondensator« genannt.

Beispiel: Zwei Kondensatoren von 1,0 µF und 0,5 µF werden in Reihe geschaltet, die Gesamtkapazität wird

$$C_{ges} = \frac{1{,}0 \cdot 0{,}5}{1{,}0 + 0{,}5}\ \mu\text{F} = 0{,}33\ \mu\text{F}.$$

1.9.5.4. Reihenschaltung von Spulen

Mit $R_L = \omega L$; $\omega = 2\pi f$ ergibt sich die Gesamtinduktivität zu

$$L_{ges} = L_1 + L_2 + \cdots + L_n.$$

Beispiel: Bei Reihenschaltung von zwei Spulen von 1,0 mH und 100 µH ergibt sich die Gesamtinduktivität zu

$$L_{ges} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{H} + 100 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{H} = 1{,}1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{H} = 1{,}1\,\mathrm{mH}.$$

1.9.5.5. Parallelschaltung von Spannungsquellen

Bei der Parallelschaltung von Spannungsquellen (Bild 1.125) tritt eine Stromaddition ein.

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n.$$

Haben die parallelgeschalteten Spannungsquellen dabei nicht die gleiche Klemmenspannung, fließen von den Quellen höherer Spannung zu denen niedrigerer Spannung Ausgleichströme, die dem Energieverbraucher verlorengehen. Ist z. B. eine Spannungsquelle zu den anderen entgegengesetzt gepolt, ist deren Stromanteil in obige Gleichung mit negativem Vorzeichen einzusetzen.

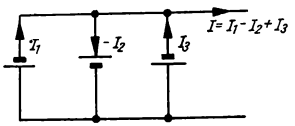


Bild 1.125. Parallelschaltung von Stromquellen

Spannungsquellen mit geringerem Innenwiderstand übernehmen den größeren Stromanteil; dabei besteht Überlastungsgefahr!

1.9.5.6. Parallelschaltung ohmscher Widerstände

An parallelgeschalteten Widerständen tritt der gleiche Spannungsabfall auf. Der Gesamtleitwert eines Netzwerkes aus n parallelgeschalteten Widerständen ergibt sich zu

$$G_{ges} = \frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}.$$

Der Gesamtwiderstand von 2 parallelgeschalteten Widerständen ergibt sich zu

$$R_{ges} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Bei 3 parallelgeschalteten Widerständen wird

$$R_{ges} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}.$$

Die Ströme in den einzelnen Widerständen verhalten sich umgekehrt proportional zu den Widerstandswerten

$$I_1 : I_2 : \cdots : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \cdots : \frac{1}{R_n}.$$

Für zwei beliebige Widerstände gilt

$$I_1 : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_n} = \frac{R_n}{R_1}$$

$$I_n = I_1 \frac{R_1}{R_n}.$$

Für eine Schaltung mit nur 2 Widerständen gilt

$$I_1 = I_{ges} \frac{1}{1 + (R_1/R_2)}$$

$$I_2 = I_{ges} \frac{1}{1 + (R_2/R_1)}.$$

1.9.5.7. Parallelschaltung von Kondensatoren

Die Gesamtkapazität ergibt sich

$$C_{ges} = C_1 + C_2 + \cdots + C_n.$$

Beispiel: Zu einem Drehkondensator mit einem Bereich von 3···12 pF wird ein Festkondensator von 5 pF parallelgeschaltet. Zwischen welchen Werten liegt die Gesamtkapazität?

Untere Grenze $C_{ges} = 3\,\mathrm{pF} + 5\,\mathrm{pF} = 8\,\mathrm{pF}$
Obere Grenze $C_{ges} = 12\,\mathrm{pF} + 5\,\mathrm{pF} = 17\,\mathrm{pF}$.

1.9.5.8. Parallelschaltung von Spulen

Für 2 parallelgeschaltete Spulen ergibt sich der Gesamtinduktivitätswert zu

$$L_{ges} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

und bei 3 parallelgeschalteten Spulen

$$L_{ges} = \frac{L_1 L_2 L_3}{L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_3 L_3}.$$

1.9.5.9. Kondensator im Gleichstromkreis

Bei Schaltvorgängen in Gleichstromkreisen (Impulsschaltungen) gibt die *Zeitkonstante* τ die Zeit an, nach der die elektrischen Größen Spannung oder Strom auf 63% des Endwertes (100%) angestiegen bzw. auf 37% des Anfangswertes (100%) abgefallen sind (s. Bilder 1.126 und 1.128).

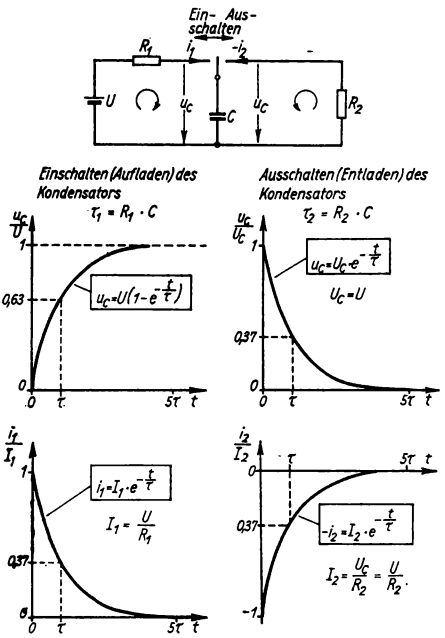


Bild 1.126. Spannungs- und Stromverlauf beim Auf- und Entladen eines Kondensators

Aus Bild 1.127 kann für *RC*-Glieder die Zeitkonstante oder bei bekannter Zeitkonstante und dem Wert des Widerstandes (Kondensators) der zugehörige Wert der Kapazität (des Widerstandes) ermittelt werden.

Beispiel 1: Eine *RC*-Schaltung von $R = 100\,\mathrm{k\Omega}$ und $C = 1\,\mathrm{nF}$ hat eine Zeitkonstante $\tau = 100\,\mu\mathrm{s}$.

Beispiel 2: Ein Kondensator von $C = 10\,\mu\mathrm{F}$ entlädt sich in 10 s auf 37% seines Anfangswertes. Der Entladewiderstand hat damit $R = 1\,\mathrm{M\Omega}$.

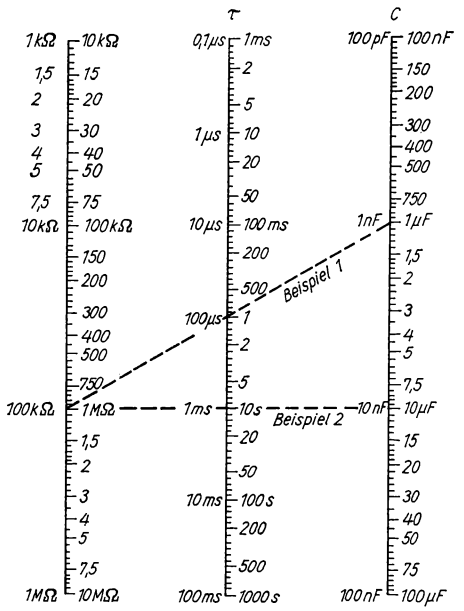


Bild 1.127. Nomogramm zur Ermittlung von Zeitkonstanten bei *RC*-Gliedern ($\tau = RC$)

1.9.5.10. Spule im Gleichstromkreis

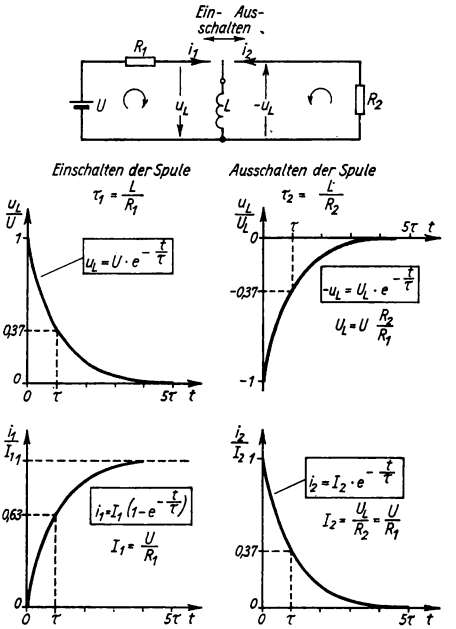


Bild 1.128. Spannungs- und Stromverlauf beim Ein- und Ausschalten einer Induktivität

1.9.6. Elektrische Leistung, Arbeit

Tabelle 1.124: Elektrische Leistung (Erläuterungen s. Tabelle 1.125)

Stromart			Wirkleistung $P = \sqrt{S^2 - Q^2}$ W	Scheinleistung $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ VA	Blindleistung $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ var
Gleichstrom			$UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$ bei Dreileiter $(I_1U_1 + I_2U_2)$	–	–
Drehstrom Phasenfaktor $\sqrt{3} = 1{,}73$	Wirklast	Dreieckschaltung / Sternschaltung	$U_pI_p \cdot 1{,}73 = 3I_p^2R = \frac{U_p^2}{R}$	$S = P$	Null
	kapazitiv induktiv	Dreieckschaltung / Sternschaltung	$U_pI_p \cdot 1{,}73 \cdot \cos\varphi$	$U_pI_p \cdot 1{,}73$	$U_pI_p \cdot 1{,}73 \cdot \sin\varphi$ $= \sqrt{S^2 - Q^2} \cdot \tan\varphi = P \cdot \tan\varphi$
Einphasenstrom	Wirklast		$UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$	$S = P$	Null
	induktiv kapazitiv		$UI \cdot \cos\varphi$	UI	$UI \cdot \sin\varphi$ $= \sqrt{S^2 - Q^2} \cdot \tan\varphi = P \cdot \tan\varphi$
Gleichstrom-Motoren			P (in kW) $= IU\eta : 1000$		
Einphasen-Motoren			P (in kW) $= IU\eta \cdot \cos\varphi : 1000$		
Generatoren und Trafos			P (in kW) $= IU \cdot \cos\varphi : 1000$;	P (in kVA) $= I \cdot U : 1000$	
Drehstrom-Motoren			P (in W) $= 1{,}73IU\eta \cos\varphi$;	$\eta \cdot \cos\varphi \approx 0{,}72$ bei Nennlast; damit wird:	
			P (in kW) $= \frac{IU}{800}$;	P (in PS) $= \frac{IU}{590}$	
Transformatoren (Umspanner)			$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = \frac{N_1}{N_2}$		

Tabelle 1.125: Elektrische Arbeit

Gleichstrom		$W = UIt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$
Drehstrom	Wirklast	$U_pI_pt \cdot 1{,}73 = 3I_p^2Rt = \frac{U_p^2}{R}t$
	kapazitiv induktiv	$U_pI_pt \cdot 1{,}73 \cdot \cos\varphi$
Wechselstrom	Wirklast	$UIt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$
	kapazitiv induktiv	$UIt \cdot \cos\varphi = I^2Rt \cdot \cos\varphi = \frac{U^2}{R}t \cdot \cos\varphi$

Erläuterungen zu den Tabellen 1.124 und 1.125:
1000 Wh = 1 kWh, 3600 Ws = 1 Wh
U_p Außenleiterspannung, I_p Außenleiterstrom, R Widerstand, φ Winkel zwischen Spannung und Strom, η Wirkungsgrad, N_1, N_2 Windungszahlen
Wirkstrom $I_w = I \cos\varphi$; Blindstrom $I_b = I \sin\varphi$

1.9.7. Wechselspannung und Wechselstrom

Die relativ einfache Möglichkeit der Erzeugung und Transformierbarkeit haben dem Wechselstrom eine breite Anwendung erschlossen.

1.9.7.1. Erzeugung

Während einer Drehung des Ankers wird eine sinusförmige Spannung erzeugt, z. B. von Null beginnend zum *Scheitelwert* $\hat{U}$ ansteigend und wieder auf Null absinkend. Die Leiterschleife hat sich um 180° gedreht. Nun wird sie von der entgegengesetzten Seite vom Magnetfluß durchsetzt, so daß die Spannung die Richtung umkehren muß. Sie sinkt also unter Null zum *negativen Scheitelwert* $-\hat{U}$ und steigt bis Null wieder an. Vergleiche hierzu Bild 1.129. Der zeitliche Verlauf dieser *Spannung* wird geschrieben

$u = \hat{U} \sin \omega t$

ω Kreisfrequenz, $\omega = 2\pi f$

Die Zeit T, die zu diesem Vorgang benötigt wird, heißt *Periodendauer*. Ihr Kehrwert ist die *Frequenz f:*

$f = \frac{1}{T}$.

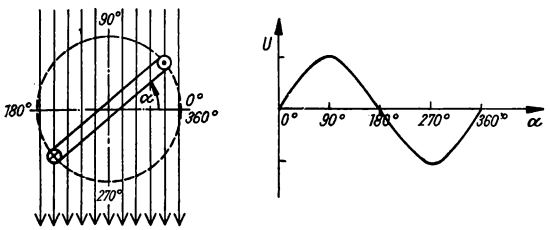


Bild 1.129. Prinzip der Wechselspannungserzeugung

Beispiel: Ein Wechselstrom mit der Frequenz 50 Hz besitzt eine Periodendauer

$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50\ \text{Hz}} = 0{,}02\ \text{s} = 20\ \text{ms}.$

Der Zusammenhang zwischen der Frequenz f und der Drehzahl n des Generators (Synchronmotors) ist

$f = np$

p Polpaarzahl des Generators

1.9.7.2. Darstellung

Eine *Sinuslinie* entsteht, wenn ein Zeiger mit konstanter Geschwindigkeit rotiert, während der Zeigermittelpunkt sich gleichförmig auf einer Geraden bewegt. Die Zeigerspitze beschreibt die Sinusfunktion. Bild 1.130 zeigt diese Verhältnisse. Vielfach werden Sinusfunktionen mittels des Zeigersymbols beschrieben. Bild 1.130 zeigt gleichzeitig, daß durch vektorielle Addition oder Subtraktion zweier Zeiger der resultierende gefunden werden kann.

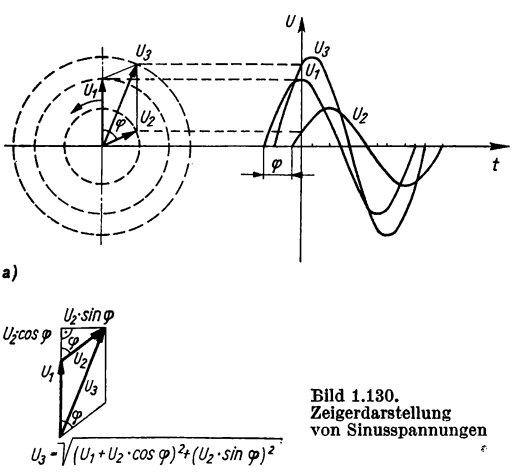


Bild 1.130. Zeigerdarstellung von Sinusspannungen

Die Länge der Zeiger entspricht dem Scheitelwert der Sinusfunktion. Die Zeiger rotieren vereinbarungsgemäß linksdrehend mit der Winkelgeschwindigkeit ω der Wechselspannung oder des Wechselstroms. Eine *Phasenverschiebung* zwischen z. B. zwei sinusförmigen Spannungen kann durch den Winkel φ in Bild 1.130 berücksichtigt werden. Das gilt auch für Phasen zwischen Strom und Spannung.

1.9.7.3. Messung

Bei sinusförmigem Spannungsverlauf ergibt sich das Problem, welche Größe gemessen werden kann. Hierzu wird die Wechselstromleistung mit einer Gleichstromleistung gleichen Effekts, dem *Effektivwert* $\tilde{u}$ oder $\tilde{i}$, verglichen. Es ergibt sich

$\tilde{u} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}; \quad \tilde{i} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}.$

Die Effektivwerte werden gewöhnlich von Strom- und Spannungsmessern angezeigt.

Beispiel: Eine sinusförmige Wechselspannung mit einem Effektivwert 220 V hat periodisch wiederkehrende Scheitelwerte

$$\hat{U} = \hat{u} \cdot \sqrt{2} = 220\ \text{V} \cdot \sqrt{2} \approx 310\ \text{V}.$$

1.9.7.4. Widerstand im Wechselstromkreis

Wird an eine Spannungsquelle mit sinusförmigem Spannungsverlauf ein ohmscher Widerstand R angeschlossen, muß nach dem OHMschen Gesetz der *Strom*

$$i = \frac{\hat{U}}{R} \sin \omega t = \hat{I} \sin \omega t$$

fließen.
Die *Leistung* P, die an diesen Widerstand abgegeben wird und dort zur Wirkung (Kraft, Wärme, Licht usw.) kommt, ist

$$P = \frac{u^2}{R} = i^2 R = \hat{I}^2 R \sin^2 \omega t.$$

Bild 1.131 zeigt den Verlauf der quadratischen Sinusfunktion. Trotz zeitweilig negativer Stromrichtung ist die an den Widerstand R abgegebene Leistung positiv, d. h., unabhängig von der Stromrichtung wird stets Leistung an den Wirkwiderstand abgegeben.
Der Phasenwinkel zwischen Spannungsfall am Widerstand und dem hindurchfließenden Strom beträgt 0°.

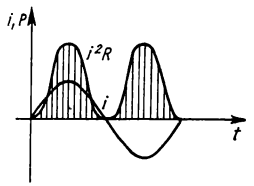


Bild 1.131. Leistungsflu des Wechselstromes am ohmschen Widerstand

1.9.7.5. Spule im Wechselstromkreis

Wird an eine Spule eine sinusförmige Wechselspannung angelegt, fließt infolge der Selbstinduktion der Strom zeitlich verzögert. Der Strom eilt der angelegten Spannung nach. Wenn der Strom zu fließen beginnt, wird infolge des Induktionsgesetzes in der Spule eine *Gegenspannung* E_g induziert. Sie hat den Betrag

$$E_g = \omega L I$$

L Induktivität in H

Diese Gegenspannung eilt dem fließenden Strom nach. Insgesamt eilt nun die Gegenspannung der angelegten Spannung um 180° nach (Bild 1.132).

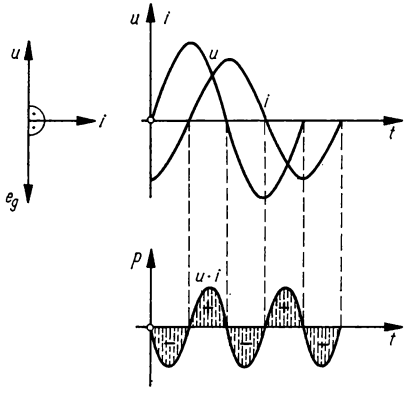


Bild 1.132. Strom-, Spannungs- und Leistungsverhältnisse der verlustfreien Spule

Aus obiger Gleichung folgt entsprechend dem OHMschen Gesetz der Betrag des *induktiven Widerstands*

$$X_L = \frac{E_g}{I} = \omega L.$$

Diese Gleichung zeigt, daß für ein und dieselbe Spule sich bei Wechselspannungen mit verschiedenen Frequenzen verschiedene induktive Widerstände einstellen. Dieser Widerstand nimmt linear mit der Frequenz zu.

Beispiel: Eine Spule mit einer Induktivität $L = 1$ H besitzt bei $f = 50$ Hz und $\omega = 2\pi f = 314\ \text{s}^{-1}$ einen Widerstand $X_L = \omega L = 314\ \text{s}^{-1} \cdot 1\ \text{H} = 314\ \Omega$.
Bei einer Wechselspannung von 220 V fließen durch diese Spule bei Vernachlässigung ihres ohmschen Widerstands

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{220\ \text{V}}{314\ \Omega} = 0{,}7\ \text{A}.$$

Dieselbe Spule hat bei einer Wechselspannung mit $f = 10$ kHz, $\omega = 6{,}28 \cdot 10^4\ \text{s}^{-1}$, einen induktiven Widerstand

$$X_L = \omega L = 6{,}28 \cdot 10^4\ \text{s}^{-1} \cdot 1\ \text{H} = 62{,}8\ \text{k}\Omega.$$

1.9.7.6. Kondensator im Wechselstromkreis

Wird an einen entladenen *Kondensator* eine sinusförmige Spannung U angelegt, beginnt eine Ladungsmenge (Strom) zu den Platten des Kondensators zu fließen, und erst danach ist eine Spannung zwischen den Platten nachweisbar. Der Strom eilt der Spannung beim verlustlosen Kondensator um 90° voraus (Bild 1.133). Der Strom des Kondensators stellt sich ein zu

$$I = \omega C U = \frac{U}{1/\omega C}$$

C *Kapazität* des Kondensators in F

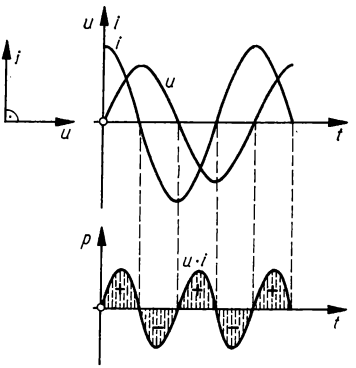


Bild 1.133. Strom-, Spannungs- und Leistungsverhältnisse des verlustfreien Kondensators

Hieraus folgt der Betrag des Widerstands eines Kondensators zu

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Der Widerstand eines Kondensators nimmt mit steigender Frequenz ab.

Beispiel: Ein Kondensator mit einer Kapazität $C = 1\,\mu\text{F}$ hat bei einer Wechselspannung von 50 Hz einen Widerstand

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50\ \text{Hz} \cdot 10^{-6}\ \text{F}} \approx 3{,}2\ \text{k}\Omega.$$

Bei einer Wechselspannung von 220 V fließt ein Strom

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220\ \text{V}}{3{,}2\ \text{k}\Omega} = 69\ \text{mA}.$$

Der gleiche Kondensator hat bei einer Wechselspannung mit einer Frequenz von 10 kHz einen Widerstand

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3\,\mathrm{Hz} \cdot 10^{-6}\,\mathrm{F}} \approx 16\,\Omega.$$

1.9.7.7. Kondensator parallel zur Spule im Wechselstromkreis (Blindleistungskompensation)

Ein Vergleich der Bilder 1.132 und 1.133 läßt deutlich werden, daß induktiver und kapazitiver Strom entgegengesetzte Richtung haben, der eine läßt sich also durch den anderen kompensieren. Die Blindstromkompensation führt zu kleineren resultierenden Strömen in Generatoren, Transformatoren und Leitungen, so daß die dort entstehenden Stromwärmeverluste reduziert werden. Überwiegend sind induktive Blindströme durch die kapazitiver Natur zu kompensieren. Die zu kompensierende Blindleistung Q ergibt sich aus der Wirkleistung P des Elektroenergieverbrauchers zu

$$Q = P(\tan\varphi - \tan\varphi_1).$$

Hieraus folgt die Größe des *Kompensationskondensators* zu

$$C = \frac{Q}{\omega U^2}$$

φ Phasenwinkel vor der Kompensation, φ_1 Phasenwinkel nach der Kompensation, U Netzspannung

Der Faktor $(\tan\varphi - \tan\varphi_1)$ ist Tabelle 1.126 für einen gewünschten Leistungsfaktor $\cos\varphi_1$ zu entnehmen.

Tabelle 1.126: Faktor zur Blindleistungskompensation

$\cos\varphi$	$(\tan\varphi - \tan\varphi_1)$ bei $\cos\varphi_1 =$				
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0,40	1,54	1,67	1,81	1,96	2,29
0,41	1,47	1,61	1,74	1,90	2,23
0,42	1,41	1,54	1,68	1,83	2,16
0,43	1,35	1,48	1,61	1,77	2,10
0,44	1,29	1,42	1,56	1,71	2,04
0,45	1,24	1,37	1,51	1,66	1,99
0,46	1,18	1,31	1,45	1,60	1,93
0,47	1,13	1,26	1,40	1,55	1,88
0,48	1,08	1,21	1,34	1,50	1,83
0,49	1,02	1,16	1,29	1,45	1,78
0,50	0,98	1,11	1,25	1,40	1,73
0,51	0,94	1,06	1,20	1,36	1,69
0,52	0,89	1,03	1,16	1,31	1,64
0,53	0,85	0,98	1,12	1,27	1,60
0,54	0,81	0,94	1,08	1,23	1,56
0,55	0,77	0,90	1,03	1,19	1,52
0,56	0,73	0,86	1,00	1,15	1,48
0,57	0,69	0,82	0,96	1,11	1,44
0,58	0,66	0,78	0,92	1,08	1,41
0,59	0,62	0,75	0,89	1,04	1,37
0,60	0,58	0,71	0,85	1,01	1,33
0,61	0,55	0,68	0,82	0,97	1,30
0,62	0,52	0,65	0,78	0,94	1,27
0,63	0,48	0,61	0,75	0,90	1,23
0,64	0,45	0,58	0,72	0,87	1,20
0,65	0,42	0,55	0,69	0,84	1,17
0,66	0,39	0,52	0,66	0,81	1,14
0,67	0,36	0,49	0,62	0,78	1,11
0,68	0,33	0,46	0,59	0,75	1,08
0,69	0,30	0,43	0,57	0,72	1,05
0,70	0,27	0,40	0,54	0,69	1,02
0,71	0,24	0,37	0,51	0,66	0,99
0,72	0,21	0,34	0,48	0,64	0,96
0,73	0,19	0,32	0,45	0,61	0,94
0,74	0,16	0,29	0,43	0,58	0,91
0,75	0,13	0,26	0,40	0,55	0,88
0,76	0,11	0,23	0,37	0,53	0,86
0,77	0,08	0,21	0,35	0,50	0,83
0,78	0,05	0,18	0,32	0,47	0,80
0,79	0,03	0,16	0,29	0,45	0,78

Beispiel 1: Eine HQL-Lampe von 1 kW Wirkleistung bei 220 V, 50 Hz mit induktivem Vorschaltgerät mit $\cos\varphi \approx 0{,}55$ soll einzeln auf einen Leistungsfaktor $\cos\varphi_1 = 0{,}9$ kompensiert werden. Die notwendige Blindleistung ist

$$Q = 1\,\mathrm{kW} \cdot 1{,}03 = 1{,}03\,\mathrm{kvar}.$$

Der Faktor 1,03 ist Tabelle 1.126 entnommen. Die Größe des dazu notwendigen Kondensators folgt zu

$$C = \frac{Q}{\omega U^2} = \frac{1030\,\mathrm{var}}{314 \cdot (220\,\mathrm{V})^2} \approx 69 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{F} = 69\,\mu\mathrm{F}.$$

Beispiel 2: Eine Wirkenergie von 33000 kW h mit $\cos\varphi = 0{,}63$ und 220 Betriebsstunden soll zentral auf $\cos\varphi_1 = 0{,}9$ kompensiert werden.

$$P = \frac{33000\,\mathrm{kW\,h}}{220\,\mathrm{h}} = 150\,\mathrm{kW}.$$

Aus Tabelle 1.126 folgt der Faktor $(\tan\varphi - \tan\varphi_1) = 0{,}75$. Damit wird die Blindleistung der notwendigen Kondensatorenbatterie

$$Q = 150\,\mathrm{kW} \cdot 0{,}75\,\mathrm{kvar/kW} \approx 106\,\mathrm{kvar}.$$

Als Faustregel gilt für *Einzelkompensationen:*

1. Zur Kompensation der Blindleistung eines Motors, Schweißtransformators, einer Punktschweißmaschine usw. ist eine Blindleistung von etwa der Hälfte der Nennleistung bzw. der Scheinleistung (z. B. kVA) erforderlich. Nicht bei Stern-Dreieck-Schaltung anwenden!
2. Umspanner sind mit etwa 10% ihrer Scheinleistung zu kompensieren.
3. Induktive Vorschaltgeräte von Lampen sind mit etwa 100% der zugehörigen Lampenleistung durch kapazitive Blindleistung zu kompensieren.

1.9.8. Drehstrom

Ein *Mehrphasensystem* ist in der Lage, ein Mehrfaches an Leistung eines Einphasensystems zu übertragen. Ein Zweiphasensystem überträgt die doppelte, ein Dreiphasensystem die dreifache Leistung. Ein Dreiphasensystem hat weiterhin den Vorzug, daß mit relativ geringem Aufwand ein Drehfeld (rotierendes Magnetfeld) erzeugt werden kann. Auf dieser Grundlage können in einfacher Weise Motoren und Generatoren aufgebaut werden.

Die zeitliche Folge der Phasen ist durch den Generator vorgegeben, i. allg. R, S, T. Werden an der Motoranschlußstelle jedoch zwei Phasen getauscht, z. B. S mit T, so entsteht die Folge R, T, S, d. h., der Motor ändert seine Drehrichtung. Bei gewünschter *Motordrehrichtungsumkehr* nur zwei Phasen am Anschluß miteinander tauschen! Aus einem Mehrphasensystem kann in einfacher Weise ein Einphasensystem gebildet werden. Diese Tatsachen haben dem Drehstrom ein sehr umfangreiches Anwendungsgebiet erschlossen.

Bild 1.134 zeigt das Zeigerdiagramm und den zeitlichen Verlauf der Spannungen oder Ströme eines symmetrischen Drehstromsystems. Hier sind die einzelnen Sinuswellen um jeweils 120° (zeitlich) versetzt. Aus dem Zeigerbild folgt in einfacher

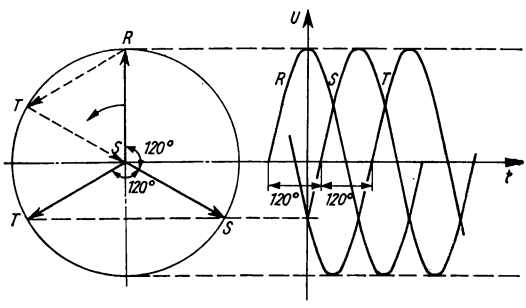


Bild 1.134. Zeigerbild und zeitlicher Spannungsverlauf eines Drehstromsystems

Weise, daß zwischen zwei beliebigen Phasen im symmetrischen Fall eine größere Spannung vorhanden ist als zwischen dem Leiter und dem Sternpunkt. Die Spannung zwischen zwei Leitern (*Leiterspannung* oder *verkettete Spannung*) folgt aus der Spannung U_p einer Phase gegen den Sternpunkt (*Phasenspannung*) zu

$$U = \sqrt{3} \cdot U_p$$

Beispiel: Ein Drehstromsystem mit einer Phasenspannung 220 V weist eine Netzspannung U zwischen zwei Phasen von

$$U = \sqrt{3} \cdot U_p = \sqrt{3} \cdot 220\ \text{V} = 380\ \text{V}$$

auf.
Tabelle 1.127 gibt für einige gebräuchliche Werte den Zusammenhang zwischen verketteter Spannung und Phasenspannung an.

Tabelle 1.127: Verkettete Spannung und Phasenspannung

U in V	220	380	500	660	1000
U_p in V	127	220	290	380	580

Drehstromsysteme werden nach der verketteten Spannung benannt. Ein 380-kV-System weist diese Spannung z. B. nur zwischen zwei Leitern auf. Die Spannung eines Leiters gegen Erde (Mittelpunkt) besitzt demzufolge nur 220 kV. Für die Bemessung der Isolation ist diese Tatsache wichtig. Die Phasen untereinander müssen für die verkettete Spannung, die Phasen gegen Erde für die Phasenspannung isoliert sein.
Die *übertragene Leistung* eines Drehstromsystems ist das Dreifache eines gleichwertigen Einphasensystems. Diese Feststellung gilt für *Scheinleistung S*, *Wirkleistung P* und *Blindleistung Q:*

$$S = 3U_pI = UI\sqrt{3}$$

$$P = 3U_pI \cdot \cos\varphi = UI \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi$$

$$Q = 3U_pI \cdot \sin\varphi = UI \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\varphi$$

Beispiel: In einem Drehstromsystem von 380 V verketteter Spannung wird bei ohmscher Last und einem Strom von 10 A eine Leistung von

$$P = 380\ \text{V} \cdot 10\ \text{A} \cdot \sqrt{3} = 6{,}6\ \text{kW}$$

übertragen. Das ist die dreifache Leistung eines Einphasensystems von 220 V bei 10 A, wie leicht einzusehen ist.
Bei Drehstromsystemen sind zwei Schaltungen der Energieverbraucher möglich, nämlich *Stern-* und *Dreieckschaltung.*

Sternschaltung

Für ein gegebenes Drehstromsystem sind die Widerstände R in der im Bild 1.135 angegebenen Weise zu schalten. Jeder Widerstand liegt an der Spannung einer Phase, U_p. Der *Strom* durch diesen Widerstand folgt aus dem OHMschen Gesetz zu

$$I_\lambda = \frac{U_p}{R}$$

Werden alle Phasen gleich belastet, fließt im Mittelleiter kein Strom, wie aus der geometrischen Addition der drei symmetrischen Stromzeiger folgt. Das gilt auch für die die Ströme begleitenden Magnetfelder. Drehstromtransformatoren haben daher nur drei magnetische Systeme. Wird im symmetrischen Lastfall also der Mittelleiter weggelassen, ist diese Schaltung

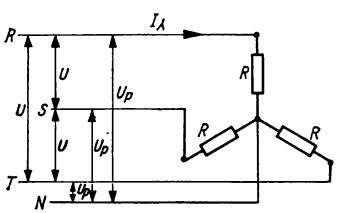


Bild 1.135. Sternschaltung eines Drehstromsystems

weiterhin betriebsfähig. In Hochspannungsanlagen wird davon Gebrauch gemacht. In Niederspannungsanlagen wird aus Schutzgründen und zur Bildung von Einphasensystemen der Mittelleiter stets mitgeführt.

Dreieckschaltung

In einem Drehstromsystem sind die Widerstände in Dreieckschaltung entsprechend Bild 1.136 zu schalten. Jeder Widerstand liegt nun an der Spannung $U_p\sqrt{3}$. Dementsprechend wird der *Strom* gegenüber der Sternschaltung größer

$$I_\Delta = \frac{U_p\sqrt{3}}{R}.$$

Damit wird in dieser Schaltung die aufgenommene Leistung größer. Drehstrommotoren (Kurzschlußläufer) ab 1,5 kW werden deshalb zur Vermeidung eines großen Einschaltstroms zuerst in Sternschaltung angelassen und dann auf Dreieckschaltung umgeschaltet (*Stern-Dreieck-Anlasser*). Ein Umschalten auf Dreieckbetrieb ist wegen eines besseren Leistungsfaktors $\cos\varphi$ und eines höheren Wirkungsgrads bei Vollast notwendig.

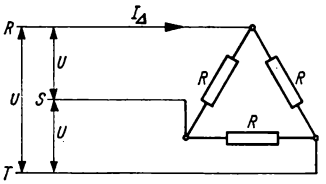


Bild 1.136. Dreieckschaltung eines Drehstromsystems

1.9.9. Arbeitspunkt von Starkstrom- und Informationsstromkreisen

In *Starkstromkreisen* werden sehr große Energiemengen transportiert. Es ist wünschenswert, beim Erzeugen, Transport und Umsetzen einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Im Bild 1.137 ist der Grundstromkreis dargestellt. Der Widerstand R_i sei der Innenwiderstand der Spannungsquelle, R_a der Widerstand des Energieverbrauchers. Die an den Widerständen umgesetzte Leistung ist $P_i = R_iI^2$ und $P_a = R_aI^2$. Hieraus ergibt sich der *Gesamtwirkungsgrad* dieses Stromkreises zu

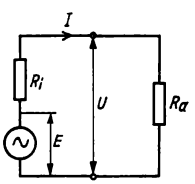


Bild 1.137. Grundstromkreis

$$\eta = \frac{P_a}{P_a + P_i}\,100 = \frac{R_a}{R_a + R_i}\,100\ \text{in}\ \%.$$

Es ist sofort zu erkennen, daß der Wirkungsgrad gegen 100% geht, wenn $R_i \to 0$ oder zumindest $R_a \gg R_i$ ist. Der Fall, bei dem der Außenwiderstand sehr viel größer ist als der Innenwiderstand, kommt dem Leerlauf nahe. Deshalb werden Starkstromanlagen dann rationell betrieben, wenn der *Innenwiderstand* des Ersatzstromkreises, das sind Generator-, Leitungs- und Umspannerwiderstand, *klein* ist. Man bedenke, wenn ein 200-MW-Generator nur 10% dieser Leistung an seinem Innenwiderstand umsetzen würde, wären Hitzeschäden die Folge.
Informationsstromkreise werden anders als Starkstromanlagen betrieben. Die eintreffenden Informationssignale sind in der Regel sehr schwach. Deshalb ist es erwünscht, dem empfangenden Gerät eine möglichst hohe Leistung zuzuführen. Die zugeführte *Leistung* ist

$$P_a = I^2R_a = U_{12}^2\,\frac{R_a}{(R_a + R_i)^2}.$$

Diese Leistung wird ein Maximum bei $R_a = R_i$. Dieser Fall wird *Anpassung* genannt. Der Wirkungsgrad ist hierbei $\eta = 50\%$. Am bekanntesten dürfte die Anpassung vom Fernsehgeräteeingang an den Wellenwiderstand des Kabels, z. B. bei 75 Ω, sein. Gleiches gilt auch für den Fußpunktwiderstand der Antenne. Sofern das nicht gegeben ist, ist mittels eines Impedanzwandlers eine Widerstandstransformation vorzunehmen, um optimal Bild und Ton wiedergeben zu können.

1.9.10. Nennspannungen, Nennfrequenzen, Nennströme

In diesem Abschnitt sind zulässige Werte von Nennspannungen, Nennfrequenzen und Nennströmen angegeben. Elektrische Geräte und Anlagen sind hiernach zu bemessen. Die gewählten Nennwerte für ein Gerät sind auf dem Typschild anzugeben.

1.9.10.1. Nennspannungen bis 380 kV (nach TGL 17872)

Nennspannung (U_n) ist diejenige Spannung, nach der ein elektrisches Netz oder Betriebsmittel benannt wird und auf die bestimmte Betriebseigenschaften bezogen werden.
Der Standard TGL 17872 *gilt nicht* für Nennspannungen, die innerhalb von Prüf-, Meß-, Steuer-, Regelungs-, Fernwirk- und Informationsanlagen erzeugt und verwendet werden, sowie für elektrische Anlagen auf Schienenfahrzeugen.

Tabelle 1.128: Gleich- und Wechselspannungen unter 100 V[1])

Gleichspannungen V	Wechselspannungen 50 Hz V	Gleichspannungen V	Wechselspannungen 50 Hz V
1,2		20,0	
1,5		22,5	
2,0		24,0	24,0
2,4		36,0	36,0
3,0		40,0	
3,6		45,0	42,0
4,0		48,0	
4,5		60,0	60,0
4,8		72,0	
6,0	6,0	78,0	
9,0		80,0	
12,0	12,0	90,0	
15,0		96,0	

[1]) Die unterstrichenen Werte sind Vorzugsspannungen und gelten für Neuanlagen, Umstellungen und umfangreiche Erweiterungen.

Tabelle 1.129: Gleich- und Wechselspannungen 100 V···380 kV[1])

Gleichspannungen V	Gleichspannungen kV	Ein- und Dreiphasen-Wechselspannungen 50 Hz V	Ein- und Dreiphasen-Wechselspannungen 50 Hz kV	Einphasen-Wechselspannungen $16^2/_3$ Hz V	Einphasen-Wechselspannungen $16^2/_3$ Hz kV
110					
		127			
220		220		220	
		380			
440					
		500			
600		660			
750					1
	1,2				
	1,5				
			2		
	2,4				
	3,0		3		3
			5		
			6[2])		6
			10		
			15		15
			20		
			30		
			110		110
			220		
			380		

[1]) s. Fußnote zu Tabelle 1.128
[2]) Vorzugswert für direkte Speisung von Elektromotoren

Er *gilt nicht* für elektrische Erzeugnisse, für die — ausgehend von den Nennspannungen dieses Standards — funktionsbedingt abweichende Werte in anderen Standards der DDR für Spannungen festgelegt sind.
In den Tabellen 1.128 und 1.129 sind die Nennspannungen unter 100 V und zwischen 100 V und 380 kV zusammengestellt. Tabelle 1.130 enthält Nennspannungen bis 100 V für elektrische Anlagen.

1.9.10.2. Nennfrequenzen bis 10000 Hz (nach TGL 15217)

Nennfrequenz ist diejenige Frequenz, mit der ein Betriebsmittel benannt wird.
TGL 15217 *gilt nicht* für Betriebsmittel mit Frequenzsteuerung über Frequenzbereiche sowie für die Informations- und Meßtechnik und die Steuerung atomarer Prozesse.

Tabelle 1.130: Nennspannungen in V *für elektrische Anlagen unter* 100 V[1])

	Vorzugsreihe	—	2	—	—	4	6	—	12	—	24[1])	40	—	60	—	80	—
Sonstige Anwendungsgebiete	Beleuchtung, gespeist aus Trockenelementen	1,5	—	2,5	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	dgl. aus Akkumulatoren, Generatoren und Transformatoren	—	2	2,5	—	4	6	8	12	—	24	40	—	60	—	80	—
	Verbraucher, gespeist aus Klingeltransformatoren	—	2	—	—	4	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Elektrisches Spielzeug	—	2	—	—	4	6	—	—	20	24	—	—	—	—	—	—
	Gewerbliche Kleinmotoren	—	—	—	—	—	—	—	12	—	24	40	—	60	—	—	—
	Elektrokarren, -wagen und Flurfördermittel	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	40	—	—	—	80	—
	Grubenlokomotiven	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	72	80	96
	Elektrowärmegeräte	—	—	—	—	—	—	—	12	—	24	40	—	—	—	—	—
	Elektromedizinische Geräte	—	2	2,5	3,5	4	6	—	12	—	—	—	—	—	—	—	—
	Fernmelde- und Fernsteuerungsanlagen	1,5	2	—	—	4	6	—	12	20	24	40	48	60	—	80	—
	Schutz- und Regelanlagen	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	—	—	60	—	—	—

[1]) als Dreiphasenwechselspannungen bei 50 Hz auch 24 V · $\sqrt{3}$ ≈ 42 V

Tabelle 1.131: Nennfrequenzen (in Hz)

$16^2/_3$ [1])	50[2])	100	150	200	250	300	400	450
500	1000	2000	2400	4800	8000	9600		

[1]) nur Einphasen-Wechselstrombahnen
[2]) für direkte Speisung von elektrischen Motoren weiterhin Vorzugswert

1.9.10.3. Nennströme (nach TGL RGW 780)

Nennstrom ist der Strom, nach dem ein elektrisches Betriebsmittel bemessen und benannt wird und nach dem es die geforderten Bedingungen erfüllen muß.
TGL RGW 780 gilt für elektrische Erzeugnisse, die nach Nennströmen bemessen und benannt werden. Er gilt nicht für elektrische Erzeugnisse, für die in anderen Standards abweichende Nennströme festgelegt sind.
Tabelle 1.132 enthält die Nennströme (auszugsweise).

Tabelle 1.132: Nennströme (in A)[1])

0,1	1	10	100	1000
0,12	1,25	12,5	125	1250
0,16	1,6	16	160	1600
0.2	2,0	20	200	2000
0,25	2,5	25	250	2500
0,32	3,15	31,5	315	3150
0,4	4	40	400	4000
0,5	5	50	500	5000
0,63	6,30	63	630	6300
0,8	8,0	80	800	8000

[1]) Nennströme kleiner als 0,1 A und größer als 10000 A sind nach der dezimalgeometrischen Grundreihe R 10 zu wählen.

1.9.11. Magnetisches Feld

1.9.11.1. Magnetische Feldstärke

Jeder elektrische Strom hat ein äußeres Magnetfeld zur Folge. Die magnetische Feldstärke H außerhalb eines runden elektrischen Leiters beträgt

$$H = I/(2\pi r)$$

r radiale Entfernung vom Leitermittelpunkt, $2\pi r$ Feldlinienlänge im betrachteten Punkt

1.9.11.2. Durchflutung

Als Durchflutung Θ wird der das magnetische Feld hervorrufende Strom I bezeichnet. Bei einer Spule ergibt sich

$$\Theta = IN$$

N Windungszahl

Analog zum OHMschen Gesetz für elektrische Kreise kann auch eines für den magnetischen Kreis definiert werden. Dabei ist Θ die Durchflutung (magnetische Erregung).

1.9.11.3. Magnetischer Fluß

Der magnetische Fluß Φ beträgt

$$\Phi = \Theta/R_m$$

Einheit des magnetischen Flusses: Weber (1 Wb = 1 V · s); R_m magnetischer Widerstand ($R_m = l/(\mu_0\mu_r A)$); l Feldlinienlänge, A vom Magnetfluß durchsetzter Querschnitt, μ_0 magnetische Feldkonstante ($\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}$ V · s/(A · m)), μ_r Permeabilitätszahl

1.9.11.4. Magnetische Flußdichte

Die magnetische Flußdichte B beträgt

$$B = \Phi/A = \mu_0\mu_r H$$

Einheit der magnetischen Flußdichte: Tesla (1 T = 1 Wb/m²)

Den qualitativen Zusammenhang zwischen der magnetischen Flußdichte und der magnetischen Feldstärke für verschiedene Materialien zeigt Bild 1.138. In Tabelle 1.133 ist der Wert der relativen Permeabilität verschiedener Stoffe angegeben.

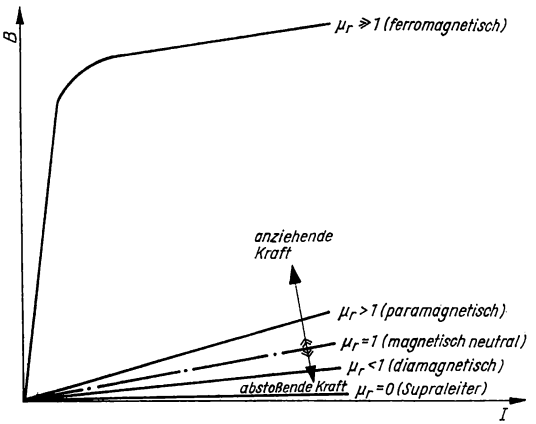


Bild 1.138. Magnetisierungskennlinien verschiedener Stoffe mit deren Kraftrichtung im homogenen Magnetfeld

Tabelle 1.133: Relative Permeabilität

Stoff	μ_r	Bemerkung
Supraleiter	0	magnetischer Isolator ($\mu_r = 0$)
Wismut	0,99982	diamagnetisch ($\mu_r < 1$)
Vakuum, Luft	1,0	magnetisch neutral ($\mu_r = 1$)
Mangan	1,0038	paramagnetisch ($\mu_r > 1$)
Eisen	≈ 1000,0	ferromagnetisch (Fe, Co, Ni und Legierungen) ($\mu_r \gg 1$)

1.9.11.5. Hysteresekurve

Bei ferromagnetischen Werkstoffen ist infolge einer feldstärkeabhängigen relativen Permeabilität (Bild 1.139) der Zusammenhang zwischen Erregerstrom und magnetischer Flußdichte B nichtlinear. Zusätzlich ergeben sich für Auf- und Abmagnetisierung unterschiedliche Kurvenverläufe. Die von der Hysteresekurve eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die Ummagnetisierungsverluste. Für bestimmte Anwendungsfälle sind bestimmte ferromagnetische Werkstoffe nach Tabelle 1.134 erforderlich.

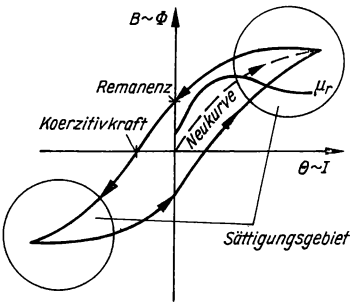


Bild 1.139. Hysteresekurve ferromagnetischer Werkstoffe

Tabelle 1.134: Anwendungsfälle und Eigenschaften von Magnetwerkstoffen

Anwendungsfall	Eigenschaften
Dauermagnete	hohe Remanenz (Restmagnetfluß bei Erregung gleich Null)
Dynamoblech	schmale Hysteresefläche (geringe Verluste)
Magnetkreise für Übertrager	linearer und steiler Hystereseanstieg (lineare Signalübertragung bei geringster Erregung)
Magnetkreise für Relais	kleine Remanenz (sicherer Ankerabfall) kleine Koerzitivkraft bei polarisierten Relais
Magnetspeicher	rechteckförmige Hysterese (eindeutiger Unterschied von L- und O-Zuständen)

1.9.11.6. Magnetkreis mit Luftspalt

Im Magnetkreis nach Bild 1.140 wird bei einem Spulenstrom von $I = 0{,}1$ A und einer Windungszahl der Erregerspule von $N = 1000$ die Durchflutung

$$\Theta = IN = 0{,}1\ \text{A} \cdot 1000 = 100\ \text{A}.$$

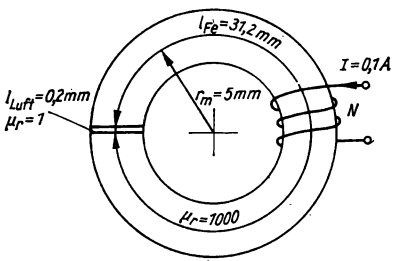


Bild 1.140. Magnetkreis mit Luftspalt

Der gesamte magnetische Widerstand des Eisenkreises mit Luftspalt beträgt

$$R_m = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_r A} + \frac{l_{Luft}}{\mu_0 A}.$$

Damit wird die magnetische Flußdichte

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Theta}{R_m A} = IN/[(l_{Fe}/\mu_0\mu_r) + (l_{Luft}/\mu_0)].$$

Die magnetische Feldstärke ist

$$H = \frac{B}{\mu},$$

im Luftspalt

$$H_{Luft} = \frac{B}{\mu_0} = IN/[(l_{Fe}/\mu_r) + (l_{Luft})]$$

$$= 100\ \text{A}/[(31{,}4/1000)\ \text{mm} + 0{,}2\ \text{mm}] = 435\ \text{A/mm}.$$

Demgegenüber ist die magnetische Feldstärke im Eisenkreis nur 0,43 A/mm. Im Luftspalt können somit hohe magnetische Feldstärken erzeugt werden, wie es z. B. bei Magnetköpfen von Magnetaufzeichnungsgeräten notwendig ist.
Der Luftspalt vergrößert den magnetischen Widerstand des Eisenkreises (Scherung der Hysterese).

1.9.11.7. Kraftwirkung im Magnetfeld

Die Kraft F, die ein Strom I im homogenen Magnetfeld mit der magnetischen Flußdichte B bei einer Länge l ausübt, wird

$$F = IBl.$$

Ablenkung eines Elektronenstrahls

Ein Elektronenstrahl ist ein im Vakuum fließender Strom. Dieser Strom wird im Magnetfeld in der im Bild 1.141 angegebenen Weise abgelenkt. Anwendung: Horizontal- und Vertikalablenkung bei der Fernsehbildröhre.

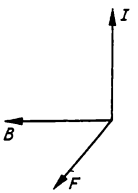


Bild 1.141. Kraftrichtung auf einen Elektronenstrahl bei gegebenen Strahl- und Magnetflußrichtungen

Kraftwirkung auf stromdurchflossenen Leiter

Auf stromdurchflossene Leiter wird im Magnetfeld eine Kraft von der Größe

$$F = BIlN$$

ausgeübt (Motorprinzip).
F Kraft in N, B magnetische Flußdichte in V · s/m², I Größe des Stromes in A, l wirksame Leiterlänge in cm, N Windungszahl
Die Richtung der Kraft folgt aus Bild 1.141.

Kraftwirkung stromdurchflossener Leiter

Wird das Magnetfeld von einem zweiten elektrischen Strom erzeugt, so wird die Kraftwirkung im Vakuum (Luft)

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{l}{a} I_1 I_2.$$

Bild 1.142 gibt die Kraftrichtung in Abhängigkeit von der Stromrichtung an.
Gehören die Leiter nach Bild 1.142 zu *einem* Stromkreis, so wird $I_1 = I_2 = I$. Damit sind z. B. Kurzschlußkräfte auf Stromleiter errechenbar.

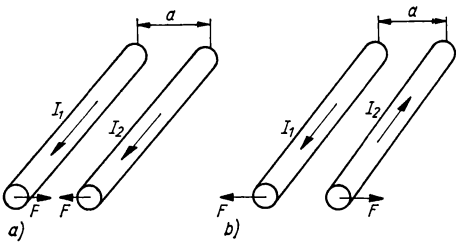


Bild 1.142. Kraftrichtung zweier stromdurchflossener Leiter

Elektromagnetische Induktion

Wird ein Leiter senkrecht zu einem permanenten Magnetfeld bewegt, so entsteht im Leiter eine *Spannung* von der Größe

$$E = Blv$$

B magnetische Flußdichte, magnetische Induktion, l Leiterlänge unter dem Magnetfeld, v Geschwindigkeit der Bewegung

Wird dieser Leiter durch einen äußeren elektrischen Stromkreis geschlossen, fließt ein *Strom*. In diesem Fall wird ein Bewegungswiderstand am Leiter wirksam. Es ist die abgenommene elektrische Leistung in Form *mechanischer Leistung* zuzuführen.
Die Richtung der induzierten Spannung des fließenden Stromes ergibt sich aus der LENZschen *Regel*. Diese besagt, der fließende Strom stellt sich so ein, daß er die Bewegung zu hemmen versucht. Hier kann die *Rechte-Hand-Regel* angewendet werden. Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger bilden ein rechtwinkliges Dreibein. Zeigt der Daumen in Bewegungsrichtung und der Zeigefinger in Richtung des magnetischen Feldes, so gibt der Mittelfinger die Stromrichtung an.
Wechselspannungen lassen sich technisch erzeugen, wenn

1. die Leiterschleife sich im Magnetfeld dreht. Hier ist die Leitergeschwindigkeit senkrecht zum Magnetfeld $v \sin (vB)$ maßgebend. Damit wird die Spannung

$E = Blv \cdot \sin (vB)$

Sinusform aufweisen;
(vB) Drehwinkel;

2. die magnetische Induktion B sich zeitlich ändert;
Diese Fälle lassen sich auf folgendes Gesetz reduzieren:

$$E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} N$$

Φ Magnetfluß, $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ zeitliche Änderung des Magnetflusses,
N Spulenwindungszahl

Die erste angegebene Möglichkeit wird im *Generator*, die zweite im *Transformator* technisch genutzt. Bei einer sinusförmigen Flußänderung entsteht eine kosinusförmige (phasenverschobene sinusförmige) Wechselspannung.

2. Elektrotechnische Bauelemente

2.1. Dioden

2.1.1. Grundlagen

Tabelle 2.1 enthält den Typenschlüssel für Halbleiterdioden, Tabelle 2.2 die Bestimmung der Widerstandsgrößen von Dioden.

Wichtige Standards für Halbleiterdioden

TGL 200-8160	Halbleiterbauelemente; Begriffe der Halbleitertechnik
TGL 200-8161/01	Halbleiterbauelemente; Begriffe für Halbleiterdioden
TGL 200-8200	Halbleiterbauelemente; Kurzzeichen der Halbleitertechnik
TGL 200-8295/01···07	Halbleiterbauelemente; Meßverfahren für Halbleiterdioden
TGL 38015	Bauelemente der Elektronik; Bezeichnungssystem für Halbleiterbauelemente und integrierte Halbleiterschaltkreise
TGL 200-8360	Halbleiterdioden; Halbleiterdioden kleiner Leistung; Bauformen
TGL 8097/01	Halbleiterbauelemente; Halbleiterdioden; Allgemeine technische Forderungen, Prüfung, Lieferung
TGL 16016	Schaltzeichen der Elektrotechnik; Halbleiter

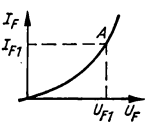
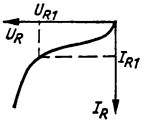
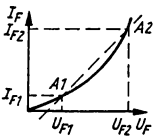
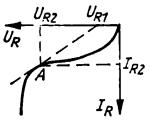
Formelzeichen der Halbleitertechnik

I_F	Durchlaßgleichstrom
I_R	Sperrgleichstrom
P_{tot}	Gesamtverlustleistung
U_R	Sperrgleichspannung
U_F	Durchlaßgleichspannung
R_F	statischer Durchlaßwiderstand
R_f	dynamischer Durchlaßwiderstand
R_R	statischer Sperrwiderstand
R_r	dynamischer Sperrwiderstand
$U_{(TO)}$	Schleusenspannung
t_{rr}	Sperrerholzeit
R_{th}	Gesamtwärmewiderstand
f	Frequenz
ω, Ω	Winkelfrequenz
$P_{V\,max}$	maximale Verlustleistung
Q	Güte
f_Q	Gütefrequenz; Frequenz, bei der ein idealer Schwingkreis aus Induktivität und Kapazitätsdiode die Güte 1 besitzt
C	Kapazität

Tabelle 2.1: Typenschlüssel für Halbleiterdioden (DDR)

1. Buchstabe	2. Buchstabe	3. Buchstabe	Zahlengruppe
Halbleitermaterial	vorzugsweise Anwendung	nur bei professioneller Anwendung	Unterscheidung von Dioden der gleichen Art
G Germanium S Silizium	A Universaldiode E Tunneldiode R Diode mit Durchbruchverhalten Y Gleichrichterdiode Z Z-Diode P Fotodiode	X, Y, Z M Mehrfachdioden	Gleichrichterdioden s. 2.1.3.1. Z-Dioden s. 2.1.4.1.

Tabelle 2.2: Bestimmung der Widerstandsgrößen von Dioden (Näherung)

Kenngröße	Kennlinienfeld	Berechnung
Statischer Durchlaßwiderstand R_F		$R_F = \frac{U_{F1}}{I_{F1}}$
Statischer Sperrwiderstand R_R		$R_R = \frac{U_{R1}}{I_{R1}}$
Dynamischer Durchlaßwiderstand R_f		$R_f \approx \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$ $\Delta U_F = U_{F2} - U_{F1}$ $\Delta I_F = I_{F2} - I_{F1}$ ΔU_F möglichst klein
Dynamischer Sperrwiderstand R_r		$R_r = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R}$ $\Delta U_R = U_{R2} - U_{R1}$ $\Delta I_R = I_{R2}$ U_{R1} Schnittpunkt der Tangente durch A mit der x-Achse

Bestimmung der Schleusenspannung $U_{(TO)}$ s. Bild 2.1.

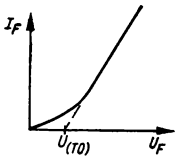


Bild 2.1. Bestimmung der Schleusenspannung $U_{(TO)}$

Bild 2.2 gibt einen Überblick über Halbleiterdioden.

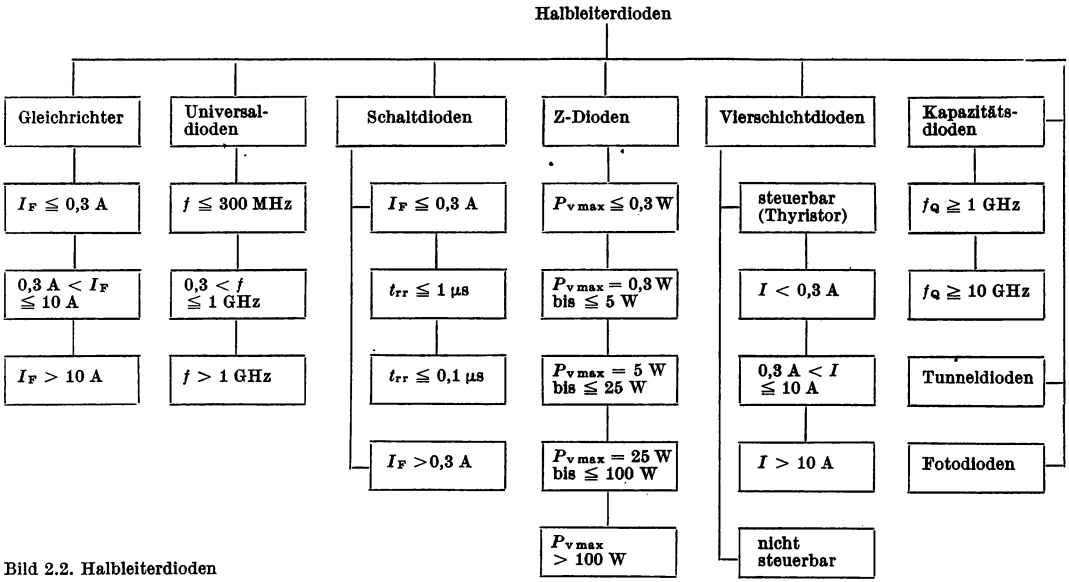


Bild 2.2. Halbleiterdioden

2.1.2. Diodenübersicht

Gleichrichterdioden s. 2.1.3.

Universaldioden

Anwendung: Gleichrichter kleiner Leistung (s. 2.1.3.), Demodulatoren (siehe 6.1.), Modulatoren (vorzugsweise Diodenquartette)

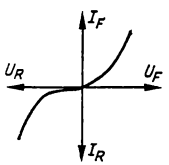


Bild 2.3. Kennlinienverlauf von Universaldioden

Richtwerte: $U_R \leqq 100$ V
$I_F \leqq 20$ mA
$R_F \leqq 200\ \Omega$
$R_R \geqq 100$ kΩ

Anwendung zur Demodulation s. Bild 2.4, in Ringmodulatoren s. Bilder 2.5···2.8 (Ω Trägerfrequenz, ω Modulationsfrequenz)

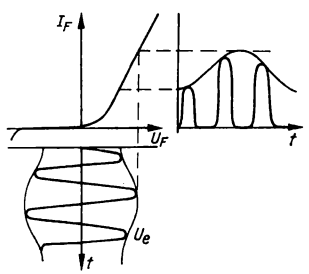


Bild 2.4. Demodulation mit Universaldioden

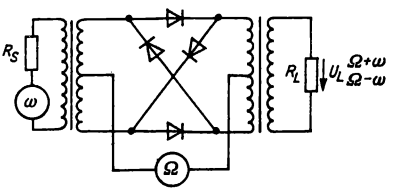


Bild 2.5. Ringmodulator

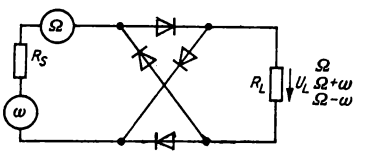


Bild 2.6. Vierpolmodulator ohne Trägerunterdrückung

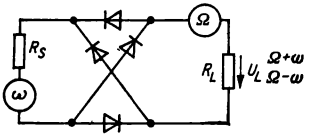


Bild 2.7. Vierpolmodulator mit Trägerunterdrückung

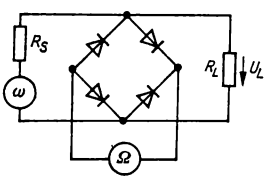


Bild 2.8. COWAN- (Quergegentakt-) Modulator

Schaltdioden

Anwendung: Digitaltechnik (durch geringe Ladungsspeichereffekte kleine Umschaltzeiten von Sperr- in Durchlaßbereich)

Richtwerte:

Golddrahtdioden GAY	Siliziumdioden SAY
$I_F \leqq 100$ mA	$I_F \leqq 300$ mA
$U_R \leqq 80$ V	$U_R \leqq 50$ V
$P_{tot} \leqq 80$ mW	$P_{tot} \leqq 400$ mW
$R_F \leqq 150\ \Omega$	$R_F \leqq 100\ \Omega$
$R_R \geqq 250$ kΩ	$R_R \geqq 4$ MΩ
$C \leqq 1{,}5$ pF ($f = 1$ MHz)	$C \leqq 4$ pF ($f = 1$ MHz)
$R_{th} \approx 0{,}5$ K/mW	$t_{rr} \leqq 4$ ns

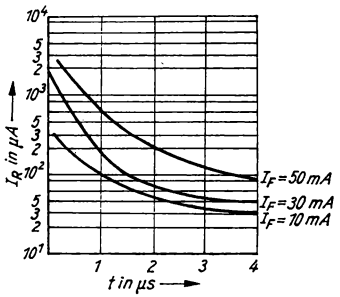


Bild 2.9. Sperrverzögerungsverhalten von Schaltdioden

Z-Dioden s. 2.1.4.

Vierschichtdioden

Anwendung: Digitaltechnik (Generatoren, Multivibratoren, Impulsformer)

Richtwerte:

Haltestrom I_H 1···50 mA
Haltespannung U_H 0,5···2 V
Schaltstrom I_S einige mA
Schaltspannung U_S 10···250 V
R_R 10···100 MΩ
R_F 2···5 Ω
Umschaltverzögerung ≈ 0,2 µs

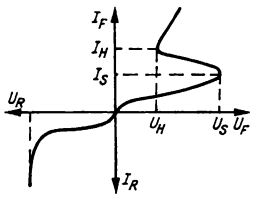


Bild 2.10. Kennlinienverlauf von Vierschichtdioden

Typische Anwendung s. Bilder 2.11···2.15.

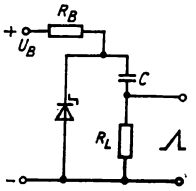


Bild 2.11. Sägezahngenerator mit Vierschichtdiode

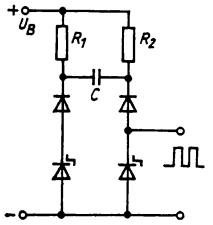


Bild 2.12. Astabiler Multivibrator

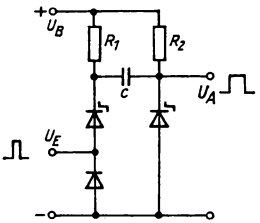


Bild 2.13. Monostabiler Multivibrator

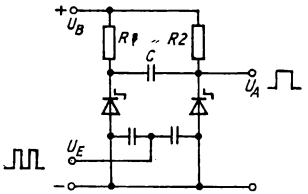


Bild 2.14. Bistabiler Multivibrator

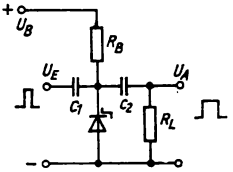


Bild 2.15. Impulsformer

Thyristoren s. 2.2.

Kapazitätsdioden

Anwendung: Abstimmung von Schwingkreisen, Frequenzvervielfachung (Varaktordioden)

Kenngrößen: Steilheit $S_C = \frac{dC}{dU}$

Güte $Q_{max} = \frac{1}{2}\frac{R_p}{R_b}$

Parameter: s. Tabelle 2.3.

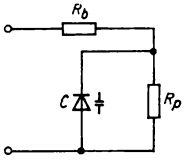


Bild 2.16a. Ersatzschaltbild einer Kapazitätsdiode

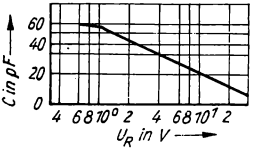
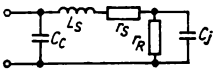


Bild 2.16b. Typischer Verlauf der Kapazitätsänderung

Tabelle 2.3: Parameter von Varaktordioden

Richtwerte		Ersatzschaltbild
Sperrschicht-kapazität	0,1···1 pF	
Zeitkonstante	0,5···2,5 ps	
Grenzfrequenz	70···250 GHz	
Serienwiderstand	5 Ω	

Typische Anwendung s. Bilder 2.17···2.19.

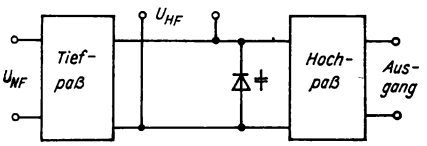


Bild 2.17. AM-Modulator mit Varaktordiode

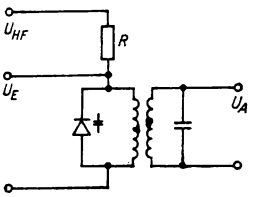


Bild 2.18. Dielektrischer Verstärker

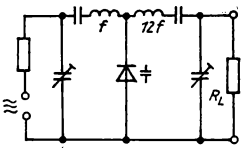
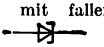


Bild 2.19. Frequenzvervielfachung

Tunneldioden: Dioden mit fallendem Kennlinienbereich (negativer Widerstand) 

Anwendung: Oszillatoren, Verstärker, Digitaltechnik

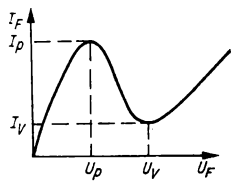


Bild 2.20. Kennlinienverlauf einer Tunneldiode

Richtwerte:
Höckerstrom $I_P \approx 1$ mA
Höckerspannung $U_P \approx 50$ mV
Talspannung $U_V \approx 250$ mV
Verlustleistung $P_V \approx 20$ mW
negativer Widerstand $-R_N \approx 200\ \Omega$

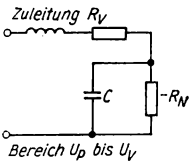


Bild 2.21. Ersatzschaltbild im fallenden Kennlinienteil

Typische Anwendung s. Bilder 2.22 und 2.23.

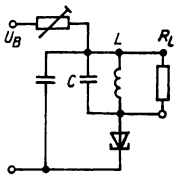


Bild 2.22. Oszillator mit Tunneldiode

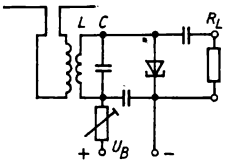


Bild 2.23. Verstärker mit Tunneldiode

Fotodioden s. 2.7.3.2.

U-Dioden: Selen-Überspannungsbegrenzer durch relativ steiles Abknicken der Sperrkennlinie oberhalb einer bestimmten Sperrspannung

Kennlinien gepolter und ungepolter U-Dioden s. Bild 2.24, Schaltsymbole s. Bild 2.25.

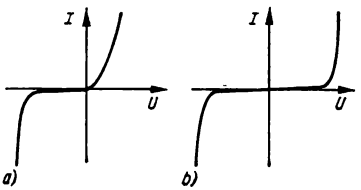


Bild 2.24. Kennlinien von U-Dioden
a) gepolt, b) ungepolt

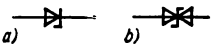


Bild 2.25. Schaltsymbole von U-Dioden
a) gepolt, b) ungepolt

Anwendung: gepolte U-Dioden bei Gleichspannung, ungepolte U-Dioden bei Wechselspannung.

Hochfrequenzdioden s. Tabelle 2.4.

Tabelle 2.4: Hochfrequenzdioden

Diodentyp	Anwendung	Richtwerte
pin-Dioden SCHOTTKY-Dioden	Schaltvorgänge Mischer	Schaltzeiten ≈ 10 ns Grenzfrequenz ≈ 6 GHz
Tunneldioden	rauscharme Verstärker, Schalter	Grenzfrequenz im GHz-Bereich
Backward-diode	Mischer, Detektoren	Schwellenspannung ≈ 1 mV
Lawinen-Laufzeitdioden (IMPATT-Dioden)	Mikrowellengeneratoren, -verstärker	Ausgangsleistung ≦ 1 W Frequenzbereich einige GHz Wirkungsgrad ≈ 5%
GUNN-Dioden	Mikrowellengenerator, Richtfunkverstärker, Radarverstärker	Frequenzbereich 6···18 GHz Wirkungsgrad ≈ 2% Ausgangsleistung ≦ 50 mW Betriebsspannung 5···10 V
Varaktor-diode	Frequenz-vervielfachung	Grenzfrequenz > 100 GHz hoher Wirkungsgrad

2.1.3. Gleichrichterdioden

2.1.3.1. Grundlagen

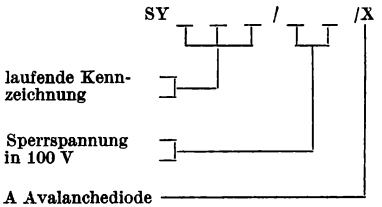
Kurzzeichen und Begriffe s. 2.1.1.
Tabelle 2.5 enthält Parameter ausgewählter Halbleitergleichrichter.

Tabelle 2.5: Parameter ausgewählter Halbleitergleichrichter

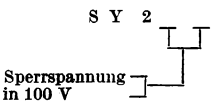
Parameter	Einheit	Cu_2O	Se	Ge	Si
Spezifische Strombelastung (Einweg-Schaltung)					
– selbstbelüftet	A/cm^2	0,04	0,07	40	80
– fremdbelüftet	A/cm^2	0,14	0,20	100	200
Sperrspannung	V	6	25	150	380
Maximale Betriebstemperatur	°C	50	85	65	140
Zellenwirkungsgrad	%	78	92	98,5	99,6
Relativer Raumbedarf bei gleicher Leistung		30	15	3	1
Schleusenspannung	V	0,2	0,6	0,5	0,7
Differentieller Widerstand	$\Omega \cdot cm^2$	2	1,1	$4 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}

Typenschlüssel

SY 170, 171, 180, 400, 250:



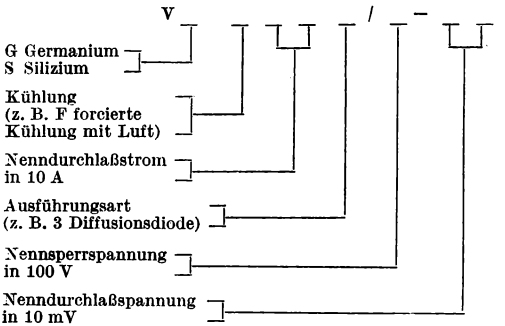
SY 200···SY 210:



Strombelastung:

SY 200/ < 1 A
SY 400/ < 1 A
SY 170, 171 < 25 A für Kfz
SY 180 < 30 A
SY 250 < 250 A

Leistungsgleichrichter:



2.1.3.2. Stromrichterschaltungen

Verwendete Formelzeichen (s. auch 2.1.1.)

U_{dio}	ideelle Leerlaufgleichspannung
U_{elo}	ventilseitige Leitererdspannung im Leerlauf (sekundäre Phasenspannung des Stromrichtertransformators im Leerlauf)
U_{llo}	ventilseitige Spannung im Leerlauf
U_{RWM}	Betriebsscheitelsperrspannung
U_w	Welligkeitsspannung, Brummspannung
U_d	Gleichspannung
I_d	Gleichstrom
$I_{F(AV)}$	arithmetischer Mittelwert des Durchlaßgleichstroms
I_{FM}	oberer Scheitelwert des Durchlaßgleichstroms
I_{elo}	ventilseitiger Leitererdstrom
I_{Si}	Nennstrom der Sicherung
S_T	Nennleistung des Transformators (Typenleistung)
P_d	Gleichstromleistung

Wesentliche Kenngrößen sind im Bild 2.26 dargestellt.

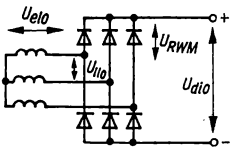


Bild 2.26. Spannungskenngrößen von Stromrichterschaltungen

Tabelle 2.6 gibt einen Überblick über Stromrichterschaltungen, in den Tabellen 2.7 und 2.8 sind Kenngrößen von Stromrichterschaltungen zusammengestellt, Tabelle 2.9 enthält Näherungswerte für die Belastung von Transformatoren.

Tabelle 2.6: Stromrichterschaltungen

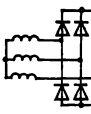
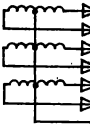
Bezeichnung der Schaltung – TGL 12221 – TGL 200-0608	Schaltbild	Zeigerbild netzseitig	Zeigerbild ventilseitig
E Einweg- E Einpuls-			
M Mittelpunkt- M 2 Zweipulsmittelpunkt-			
B Brücken- B2 Zweipulsbrücken-			
S Stern- M3 Dreipulsmittelpunkt-			
DB Drehstrombrücken- B6 Sechspulsbrücken-			
DS Doppelstern- M6 Sechspulsmittelpunkt-			

Tabelle 2.6 (Fortsetzung)

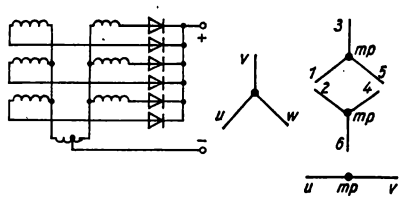
Bezeichnung der Schaltung – TGL 12221 – TGL 200-0608	Schaltbild	Zeigerbild netzseitig	Zeigerbild ventilseitig
DSS Doppelstern- mit Saugdrossel M6 (S) Sechspulsmittelpunkt- mit Saugdrossel			

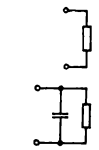
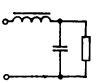
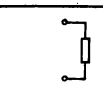
Tabelle 2.7: Kenngrößen von Stromrichterschaltungen (Sinusspannung, ohmsche Last)

Parameter	E	M	B	DB	S	DS	DSS
Phasenzahl (ventilseitig)	1	2	1	3	3	6	6
Welligkeit $w = \frac{U_w}{U_{d1o}}$	1,21	0,48	0,48	0,18	0,042	0,042	0,042
$I_{F(Av)}/I_d$	1	0,5	0,5	1/3	1/3	1/6	1/6
Durchlaßwinkel				2/3	2/3	1/3	1/3
Formfaktor F	1,57	1,57	1,57	1,73	1,76	2,45	1,76
U_{RWM}/U_{1lo}	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
U_{RWM}/U_{elo}	1,41	2,83	1,41	2,45	2,45	2,83	2,45
$I_{FM}/I_{F(Av)}$	3,14	3,14	3,14	3	3	6	3
U_{d1o}/U_{elo}	0,45	0,90	0,90	1,17	2,34	1,35	1,35
U_{RWM}/U_{d1o}	3,14	3,14	1,57	1,05	2,09	2,09	2,09

Tabelle 2.8: Kenngrößen von Stromrichterschaltungen (Sinusspannung, Gegenspannung)

Parameter	E	M	B	DB	S	DS	DSS
U_{d1o}/U_{elo}	1,41	1,41	1,41	2,45	1,41	1,41	1,41
U_{RWM}/U_{d1o}	2	2	1	1	2	2	2
U_{1lo}/U_{elo}	1	2	1	1,73	1,73	2	2
I_{elo}/I_d	2,1	1,1	1,57				

Tabelle 2.9: Näherungswerte für die Belastung von Transformatoren

Gleichrichterschaltung	Belastungsart	U_{elo}	I_{elo}	S_T
		$k_1 \cdot U_d$	$k_2 \cdot I_d$	$k_3 \cdot P_d$
E		$2{,}5U_d$	$1{,}55I_d$	$4{,}4P_d$
		$0{,}9U_d$	$2{,}5I_d$	$2{,}4P_d$
B		$1{,}25U_d$	$1{,}15I_d$	$1{,}45P_d$
		$1{,}25U_d$	$1{,}05I_d$	$1{,}3P_d$
		$0{,}9U_d$	$1{,}75I_d$	$1.6P_d$
M		$1{,}25U_d$	$0{,}8I_d$	$1{,}65P_d$
		$1{,}25U_d$	$0{,}75I_d$	$1{,}6P_d$
		$0{,}9U_d$	$1{,}25I_d$	$1{,}85P_d$
Spannungsverdopplung (s. 2.1.3.4.)		$0{,}45U_d$	$3{,}6I_d$	$1{,}65P_d$

Die Berechnung von Stromrichterschaltungen erfolgt entsprechend Ablaufplan Bild 2.27. Die Berechnung der *Sperrverlustleistung* ist bei Blindlast und die Berechnung der *Schaltverlustleistung* bei Gleichrichtung von Wechselspannungen hoher Frequenz erforderlich.
Berechnung der Kenngrößen nach Bild 2.27 s. Tabelle 2.10.

Tabelle 2.10: Berechnung der Kenngrößen nach Bild 2.27

Kenngröße	Berechnung
Mittlerer Durchlaßstrom $I_{F(Av)}$	s. Tabelle 2.7
Durchlaßverlustleistung P_F	$P_F = U_{(TO)} \cdot I_{F(Av)} + R_F \cdot I_F^2$ $U_{(TO)}$, R_F s. Bild 2.1, Tabelle 2.2 $I_F = F \cdot I_{F(Av)}$ F s. Tabelle 2.7
Gesamtverlustleistung P_{tot}	bei Vernachlässigung von P_R, P_S: $P_{tot} = P_F$
Gesamtwärmewiderstand R_{th} (s. a. 2.1.3.6.)	$R_{th} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_k}{P_{tot}}$
Wärmewiderstand R_{thkk} der Kühleinrichtung	$R_{thkk} = \frac{\vartheta_{kk} - \vartheta_k}{P_{tot}}$

Dioden in Stromrichterschaltungen sind gegen auftretende Überströme und Überspannungen zu schützen.

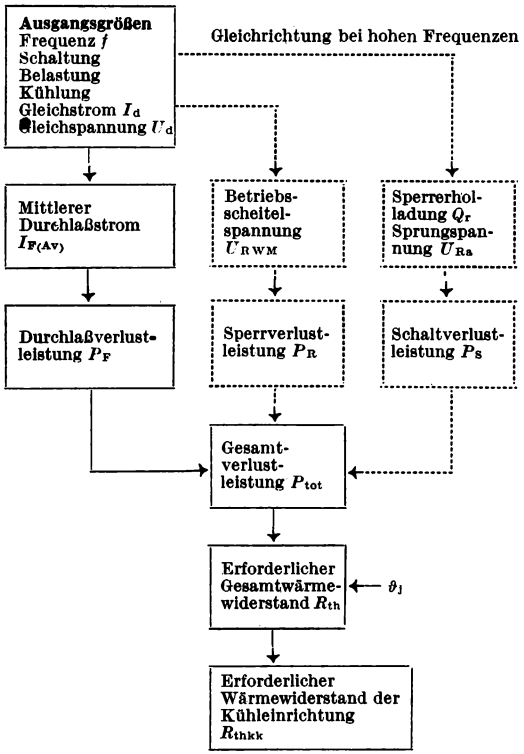


Bild 2.27. Ablaufplan zur Berechnung der stationären Strombelastung

Überstromschutz

Der Überstromschutz erfolgt im wesentlichen durch Schutzschalter bzw. Schmelzsicherungen (s. Tabellen 2.11···2.13).

Tabelle 2.11: Überstromschutz von Stromrichterschaltungen

Überstromschutz	Hauptanwendung	Ausrüstungskosten	Betriebskosten	Vorteile, Nachteile
Schmelzsicherung als Diodensicherung	allgemein, Parallelschaltung $n = 3$	hoch	hoch	Selektion defekter Dioden, Schutz bei Falschpolung
Schmelzsicherung als Strangsicherung	bis ≈ 20 kW	gering	mittel	
Schmelzsicherung als Gleichstromsammelschienen-Sicherung	Batterieladung mit Falschpolungsgefahr	gering	gering	Schutz bei Falschpolung
Schutzschalter mit magnetischer und thermischer Anregung	bis ≈ 10 kW	mittel	keine	kein Schutz im Kurzzeitbereich
Kombination Schmelzsicherung-Schutzschalter mit thermischer Anregung	≈ 5 bis 20 kW	mittel bis hoch	mittel	
Kombination Schmelzsicherung-Schutzschalter mit magnetischer und thermischer Anregung	ab ≈ 5 kW	mittel bis hoch	gering	optimale Vollanpassung möglich
Leistungsschalter mit magnetischer und thermischer Anregung in Verbindung mit Strombegrenzungs- bzw. Glättungsdrosseln	ab ≈ 20 kW	hoch	keine	

Tabelle 2.12: Überstromschutz mit Schmelzsicherung (am Beispiel der Brückenschaltung)

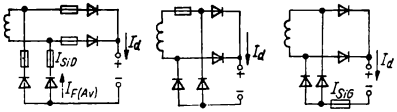
	Diodensicherung	Strangsicherung	Gleichstromsammelschienensicherung
Schaltung			
Schutzwirkung bei			
– Durchschlag einer Diode	ja	ja	nein
– lastseitigem Kurzschluß	ja	ja	ja
– Falschpolung bei Gegenspannungsbelastung	ja	nein	ja

Tabelle 2.13: Strombelastung von Schmelzsicherungen (I_{Si}/I_d)

	E*)	M*)	B*)	S*)	DB*)	DS*)	DSS*)
Ohmsche Belastung							
Dioden-	1,57	0,79	0,79	0,58	0,58	0,41	0,29
Strang-			1,11		0,82		
Sammelschienensicherung		1,11	1,11	1,00	1,00	1,00	1,00
Induktive Belastung							
Dioden-	1,42	0,71	0,71	0,58	0,58	0,41	0,29
Strang-			1,00		0,82		
Sammelschienensicherung		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

*) vgl. Tabelle 2.6

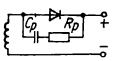
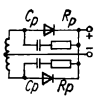
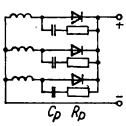
Überspannungsschutz

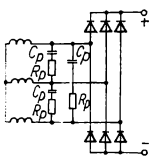
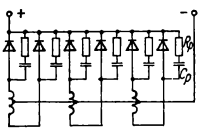
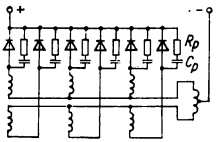
Verwendete Formelzeichen:

U_{2SM}	sekundärseitige Überspannung
ΔU_1	primärseitiger Spannungssprung beim Einschalten
C_{2E}	sekundärseitige Wicklungskapazität gegen Erde
$C_{1,2}$	Kapazität zwischen Primär- und Sekundärwicklung
I_μ	Magnetisierungsstrom des Transformators
I_N	Nennstrom des Transformators
U_{RSML}	Spitzensperrspannung der Diode
S_T	Nennleistung des Transformators
u_k	Nennkurzschlußspannung des Trafos in %
U_{1lom}	Scheitelwert der ventilseitigen Leerlaufspannung in V

Den Schutz vor stationärer Spannungsbelastung zeigt Tabelle 2.14, die Tabellen 2.15 und 2.16 zeigen den Schutz vor nichtstationärer Spannungsbelastung.
Als Überspannungsableiter können gleichermaßen Varistoren eingesetzt werden. Berechnung der Schaltungselemente s. Tabelle 2.17.

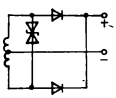
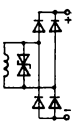
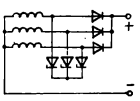
Tabelle 2.14: Schutz vor stationärer Spannungsbelastung (TSE-Beschaltung)

E	M	B	S
			

DB	DS	DSS
		

C_p das etwa 100···200fache der Nullpunktkapazität der Diode; Richtwert in Katalogen
R_p etwa der Wellenwiderstand des Schwingkreises aus C_p und Transformatorinduktivität
Trägerstaueffekt (TSE): hervorgerufen durch Ladungsstau beim Übergang von Durchlaß- zu Sperrichtung

Tabelle 2.15: Schutz vor nichtstationärer Spannungsbelastung I (Überspannungsableitung)

E	M	B	S
			

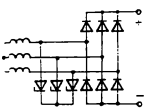
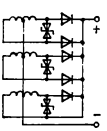
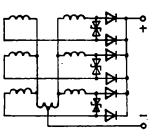
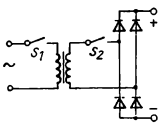
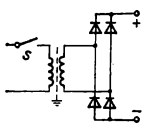
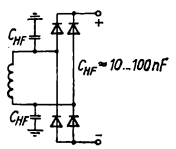
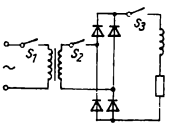
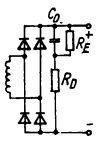
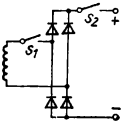
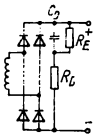
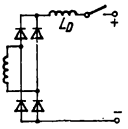
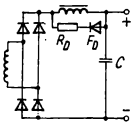
DB	DS	DSS
		

Tabelle 2.16: Schutz vor nichtstationärer Spannungsbelastung II (am Beispiel der Brückenschaltung)

Schaltungsmaßnahme / Ursache	Schaltfolge	Schirmwicklung	HF-Kondensator
Einschalten des Stromrichtertrafos			
	Schaltfolge	**RC-Beschaltung**	
Abschalten des Stromrichtertrafos			
	Schaltfolge	**RC-Beschaltung**	**Dämpfungsdrossel**
Sprunghafte Laständerung			
	Freilaufdiode		
Siebglied			

Größe der Überspannung:

Einschaltvorgang $U_{2SM} = \dfrac{1}{1 + C_{2E}/C_{1,2}} \Delta U_1$

Abschaltvorgang U_{2SM} bis 10faches der Wechselspannungsamplitude

Tabelle 2.17: Berechnung von Schaltungselementen des Überspannungsschutzes

Schaltungselement	Berechnung
C_D bei Abschalten des Stromrichtertrafos	$C_D = k_1 \dfrac{I_\mu/I_N}{f U^2_{RSML}} S_T$
R_D	$R_D = k_2 U_{1lo} \sqrt{\dfrac{u_k}{f S_T C_D}}$ (außer DSS)
	$R_D = k_2 U_{1lo} \sqrt{\dfrac{3u_k + 10}{f S_T C_D}}$ (DSS)
	$P_{RD} \approx 150 R_D f C_D U_{1lo}$

Tabelle 2.17 (Fortsetzung)

Schaltungselement	Berechnung
R_E	$R_E = \dfrac{0{,}3s}{C_D}$
	$P_{RE} = 2 \dfrac{U_{dio}}{R_E}$
C_D bei sprunghafter Laständerung	$C_D = k_3 \dfrac{u_k}{f(U^2_{RSML} - U^2_{1lom})} S_T$

k_1, k_2, k_3 s. Tabelle 2.18, I_μ/I_N s. Bild 2.28

Tabelle 2.18: Konstanten k_1, k_2, k_3

	E	M	B	S	DB	DS	DSS
k_1	0,3	0,3	0,3	0,15	0,15	0,15	0,15
k_2	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,14	0,08
k_3	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$

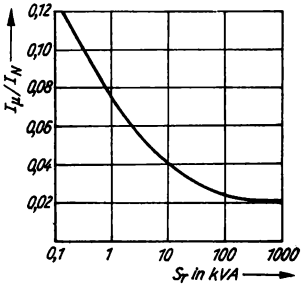


Bild 2.28. I_μ/I_N als Funktion von S_T

2.1.3.3. Reihen-, Parallelschaltung von Dioden

Reihenschaltung (s. Bild 2.29):

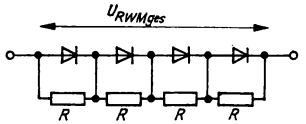


Bild 2.29. Reihenschaltung von Dioden

$$R \leqq \frac{1}{I_{RM}}\left[\frac{U_{RWML}}{1+k} - \frac{U_{RWMges} - U_{RWML}}{(1-k)(n-1)}\right]$$

I_{RM} Sperrstrom bei der Spannung U_{RWML}, U_{RWML} Grenzwert der Betriebsscheitelsperrspannung, $k = \Delta R/R$ Toleranz der Widerstände, n Anzahl der in Reihe geschalteten Widerstände

$$n \geqq \left[\frac{U_{RWMges}}{U_{RWML}} - 1\right]\frac{1+k}{1-k} + 1$$

$C \approx 5 \cdots 20$ nF

Parallelschaltung (s. Bild 2.30):

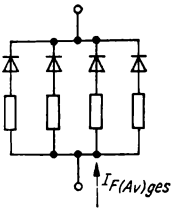


Bild 2.30. Parallelschaltung von Dioden

$$R = (2 \cdots 4)\frac{U_{FM}}{I_{FM}}$$

I_{FM} Scheitelwert des Durchlaßstromes $= I_{FMges}/p$, U_{FM} Durchlaßspannung bei I_{FM} (aus Kennlinie entnehmen), p Anzahl der parallelgeschalteten Dioden

$I_{F(Av)ges} \leqq m_i p I_{F(Av)}$

m_i Stromreduktionsfaktor, abhängig von Typ und Anzahl der Dioden

2.1.3.4. Spannungsvervielfachung

Schaltungen zur ein- bzw. zweiphasigen Spannungsvervielfachung sind in den Bildern 2.31···2.33 dargestellt.

$$C = \frac{I_0}{f U_0}\, 2n(n+2) \cdot 10^6 \quad \text{in } \mu\text{F} \qquad U_0 = 2{,}82 n U_{e\,eff}$$

n Grad der Vervielfachung, U_0, I_0 Ausgangsspannung, -strom

Bei einphasiger Vervielfachung beträgt die Brummspannung $\approx 6\%$ von U_0. Zur Berechnung s. a. Tabelle 2.9.

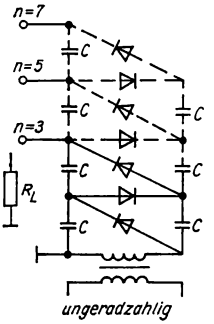


Bild 2.31. Einphasige ungeradzahlige Spannungsvervielfachung

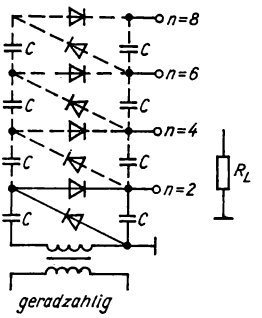


Bild 2.32. Einphasige geradzahlige Spannungsvervielfachung

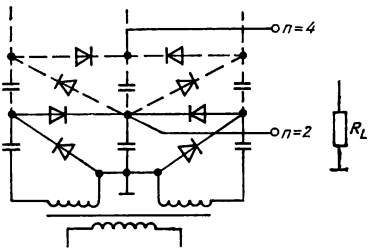


Bild 2.33. Zweiphasige Spannungsvervielfachung

2.1.3.5. Siebung von Gleichspannungen

Die Herabsetzung der Brummspannung von Gleichrichterschaltungen erfolgt durch Einsatz von *Glättungsfiltern* (*LC*-, *RC*-Filter). Ausgewählte Siebglieder sind in den Bildern 2.34 und 2.35 dargestellt.

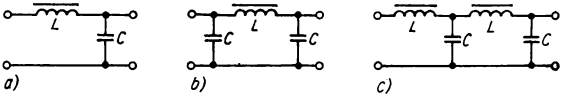


Bild 2.34. *LC*-Siebglieder

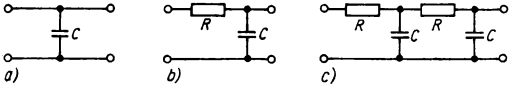


Bild 2.35. *RC*-Siebglieder

Das Maß der Glättung ist der *Siebfaktor* K_S.

$$K_S = \frac{U_{w1}}{U_{w2}}$$

(Verhältnis der Brummspannungen mit und ohne Siebglied)
Siebfaktoren von *LC*- und *RC*-Filtern sind in den Bildern 2.36 und 2.37 dargestellt.
Der Spannungsabfall am Siebglied muß bei Dimensionierung berücksichtigt werden.

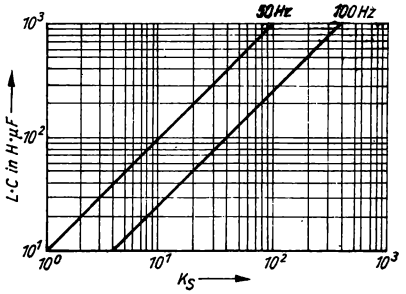


Bild 2.36. Siebfaktoren K_S von *LC*-Filtern nach Bild 2.34 a

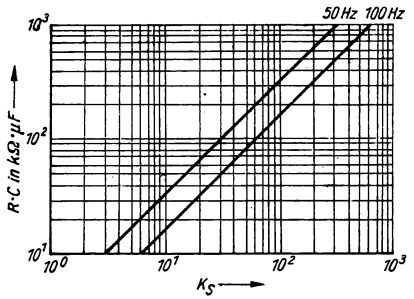


Bild 2.37. Siebfaktoren K_S von *RC*-Filtern nach Bild 2.35 b

2.1.3.6. Kühlung von Leistungsgleichrichtern

Kurzzeichen und Begriffe des Temperaturverhaltens

R_{th}	Gesamtwärmewiderstand Sperrschicht – Umgebung
R_{thi}	innerer Wärmewiderstand Sperrschicht – Gehäuse
R_{the}	äußerer Wärmewiderstand Gehäuse – Umgebung
R_{thm}	Montagewärmewiderstand
R_{thkk}	Wärmewiderstand der Kühleinrichtung
C_{th}	Wärmekapazität
ϑ_j	Sperrschichttemperatur
$\vartheta_{j\,max}$	maximale Sperrschichttemperatur; sollte nur zu 80% genutzt werden
ϑ_c	Gehäusetemperatur
ϑ_a	Umgebungstemperatur
ϑ_k	Kühlkörpertemperatur
ϑ_s	Lagerungstemperatur
ϑ_{kk}	Temperatur an der Grenzfläche Montagematerial/Kühlkörper

Berechnung der Kühleinrichtung

Zulässige maximale *Verlustleistung* ist abhängig vom Gesamtwärmewiderstand

$$P_{v\,max} = \frac{\vartheta_{j\,max} - \vartheta_a}{R_{th}}$$

Gesamtwärmewiderstand:

$$R_{th} = R_{thi} + R_{thm} + R_{thkk} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_k}{P_{tot}}$$

R_{thi} in Katalogen enthalten; $R_{thi} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_c}{P_{tot}}$

R_{thm} abhängig von Größe und Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktstellen und Kontaktdruck; Silikonfett verringert Montagewiderstand

$$R_{thm} = \frac{\vartheta_c - \vartheta_{kk}}{P_{tot}}; \quad R_{thkk} = \frac{\vartheta_{kk} - \vartheta_k}{P_{tot}}.$$

Zur Bestimmung von P_{tot} s. 2.1.3.2.
Abhängigkeit des Durchlaßgleichstroms von der Umgebungstemperatur s. Bild 2.38.

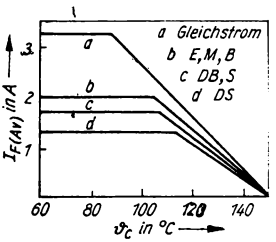


Bild 2.38. Durchlaßstrom in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur (SY 200, 210)

Notwendige Kühlfläche A:

$$A = \frac{1}{\sigma R_{the}}$$

σ Wärmeaustauschkonstante [Luft: $\sigma = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ W/(cm² · K)]

$$R_{the} \leqq \frac{\vartheta_{j\,max} - \vartheta_a}{P_{v\,max}} - R_{thi}$$

Dicke d der Kühlfläche:

$$d \geqq \frac{x^2\sigma}{k\lambda}$$

$k = 0{,}99$; λ Wärmeleitfähigkeit des Kühlkörpermaterials in W/(cm · K); x größter Abstand des Halbleiters vom Rand der Kühlfläche.

Zur Berechnung s. a. 2.3.2.4.

2.1.4. Z-Dioden

2.1.4.1. Grundlagen

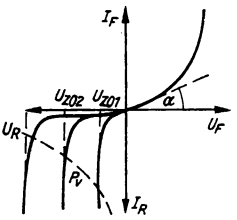


Bild 2.39. Kennlinienfelder von Z-Dioden

Symbol:

Anwendung: Stabilisierung von Gleich- und Wechselspannungen; Impulsbegrenzung, Überlastungsschutz

Richtwerte: Z-Spannung $U_Z = 1$ V, 5···22 V, Durchlaßwiderstand $R_f = \tan\alpha =$ einige Ohm, Z-Widerstand $r_Z = 1$···15 Ω, Z-Strom $I_Z \leqq 100$ mA, Temperaturbeiwert $TK_{UZ} \approx 0$···$8 \cdot 10^{-4}$ K^{-1}

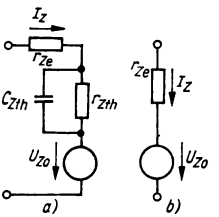


Bild 2.40. Ersatzschaltbild [b) unter Vernachlässigung von r_{Zth}]

Typenschlüssel

SZ 600/_ _ (Angabe der Z-Spannung in V, Nennwert)

Verwendete Formelzeichen (s. a. 2.1.1.)

U_e	Eingangsspannung
U_a	Ausgangsspannung
U_Z	Z-Spannung
I_Z	Z-Strom
I_a	Ausgangsstrom
R_L	Lastwiderstand
TK_{UZ}	Temperaturkoeffizient
r_Z	Z-Widerstand
r_{Zd}	dynamischer Z-Widerstand
r_{Ze}	elektrischer Z-Widerstand
r_{Zth}	thermischer Z-Widerstand

2.1.4.2. Stabilisierungsschaltungen

Kenngrößen

Glättungsfaktor $G = \dfrac{\Delta U_e}{\Delta U_a}$

Stabilisierungsfaktor $S = \dfrac{\Delta U_e/U_e}{\Delta U_a/U_a} = G\,\dfrac{U_a}{U_e}$

1. *Einfachstabilisierung* (Bild 2.41)

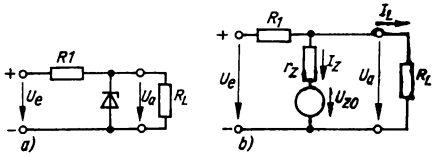


Bild 2.41. Einfachstabilisierung
a) Schaltung, b) Ersatzschaltbild

$$U_a = U_Z;\ G \approx 1 + \frac{R1}{r_Z};\ S = \left(1 + \frac{R1}{r_Z}\right)\frac{U_a}{U_e};\ R_L \gg R1$$

$$\frac{U_{e\max} - U_Z}{I_{a\min} + I_{Z\max}} \leqq R1 \leqq \frac{U_{e\min} - U_Z}{I_{a\max} + I_{Z\min}}.$$

2. *Doppelstabilisierung* (*Kaskadenstabilisierung*) (Bild 2.42)

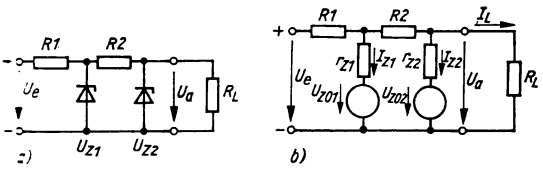


Bild 2.42. Kaskadenstabilisierung
a) Schaltung, b) Ersatzschaltbild

$$U_a = U_{Z1};\ G \approx \frac{R1\,R2}{r_{Z1}\,r_{Z2}};\ U_{Z2} > U_{Z1};\ R1 \approx R2;\ R_L \gg R2.$$

3. *Brückenstabilisierung* mit einer Z-Diode (Bild 2.43)

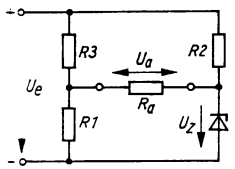


Bild 2.43. Brückenschaltung mit einer Z-Diode

$$U_a = \frac{U_Z - \dfrac{R2}{R1 + R3}\,U_e}{1 + \dfrac{1}{R_a}\,\dfrac{R1\,R3}{R1 + R3}}$$

$$G = \frac{R1 r_Z (R2 + R3) + R2\,R3(R1 + r_Z) + R_a(R1 + R3)(R2 + r_Z)}{(r_Z R3 - R1\,R2)\,R_a}.$$

4. *Brückenschaltung* mit 2 Z-Dioden (für kleine Ausgangsspannungen) (Bild 2.44)

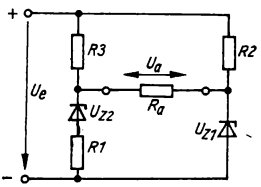


Bild 2.44. Brückenschaltung für kleine Ausgangsspannungen

$$U_a = \frac{\left(1 + \dfrac{R3}{R1}\right)U_{Z1} - U_{Z2} + \dfrac{R3}{R1}\,U_e}{1 + R3\left(\dfrac{1}{R1} + \dfrac{1}{R_a}\right)}$$

$$G = \frac{(R1 + R2)(R3^* + r_{Z1}) \cdot \dfrac{R1\,R2}{R1 + R2} + \dfrac{R3^* \cdot r_{Z1}}{R3^* + r_{Z1}} + R_a \dfrac{(R1 + R3^*)(R2 + r_{Z1})}{(R1 + R2)(R3^* + r_{Z1})}}{(R2\,R3^* - R1\,r_{Z1})\,R_a}$$

$R3^* = R3 + r_{Z2}$.

Optimale Stabilisierung bei
- großem Vorwiderstand $R1$ (Bilder 2.41···2.43),
- geringem Temperaturkoeffizienten der Z-Diode (Bild 2.45),
- kleinem Z-Widerstand r_{Zd} (Bild 2.46),
- geringen Schwankungen der Umgebungstemperaturen (Kühlung).

Günstigster Z-Strom bei

$P_{v\max} \leqq 300$ mW $\quad I_Z = 3$ mA
0,3 W $< P_{v\max} <$ 5 W $\quad I_Z = 100$ mA

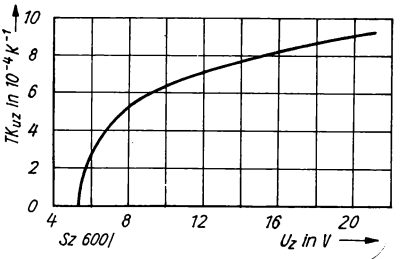


Bild 2.45. TK_{UZ} als Funktion der Z-Spannung

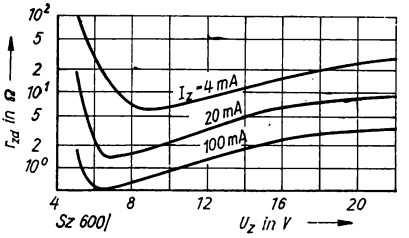


Bild 2.46. Differentieller Z-Widerstand r_{Zd} als Funktion der Z-Spannung

2.1.4.3. Temperaturverhalten

Temperaturänderungen führen zur Änderung der Z-Spannung, des Z-Widerstandes und der zulässigen Verlustleistung (Bilder 2.47 und 2.48).

Änderung der Z-Spannung: $\Delta U_Z = U_Z T K_{UZ} \Delta\vartheta$.

Referenzdioden: Z-Dioden mit sehr kleinem Temperaturkoeffizienten ($TK_{UZ} \leqq 10^{-5}\ K^{-1}$) für kleinen Z-Strom ($I_Z \approx 5$ mA).

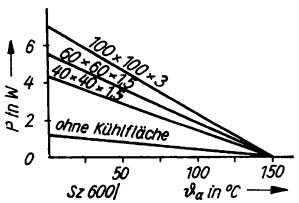


Bild 2.47. Maximale Verlustleistung in Abhängigkeit von der Kühlung

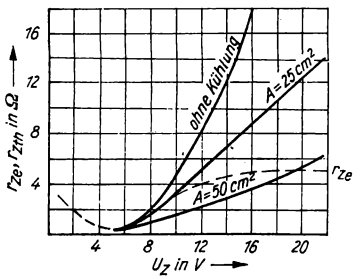


Bild 2.48. Abhängigkeit des elektrischen und des thermischen Z-Widerstandes r_{Ze}, r_{Zth} von der Kühlung

2.2. Thyristoren

2.2.1. Grundlagen

Der Thyristor ist im Gegensatz zu Si-Halbleiterdioden ein steuerbares Silizium-Einkristall-Halbleiterbauelement, besteht aus vier Halbleiterzonen wechselnden Leitungstyps in der Reihenfolge pnpn und hat die Eigenschaft, in beiden Richtungen den Stromfluß zu sperren. Die äußere p-Schicht wird als *Anode* (A) und die äußere n-Schicht als *Katode* (K) bezeichnet. Neben diesen Hauptanschlüssen besitzen Thyristoren einen mit der inneren p-Schicht (katodenseitig) verbundenen Steueranschluß, der kontaktiert ist und als *Steuerelektrode* (G) herausgeführt wird (Bild 2.49).

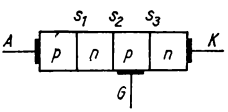


Bild 2.49. Schematischer Aufbau des Thyristors

Die Mittelzone s_2 enthält wenige Ladungsträger (schwach dotiert) und ist damit hochohmig, während sich in den beiden äußeren Zonen s_1, s_3 sehr viele Ladungsträger (hoch dotiert) befinden. Auf Grund seiner guten regelungstechnischen Eigenschaften, des hohen Wirkungsgrades und der Zuverlässigkeit wird der Thyristor u. a. zur Drehzahlregelung von Motoren, zur Steuerung von Beleuchtungsanlagen, zur Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom und umgekehrt sowie für Stromversorgungsgeräte mit geregelter Gleichspannung verwendet.
Thyristoren werden für Netzfrequenz (gute statische Daten) 50···60 Hz und für Mittelfrequenz (gute dynamische Daten) bis 3000 Hz hergestellt. Das Spektrum der Thyristoren gliedert sich in *Kleinthyristoren* (1 A, 50···1000 V), *Leistungsthyristoren* (200 A, 300···4000 V), *Frequenzthyristoren* (400 A, 1500 V) und *Hochleistungsthyristoren* (1000 A, bis 1500 V).

2.2.2. Statische Eigenschaften, dynamisches Verhalten, Kennlinien

Statische Eigenschaften

Der Thyristor hat gegenüber der Diode drei stabile Strom-Spannungs-Kennlinien (Bild 2.50): im Sperrzustand bei offenem Steuerkreis die *positive* und *negative Sperrkennlinie* und im Durchlaßzustand die *Durchlaßkennlinie*.

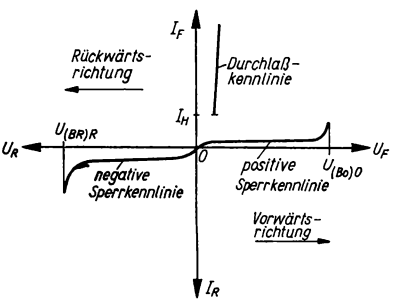


Bild 2.50. Strom-Spannungs-Kennlinien des Thyristors

Liegt zwischen Anode und Katode eines Thyristors eine gegenüber der Katode negative Spannung, so sperrt der Thyristor, d. h., es fließt nur ein von der Sperrschichttemperatur ϑ_j und Sperrspannung U_R abhängiger Sperrstrom I_R (*negative Sperrkennlinie* im Bild 2.51).

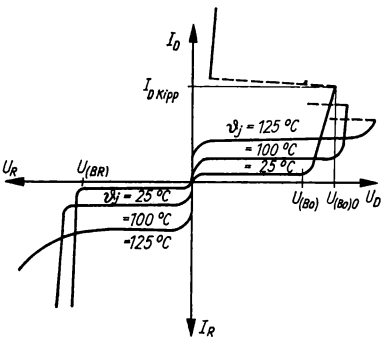


Bild 2.51. Strom-Spannungs-Kennlinien
Parameter: Sperrschichttemperatur

Wird die negative Durchbruchspannung $U_{(BR)}$ erreicht, tritt infolge lawinenartiger Trägervermehrung ein steiler Anstieg des Sperrstromes auf. Damit ist die Sperrfähigkeit des Thyristors in negativer Richtung begrenzt, denn der steil ansteigende Sperrstrom führt infolge starker Erhöhung der Sperrverluste zur thermischen Zerstörung des Thyristors. Eine ähnliche Wirkung hat ein zur Katode fließender positiver Steuerstrom.
Ebenso sperrt der Thyristor, wenn zwischen Anode und Katode eine gegenüber der Katode positive Spannung liegt, und es fließt vorerst auch ein von der Sperrschichttemperatur ϑ_j und von der Sperrspannung U_D sehr stark abhängiger Sperrstrom I_D (*positive Sperrkennlinie* im Bild 2.51).
Wird die positive Durchbruchspannung $U_{(BO)}$ erreicht, steigt der Sperrstrom I_D steil bis auf den *Kippstrom* an. In diesem Augenblick ist die *Nullkippspannung* $U_{(BO)0}$ erreicht, und der Thyristor wird leitend. Diese Beanspruchung führt zur Zerstörung des Thyristors und darf nicht zugelassen werden. Der

Wert der Kippspannung auf der Abszisse ist von der Beschaltung der Steueranschlüsse abhängig und um so niedriger, je größer der Steuerstrom (Bild 2.52) ist.

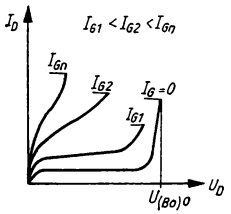


Bild 2.52. Kennlinie $I_D = f(U_D)$
Parameter: Steuerstrom

Liegt zwischen Anode und Katode eine gegenüber der Katode positive Spannung und wird zum Zünden an die Steuerelektrode ein genügend hoher positiver Spannungsimpuls gelegt, dann werden in die einzig gesperrte Zone s_2 Ladungsträger injiziert, und der Thyristor wird in Vorwärtsrichtung leitend (*Durchlaßkennlinie* im Bild 2.53).

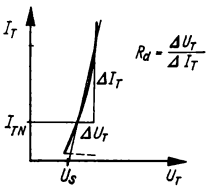


Bild 2.53. Durchlaßkennlinie des Thyristors (Annäherung)

Die Durchlaßkennlinie kann dabei mit Hilfe des differentiellen Widerstandes R_d und der Schleusenspannung U_s annähernd beschrieben werden zu $U_T = U_s + R_d I_T$.
Die Durchlaßkennlinie einer Siliziumdiode entspricht etwa der Durchlaßkennlinie eines Thyristors, d. h., auch bei großen Strömen ist die Spannung zwischen Anode und Katode des Gleichrichters klein und beträgt etwa 1 V. Bei relativ kleinen Durchlaßströmen ist allerdings die Durchlaßspannung etwas höher, und die Identität zwischen der Durchlaßkennlinie des Thyristors und der des normalen Gleichrichters setzt erst etwa oberhalb 10 A ein.
Gegenüber der Siliziumdiode weist der Thyristor jedoch einen wesentlichen Unterschied auf. Ein gezündeter Thyristor verbleibt so lange im Durchlaßzustand (auch wenn kein Steuerstrom mehr fließt), bis der Durchlaßstrom den Haltestrom unterschreitet.
Eine Zuordnung der Augenblickswerte von Durchlaßstrom I_T und Durchlaßspannung U_T für die Sperrschichttemperaturen $\vartheta_j = 25\,°C$ und $\vartheta_j = 125\,°C$ zeigen die Durchlaßkennlinien im Bild 2.54.

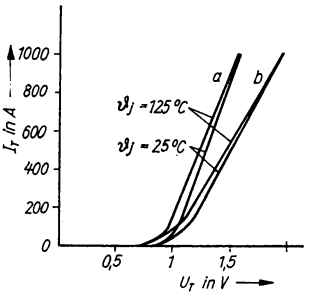


Bild 2.54. Durchlaßkennlinien
a mittlere Kennlinien, b Grenzkennlinien

Die Zündspannung U_{GT} ist der höchste Spannungswert an den Steuerelektroden, der Zündstrom I_{GT} der minimalste Steuerstrom, der vom Steuergerät im *Steuerkreis* aufgebracht werden muß, um den Thyristor in den leitenden Zustand zu bringen. Steuerkennlinien und Zündbereich der möglichen und sicheren Zündung sind im Bild 2.55 dargestellt.

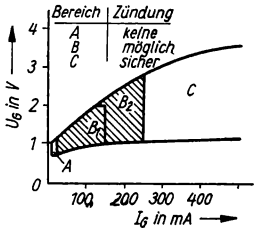


Bild 2.55. Zündbereich

Der obere Zündstrom im Bereich B1 beträgt 150 mA und im Bereich B2 250 mA, die dazugehörige obere Zündspannung 2 V bzw. 2,75 V.
Der Zündimpuls muß so breit sein, daß der Thyristor mit Sicherheit gezündet wird. Im wesentlichen hängt die Zündimpulsbreite t_G von den Eigenschaften des Lastkreises ab (Bild 2.56).

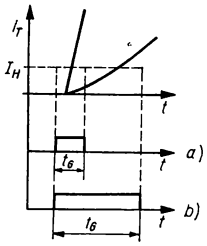


Bild 2.56, Zündimpulsbreite
a) ohmsche Belastung,
b) induktive Belastung

Um das Steuergerät bei defektem Thyristor nicht zu beschädigen, muß ein Schutzwiderstand R_G in den Steuerkreis geschaltet werden (Bild 2.57). Die Spannung U, die dann an den Steuerkreis gelegt werden muß, berechnet sich aus

$$U = I_{GT} R_G + U_{GT},$$

wobei R_G unter Berücksichtigung der zulässigen Steuerverluste frei wählbar ist.

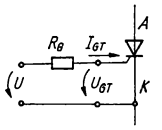


Bild 2.57. Prinzipschaltbild des Steuerkreises

Dynamisches Verhalten

Eine Leistungssteuerung mit Thyristoren erfordert ein ständiges Ein- und Ausschalten des Stromes im Hauptstromkreis. Der *Einschaltvorgang* wird durch die *Zündzeit* t_{gt} charakterisiert, die in zwei Phasen unterteilt werden kann: 1. *Zündverzugszeit* t_{gd} (abhängig von der Höhe und Steilheit des Zündimpulses), 2. *Durchschaltzeit* t_{gr} (abhängig von der Anstiegsgeschwindigkeit und Höhe des Laststromes) (Bild 2.58).

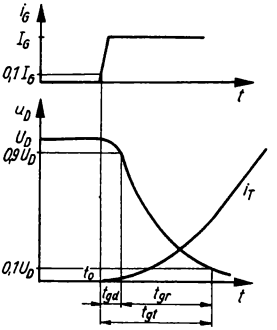


Bild 2.58. Einschaltvorgang

Wird zum Zeitpunkt t_0 der Zündvorgang mit einem sprungförmigen Steuerstromimpuls eingeleitet, so sinkt die positive Sperrspannung während der Zündverzugszeit auf 90% ihres ursprünglichen Wertes, während der Durchschaltzeit auf 10% ihres Anfangswertes. Während dieser Durchschaltphase, die sich innerhalb einiger Mikrosekunden abspielt, ist infolge der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laststromes über die Tablettenfläche nur eine kleine Stelle in der Nähe der Steuerelektrode leitend. Bei sehr steil ansteigendem Laststrom kann sich in diesem leitenden Kanal eine so hohe Stromdichte und damit Verlustleistungsspitze ergeben, daß infolge thermischer Überbelastung der Thyristor zerstört wird. Somit ist vom Element her ein Grenzwert für die zulässige Laststromsteilheit gegeben. Wenn dieser Wert bei R- oder RC-Last nicht eingehalten werden kann, so ist die Stromanstiegsgeschwindigkeit mit zusätzlichen Schaltungsmaßnahmen, z. B. einer Reiheninduktivität, bei kapazitiver Belastung mittels Vorwiderstands, zu begrenzen.

Der *Ausschaltvorgang* ist durch die *Sperrverzugszeit* t_{rr} und die *Freiwerdezeit* t_q charakterisiert. Bild 2.59 zeigt den Strom-Spannungs-Verlauf beim Abschalten einer Wirklast.

Zum Zeitpunkt t_0 erfolgt eine Laststromabnahme. Infolge des steilen Stromrückganges wird zum Zeitpunkt t_1 der Strom noch mit unverminderter Geschwindigkeit in negativer Richtung weiterfließen, da die einzelnen Halbleiterzonen noch mit Ladungsträgern überschwemmt sind (Trägerstaueffekt, auch TSE genannt). Erst zum Zeitpunkt t_2 kann der Thyristor negative Sperrspannung übernehmen, da die Sperrschichten s_1 und s_3 von Ladungsträgern weitgehend geräumt sind. Gleichzeitig reißt zu diesem Zeitpunkt der Rückstrom ab und klingt schnell auf den statischen Sperrstrom ab. Zum Zeitpunkt t_3 ist die Freiwerdezeit beendet (die in der Sperrschicht s_2 noch gespeicherte Restladung wurde durch Rekombination abgebaut), und es kann wieder eine positive Sperrspannung angelegt werden, ohne daß eine Zündung des Thyristors infolge fehlenden Steuerstromes einsetzt.

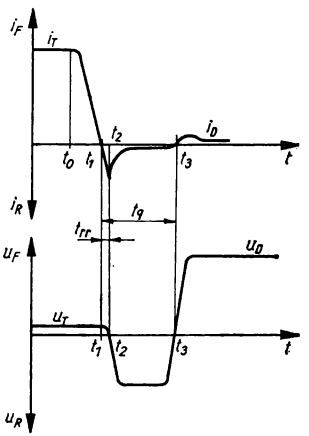


Bild 2.59. Ausschaltvorgang

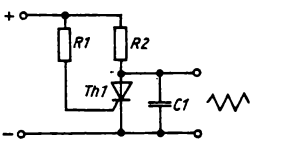


Bild 2.60. Sägezahngenerator

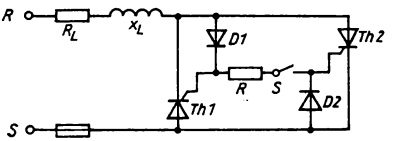


Bild 2.61. Schalten großer Lastströme mit kleinem Schalter

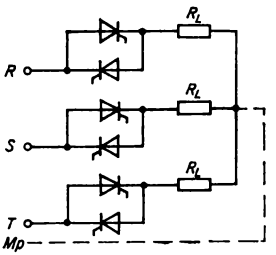


Bild 2.62. Drehstromsteller

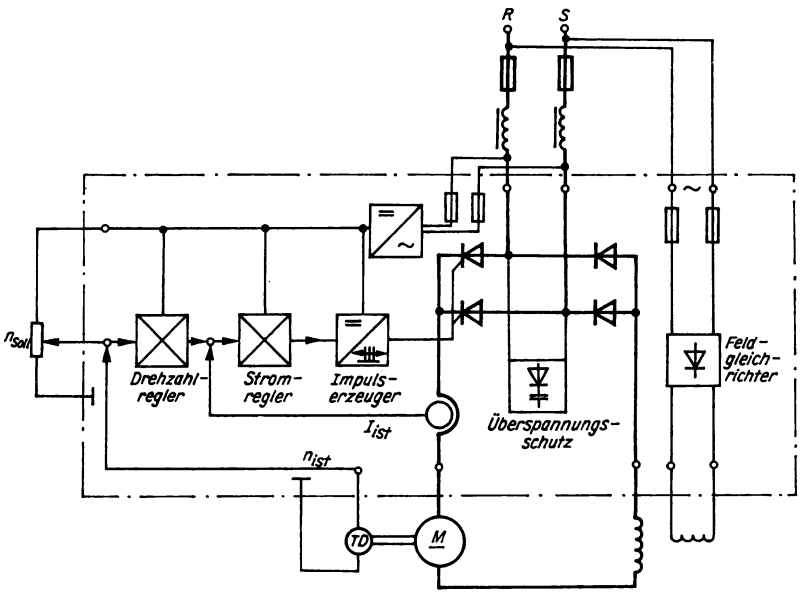


Bild 2.63. Blockschaltbild für stufenlose Drehzahlregelung bei Gleichstrommaschinen

Das schlagartige Abreißen des Rückstromes zum Zeitpunkt t_2 führt beim Vorhandensein von Induktivitäten im Lastkreis zu hohen Überspannungen. Damit keine Zerstörung des Thyristors erfolgt, müssen diese Überspannungen durch Parallelschaltung eines *RC*-Gliedes gedämpft werden, wobei die optimalen Werte desselben für den jeweiligen Anwendungszweck durch Messen bestimmt werden müssen.
Nach der Freiwerdezeit richtet sich die Arbeitsfrequenz, mit der der Thyristor betrieben werden kann. Im Mittel liegt die Freiwerdezeit bei 10···100 µs.

2.2.3. Schaltungsbeispiele

Die Bilder 2.60···2.63 zeigen Schaltungen für einige Anwendungsfälle.
Eine für die Zukunft richtungweisende *Zündschaltung mit Fotothyristorkoppler*, die erhebliche technologische Vorteile gegenüber Übertragerschaltungen bietet, zeigt Bild 2.64. Die

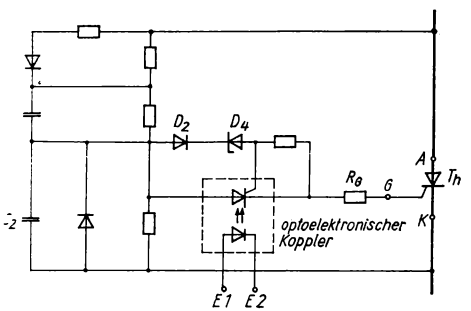


Bild 2.64. Kopplerzündschaltung mit Fotothyristorempfänger

Zündenergie wird dem Leistungskreis entnommen. Für die Zündung des Leistungsthyristors gibt es zwei Möglichkeiten:
1. die betriebsmäßige Nutzung, bei der der Fotothyristor über die Lumineszenzdiode gezündet wird, so daß sich C_2 über den Fotothyristor, R_G und G – K des Thyristors Th entladen kann, 2. das Ansteigen der positiven Sperrspannung über Th, bis die Spannung über C_2 die Durchbruchspannung der Z-Diode D_4 überschreitet und der Fotothyristor über D_3, D_4 zündet.

2.3. Transistoren

2.3.1. Bipolare Transistoren

2.3.1.1. Grundlagen

Transistoren werden zur Verstärkung von Signalen eingesetzt. Je nach Schaltungstechnik ist Leistungs-, Strom- oder Spannungsverstärkung möglich. Das Einsatzgebiet (Tabelle 2.19) wird bestimmt durch den inneren Aufbau und die damit zusammenhängende Technologie. Als Halbleitermaterialien werden vorwiegend Germanium und Silizium eingesetzt, wobei die Verwendung von Germaniumtransistoren weitgehend vermieden werden sollte.

Tabelle 2.19: Typenschlüssel von Transistoren

1. Buchstabe	2. Buchstabe	Zahlengruppe
Halbleiter-material:	Anwendung:	Unterscheidung von Transistoren der gleichen Art
G Germanium	C NF-Transistor	
S Silizium	D NF-Leistungstransistor	
	F HF-Transistoren	
	M Feldeffekttransistoren	
	L HF-Leistungstransistor	
	S Schalttransistor	
	U Leistungsschalttransistor	
	P Fototransistor	

Symbole von Germanium-, Siliziumtransistoren s. Bild 2.65.
Der innere *Aufbau* entspricht dem Gegeneinanderschalten zweier Dioden (Bild 2.66; bei pnp-Transistoren Umkehr der Polarität).
Die im Transistor auftretenden Ströme (Bild 2.67) sind:

$I_E = -I_{C1} - I_{B1}$ (Emitterstrom)
$I_B = I_{B1} - I_{B2}$ (Basisstrom)
$I_C = I_{C1} + I_{C2}$ (Kollektorstrom)

Dabei gilt: $I_E + I_B + I_C = 0$

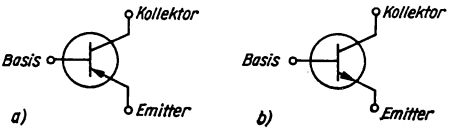


Bild 2.65. Symbole von Transistoren
a) p n p, b) n p n

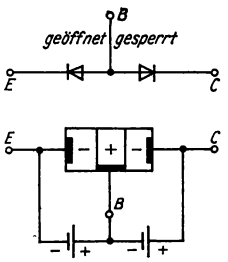


Bild 2.66. Prinzipieller Aufbau eines Transistors

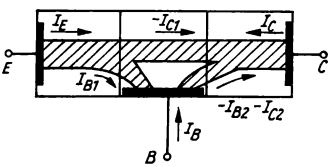


Bild 2.67. Stromverteilung in einem Transistor

2.3.1.2. Theorie

In Tabelle 2.20 sind Eigenschaften von Transistorgrundschaltungen zusammengestellt.
Die Zählrichtung der Ströme und die Spannungen an einem Transistor sind aus Bild 2.68 ersichtlich.

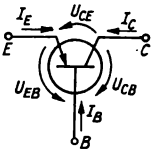


Bild 2.68. Ströme und Spannungen an einem Transistor

Vierpoltheorie (Bild 2.69)



$i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2$
$i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2$
$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2$
$u_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2$

Bild 2.69. Ströme und Spannungen an einem Vierpol

y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}, h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22} sind Koeffizienten, die die Abhängigkeit der Ströme und Spannungen untereinander charakterisieren (Tabellen 2.21 und 2.22).

Tabelle 2.20: Eigenschaften von Transistorgrundschaltungen

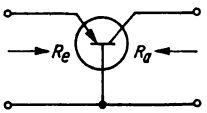
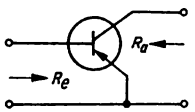
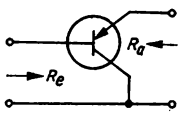
Schaltung	Basisschaltung	Emitterschaltung	Kollektorschaltung
Bild			
Stromverstärkung	≈ 1	> 1	$\gg 1$
Spannungsverstärkung	$\gg 1$	> 1	≈ 1
Eingangswechselstrom-widerstand R_e	niedrig ($10 \cdots 100\ \Omega$)	mittel ($1 \cdots 10\ k\Omega$)	hoch ($> 100\ k\Omega$)
Ausgangswechselstrom-widerstand R_a	hoch ($> 100\ k\Omega$)	mittel ($10 \cdots 100\ k\Omega$)	niedrig ($100\ \Omega \cdots 1\ k\Omega$)

Tabelle 2.21: y-Parameter (Leitwertparameter)

Parameter	Definition	Bedingung	Einheit	Bezeichnung
y_{11}	$y_{11} = \frac{i_1}{u_1}$	$u_2 = 0$; Ausgang kurzgeschlossen	Ω^{-1}	Eingangsleitwert
y_{12}	$y_{12} = \frac{i_1}{u_2}$	$u_1 = 0$; Eingang kurzgeschlossen	Ω^{-1}	Kurzschlußrückwirkleitwert
y_{22}	$y_{22} = \frac{i_2}{u_2}$	$u_1 = 0$	Ω^{-1}	Kurzschlußausgangsleitwert
y_{21}	$y_{21} = \frac{i_2}{u_1}$	$u_2 = 0$	Ω^{-1}	Kurzschlußübertragungsleitwert, Kurzschlußsteilheit

$\Delta y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}$

Tabelle 2.22: h-Parameter (Hybridparameter)

Parameter	Definition	Bedingung	Einheit	Bezeichnung
h_{11}	$h_{11} = \frac{u_1}{i_1}$	$u_2 = 0$; Ausgang kurzgeschlossen	Ω	Kurzschlußeingangswiderstand
h_{12}	$h_{12} = \frac{u_1}{u_2}$	$i_1 = 0$; Leerlauf am Eingang	–	Leerlaufspannungsrückwirkung
h_{21}	$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}$	$u_2 = 0$	–	Kurzschlußstromverstärkung
h_{22}	$h_{22} = \frac{i_2}{u_2}$	$i_1 = 0$	Ω^{-1}	Leerlaufausgangsleitwert

$\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$

h- und y-Parameter werden experimentell ermittelt (Tabelle 2.27); Anwendung der h-Parameter bei niedrigen Frequenzen, der y-Parameter bei hohen Frequenzen. Bei niedrigen Frequenzen lassen sich die Parameter ineinander umrechnen (Tabelle 2.23).

Tabelle 2.23: Umrechnung der Parameter bei niedrigen Frequenzen

y-Parameter	$y_{11} = \frac{1}{h_{11}}$	$y_{12} = \frac{h_{12}}{h_{11}}$	$y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}}$	$y_{22} = \frac{\Delta h}{h_{11}}$
h-Parameter	$h_{11} = \frac{1}{y_{11}}$	$h_{12} = -\frac{y_{12}}{y_{11}}$	$h_{21} = \frac{y_{21}}{y_{11}}$	$h_{22} = \frac{\Delta y}{y_{11}}$

Bei hohen Frequenzen sind die y-Parameter durch innere Kapazitäten komplexe Größen:

$$\underline{Y} = \underbrace{g}_{\text{Realteil}} + \underbrace{jb}_{\text{Imaginärteil}} = g + j\omega C$$

Für die Grundschaltungen nach Tabelle 2.20 ergeben sich unterschiedliche Werte der y-, h-Parameter. Sie werden meist für die Emitterschaltung (Index e) angegeben und lassen sich für die anderen Schaltungen umrechnen (Tabelle 2.24).

Tabelle 2.24: Umrechnung der h-Parameter

Parameter	Kollektorschaltung	Basisschaltung
h_{11}	$= h_{11e}$	$= \frac{h_{11e}}{1 + h_{21e}}$
h_{12}	$= 1$	$= \frac{\Delta h_e - h_{12e}}{1 + h_{21e}}$
h_{21}	$= -(1 + h_{21e})$	$= \frac{-h_{21e}}{1 + h_{21e}}$
h_{22}	$= h_{22e}$	$= \frac{h_{22e}}{1 + h_{21e}}$

Vierpolparameter dienen der Berechnung von Betriebsgrößen von Transistorschaltungen (Tabelle 2.25).

Tabelle 2.25: Berechnung von Transistorbetriebsgrößen

Betriebsgröße	h-Parameter	y-Parameter
Eingangswiderstand	$R_e = \frac{h_{11} + \Delta h R_L}{1 + h_{22} R_L}$	$R_e = \frac{y_{21} R_L}{1 + y_{22} R_L}$
Ausgangswiderstand	$R_a = \frac{h_{11} + R_i}{\Delta h + h_{22} R_i}$	$R_a = \frac{1 + y_{11} R_i}{y_{22} + \Delta y R_i}$
Stromverstärkung	$v_i = \frac{h_{21}}{1 + h_{22} R_L}$	$v_i = \frac{y_{21}}{y_{11} + \Delta y R_L}$
Spannungsverstärkung	$v_u = (-)\frac{h_{21} R_L}{\Delta h R_L + h_{11}}$	$v_u = \frac{y_{21} R_L}{1 + y_{22} R_L}$
Leistungsverstärkung	$v_P = \frac{h_{21}^2 R_L}{(1 + h_{22} R_L)(h_{11} + \Delta h R_L)}$	$v_P = \frac{\lvert y_{21} \rvert^2 R_L}{(1 + y_{22} R_L)(y_{11} + \Delta y R_L)}$

Die Bilder 2.70···2.74 enthalten wesentliche Abhängigkeiten und Funktionen.
Unter Anpassung der Transistoren versteht man die Optimierung des Generatorinnenwiderstands R_i, des Lastwiderstands R_L und der Leistungsverstärkung v_P in Abhängigkeit von den Betriebsdaten des Transistors. Das Maximum der Eingangsleistung P_e wird bei $R_e = R_i$ und der Ausgangsleistung P_a bei $R_a = R_L$ erreicht.

$P_{e\,max} = \frac{u_0^2}{4R_i}$ (s. a. Bild 2.75)

u_0 Leerlaufgeneratorspannung

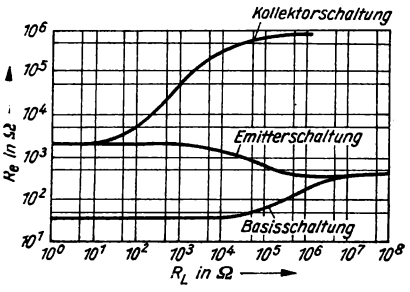


Bild 2.70. Abhängigkeit des Eingangswiderstands vom Lastwiderstand

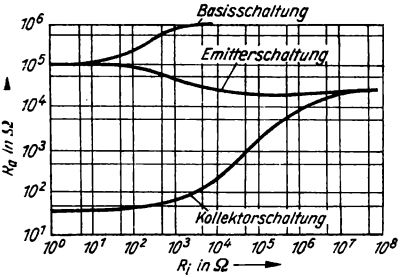


Bild 2.71. Zusammenhang Innenwiderstand/Ausgangswiderstand

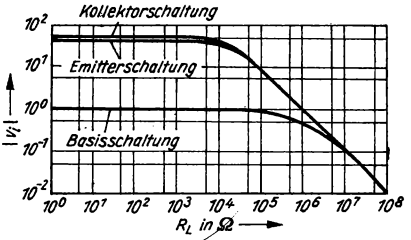


Bild 2.72. Stromverstärkung in Abhängigkeit vom Lastwiderstand

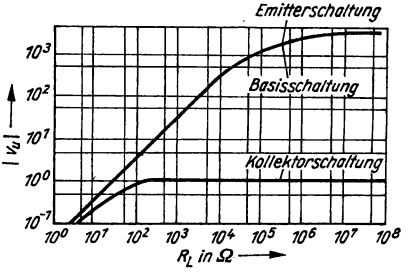


Bild 2.73. Spannungsverstärkung als Funktion des Lastwiderstands

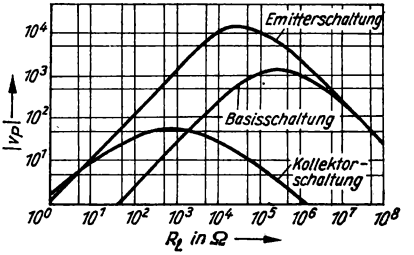


Bild 2.74. Leistungsverstärkung als Funktion des Lastwiderstands

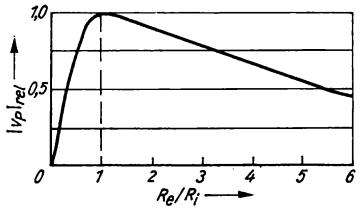


Bild 2.75. Leistungsverstärkung als Funktion der Anpassung

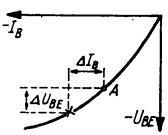
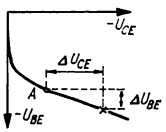
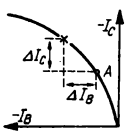
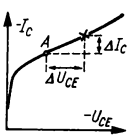
Kennliniendarstellung (Tabelle 2.26)

Tabelle 2.26: Darstellung von Transistorkennlinien

	Basisschaltung	Emitterschaltung	Bezeichnung
1. Quadrant	$I_C = f(U_{CB})$ Parameter I_E	$I_C = f(U_{CE})$ Parameter I_B	Ausgangskennlinienfeld
2. Quadrant	$I_C = f(I_E)$ Parameter U_{CB}	$I_C = f(I_B)$ Parameter U_{CE}	Stromübertragungskennlinienfeld
3. Quadrant	$I_E = f(U_{EB})$ Parameter U_{CB}	$I_B = f(U_{BE})$ Parameter U_{CE}	Eingangskennlinienfeld
4. Quadrant	$U_{EB} = f(U_{CB})$ Parameter I_E	$U_{BE} = f(U_{CE})$ Parameter I_B	Spannungsrückwirkungskennlinienfeld

Die Darstellung der Kennlinien erfolgt meist in Emitterschaltung (Bild 2.76), die näherungsweise Bestimmung der h-Parameter s. Tabelle 2.27.

Tabelle 2.27: Näherungsweise Bestimmung der h-Parameter

Parameter	Näherungsbeziehung	Kennlinienfeld
h_{11}	$h_{11e} \approx \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$; U_{CE} = konst.	
h_{12}	$h_{12e} \approx \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}}$; I_B = konst.	
h_{21}	$h_{21e} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$; U_{CE} = konst.	
h_{22}	$h_{22e} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}}$; I_B = konst.	

Je kleiner die Differenz in der Nähe des Arbeitspunktes A, desto größer die Genauigkeit des bestimmten h-Parameters.

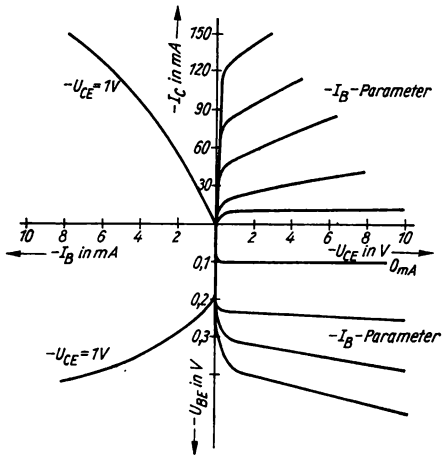


Bild 2.76. Kennlinienfelder eines Transistors

Ersatzschaltbilder

Ersatzschaltbilder unter Berücksichtigung sämtlicher Randbedingungen werden sehr kompliziert und unübersichtlich. Daher wird für bestimmte Anwendungsfälle vereinfacht. Die Bilder 2.77···2.80 zeigen Beispiele für lineare Verstärkung.

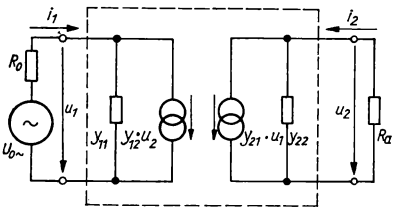


Bild 2.77. y-Parameter-Ersatzschaltbild eines Transistors

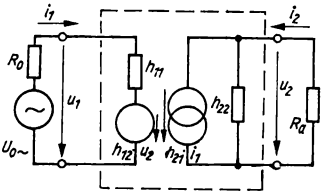


Bild 2.78. h-Parameter-Ersatzschaltbild eines Transistors

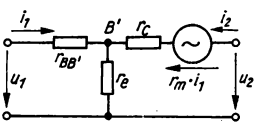


Bild 2.79. Ersatzschaltbild bei mittleren Frequenzen

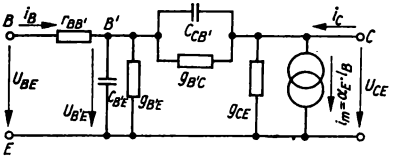


Bild 2.80. Ersatzschaltbild nach GIACOLETTO

2.3.1.3. Schaltungstechnik

Im Ausgangskennlinienfeld (I. Quadrant) wird der Arbeitsbereich des Transistors festgelegt (Bild 2.81).
Begrenzung des zur Verstärkung nutzbaren Bereiches durch Verlustleistungshyperbel $P_{V\,max}$, durch maximalen Kollektorstrom $I_{C\,max}$, durch maximale Kollektor-Emitter-Spannung $U_{CE\,max}$ und Kollektorreststrom I_{CE0}.

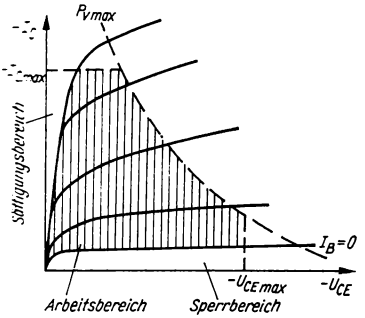


Bild 2.81. Begrenzung des Arbeitsbereiches eines Transistors

Festlegung des Arbeitspunktes nach folgenden Gesichtspunkten:

- die zum Arbeitspunkt gehörende Lastgerade darf die Verlustleistungshyperbel höchstens berühren (Ausnahme: Schalteranwendung),
- Wahl des Lastwiderstandes entsprechend geforderter Ausgangsleistung.

Bestimmung der Lastgeraden:

- Schnittpunkt mit U_{CE}-Achse: $U_{CE} = U_B$ bei $I_e = 0$ (U_B Betriebsspannung),
- Schnittpunkt mit I_C-Achse: $I_C = \frac{U_B}{R_L}$ (U_B Betriebsspannung).

Entsprechend der geforderten Aussteuerung wird anschließend der *Basisstrom* I_B festgelegt (Bild 2.82).

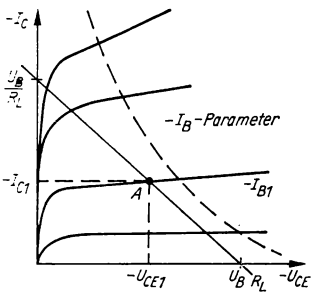


Bild 2.82. Festlegung des Arbeitspunktes im Kennlinienfeld

Der Arbeitspunkt ist bestimmt durch

- Kollektorstrom I_{C1},
- Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE1},
- Basisstrom I_{B1}.

Verstärkerwirkung eines Transistors s. Bild 2.83.
Schaltungsvarianten zur Einstellung des Basisstromes s. Tabelle 2.28.

Steuerungsarten des Transistors:

1. *Spannungssteuerung:* $R_1 \ll R_e$; große Verzerrungen des Basisstromes,
3. *Anpassung:* $R_1 = R_e$,
2. *Stromsteuerung:* $R_1 \gg R_e$; geringe Verzerrungen des Basisstromes.

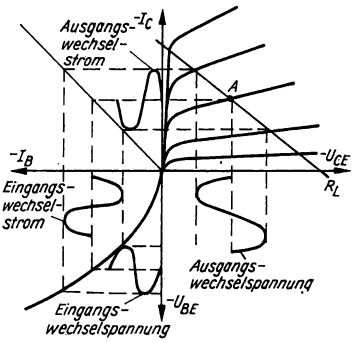


Bild 2.83. Verstärkerwirkung eines Transistors

Maß der Verzerrungen: Klirrfaktor (s. Bild 2.84; vgl. 6.1.2.2.).

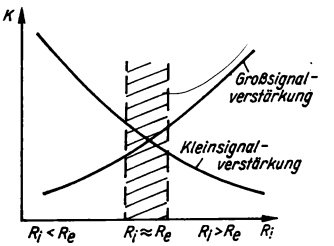


Bild 2.84. Klirrfaktor K als Funktion der Anpassung

Daraus folgt: Spannungssteuerung bei Großsignalbetrieb, Stromsteuerung bei Kleinsignalbetrieb.

RC-Kopplung von Transistoren (Bild 2.85)

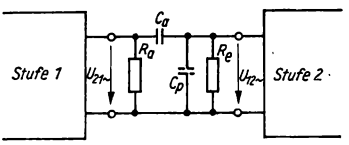


Bild 2.85. *RC*-Kopplung von Transistoren

Charakteristische Größen des Frequenzverhaltens: obere bzw. untere Grenzfrequenz, Bandbreite B (Bild 2.86)

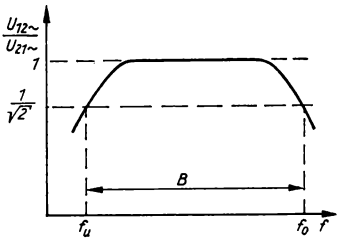


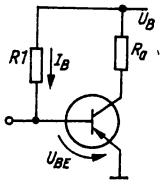
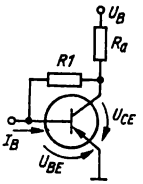
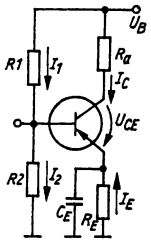
Bild 2.86. Frequenzgang von Verstärkern

$$f_u = \frac{1}{2\pi R_e C_a} \qquad f_o = \frac{1}{2\pi C_p R_a R_e/(R_a + R_e)}$$

Die untere Grenzfrequenz ist bei Einstellung des Arbeitspunktes nach Variante 3 (s. Tabelle 2.28) ebenfalls abhängig vom Emitterkondensator C_E. Zur Vernachlässigung von C_E gilt:

$$C_E \approx \frac{h_{21}}{2\pi f_u (R_g + h_{11})} \qquad R_g = R1 \,\|R2\|\, R_a$$

Tabelle 2.28: Arbeitspunkteinstellung

Begriff	Variante 1	Variante 2	Variante 3
			
Vorteile, Nachteile	Änderung des Arbeitspunktes mit Temperatur und Stromverstärkung, hoher Eingangswiderstand	Arbeitspunkt temperaturstabiler, Verringerung des Eingangswiderstandes durch Gegenkopplung	gute Arbeitspunktstabilität, häufigste Form der Arbeitspunkteinstellung
Berechnung	$R1 \approx \frac{U_B}{I_B}$	$R1 \approx \frac{U_{CE}}{I_B}$	$R1 = \frac{U_B - U_{BE} - (I_B + I_C) R_E}{I_B + I_1}$ $R2 = \frac{U_{BE} + (I_B + I_C) R_E}{I_1}$ $I_1 \approx (2 \cdots 5)\, I_B$ $R_{E\,max} = \frac{U_B - I_C R_a - U_{CE}}{I_B + I_C}$

Berechnungsbeispiel zu Variante 3:

Gegeben: $U_B = -9$ V; $R_a = 2{,}2$ kΩ; $U_{CE} = -4$ V; $R_E = 470\,\Omega$

$$I_C \approx \frac{U_B - U_{CE}}{R_a + R_E} = -1{,}87\text{ mA}$$

aus Kennlinien $I_B = -60\,\mu$A; $U_{BE} = -140$ mV

$I_1 \approx 3 I_B = -180\,\mu$A

$$R2 = \frac{U_{BE} + (I_B + I_C) R_E}{I_1} = 5{,}6\text{ kΩ}$$

$$R1 = \frac{U_B - U_{BE} - (I_B + I_C) R_E}{I_B + I_1} = 33\text{ kΩ}$$

Schaltverhalten von Transistoren

Ausgeschaltet: $I_B = 0$ Arbeitspunkt $A1$,
eingeschaltet: Arbeitspunkt $A2$ bestimmt durch Kollektor-Emitter-Restspannung (Bild 2.87).

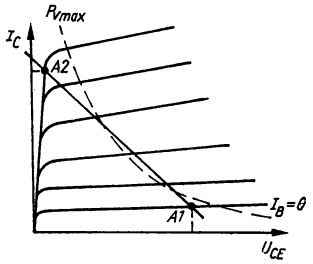


Bild 2.87. Arbeitspunkte des Transistors im Schaltbild

Im Schaltbetrieb kann die Verlustleistungshyperbel geschnitten werden.
Bei kapazitiver bzw. induktiver Last treten Strom- bzw. Spannungsspitzen auf (Bilder 2.88 und 2.89).

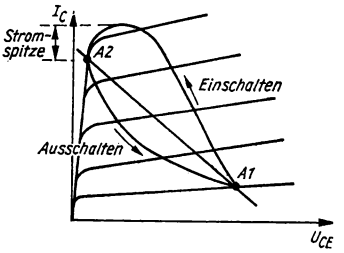


Bild 2.88. Strom-Spannungs-Verlauf bei kapazitiver Last

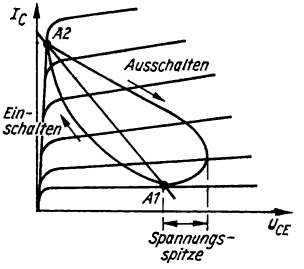


Bild 2.89. Strom-Spannungs-Verlauf bei induktiver Last

Differenzverstärker mit Transistoren

In Tabelle 2.29 sind Angaben über Differenzverstärker zusammengestellt (s. S. 168/169).

2.3.1.4. Kühlung von Transistoren

Entsprechend der im Transistor auftretenden Verlustleistung ist eine Wärmeabfuhr durch Kühlkörper, Kühlbleche oder -schellen vorzunehmen.
Thermisches Ersatzschaltbild s. Bild 2.90.

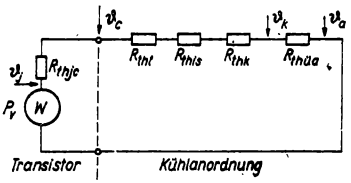


Bild 2.90. Thermisches Ersatzschaltbild eines Transistors

R_{tht}	Wärmeübergangswiderstand Gehäuse/Kühlvorrichtung
R_{this}	Wärmewiderstand der Isolierzwischenlage
R_{thk}	innerer Wärmewiderstand der Kühleinrichtung
$R_{thüa}$	Wärmeabführungswiderstand Kühlvorrichtung/Umgebung
R_{thjc}	innerer Wärmewiderstand des Transistors
R_{thjka}	Gesamtwärmewiderstand der Kühlvorrichtung

Ideale Kühlbedingungen:

$R_{tht} + R_{this} + R_{thk} + R_{thüa} = 0 = R_{thjka}$

Bei $R_{thjc} \gg R_{thjka}$ ist weitere Kühlung wenig sinnvoll.
Richtwerte sind in den Tabellen 2.30···2.36 zusammengestellt.

Tabelle 2.30: Richtwerte innerer Wärmewiderstände

Bauform	R_{thjc} K/W
Leistungstransistoren in Metallgehäuse	0,5···6
Plastgehäuse (ähnlich SOT 23)	5···10
TO 5-, TO 39-Gehäuse	20···60

Tabelle 2.31: Richtwerte für Wärmeübergangswiderstände

Montagebedingung	R_{tht} K/W
Kühlvorrichtung, eloxiert	0,7
Kühlvorrichtung, unbearbeitet	0,5
Kühlvorrichtung, eloxiert, mit Silikonfett	0,3
Kühlvorrichtung, blank, mit Silikonfett	0,2

Tabelle 2.32: Richtwerte des Wärmewiderstandes von Isolierstoffen

Isolierzwischenlage/Dicke	R_{this} K/W
Glimmerscheibe 50 µm	1,2
Glimmerscheibe 100 µm	1,4
Hartpapierscheibe 100 µm	1,0
Glimmerscheibe, beiderseits Silikonfett	0,6

Wärmeleitwiderstand: $R_{thk} = \frac{l}{\lambda A}$

l Länge, A Querschnitt, λ Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 2.33: Wärmeleitfähigkeit einiger Materialien

Material	λ mW/(K · cm)
Kupfer	3900
Aluminium	2200
Messing	950
Eisen	700
Stahl	460
Keramik	≈ 12
Kunststoff	≈ 7
Luft	0,256

Dimensionierungsvorschrift: $R_{thk} \ll R_{thüa}$
Der Wärmeabführungswiderstand $R_{thüa}$ ist abhängig von
- Art der Oberfläche,
- Geometrie der Oberfläche,
- Umgebungsbedingungen.

Wärmeabgabe durch:
- Wärmeleitung,
- Wärmestrahlung,
- Konvektion.

Wärmestrahlung: $P_S = \varepsilon\sigma_0 A(T_K^4 - T_a^4)$

ε Absorptionskoeffizient, A Oberfläche, σ_0 Strahlungskonstante [$5{,}68 \cdot 10^{-12}$ W/(cm² K⁴)]

Tabelle 2.34: Absorptionskoeffizienten einiger Materialien

Material	
Kupfer, poliert	0,05
Kupfer, oxydiert	0,64
Aluminium, poliert	0,04
Aluminium, unbearbeitet	0,08
Aluminium, anodisiert	0,7···0,8
Lackschichten	0,8···0,9

$R_{thüa} + R_{thk} = R_{thka}$ (Wärmewiderstand der Kühlfläche)

Tabelle 2.35: Richtwerte des Wärmewiderstandes von Kühlflächen (normiert auf 7,0 K/W))*

Oberfläche	Relativer Wärmewiderstand R_{thka}
Unbearbeitet	1,0
Unbearbeitet mit Silikonfett	0,95
Gebeizt	1,03
Eloxiert, farblos	0,8
Eloxiert, schwarz eingefärbt	0,77
Eloxiert, gelb	0,79
Lackiert, Nitrolack farblos	0,77
Lackiert, Nitrolack schwarz	0,72
Lackiert, Alkydvorstreichfarbe weiß	0,76
Lackiert, PUR-Klarlack	0,79

*) Aluminiumkühlfläche, $A = 100$ cm², $d = 2$ mm

R_{thka} näherungsweise für Kühlbleche:

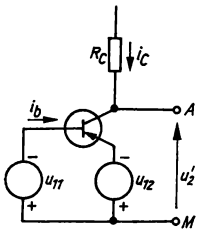
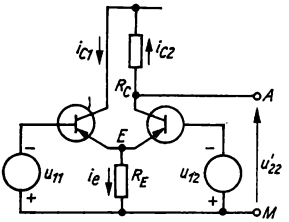
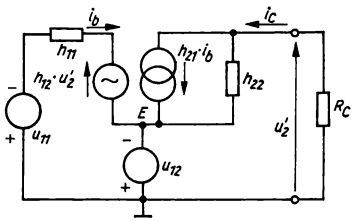
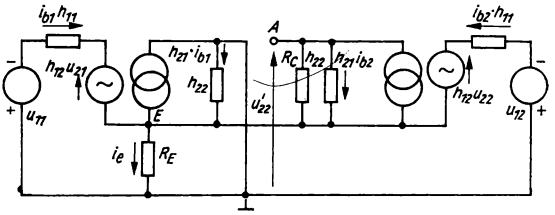
$$R_{thka} \approx 3{,}3 \sqrt{\frac{\sqrt{C}}{\lambda d}} + \frac{650}{A} C$$

d Blechdicke in mm, C Konstante

Tabelle 2.36: Charakteristische Werte für C

Oberfläche	Kühlblech	
	horizontal	vertikal
Blank	1	0,85
Anodisiert, lackiert	0,5	0,43

Tabelle 2.29: Differenzverstärker mit Transistoren

Begriff	Einfacher Differenzverstärker	Emittergekoppelter Differenzverstärker
Schaltung		
Ersatzschaltbild		
Ersatzspannung	$u_a' \approx -(u_{11} - u_{12}) \frac{h_{21}}{h_{11}} R_C$	$u_a' \approx (u_{11} - u_{12}) \frac{h_{21} R_C}{h_{11} + R_E h_{21}}$
Ersatz-innenwiderstand	$r_a' \approx R_C \parallel \frac{1}{h_{22}}$	$r_a' \approx \frac{R_C + 2R_E R_C h_{22}}{1 + (2R_E + R_C) h_{22} + R_E R_C h_{22}^2}$

Berechnungsbeispiel einer Kühlfläche:

Gegeben: zulässige Verlustleistung $P_v = 2{,}5$ W, zugelassene Umgebungstemperatur $\vartheta_a = 45\,°C$, maximale Sperrschichttemperatur $\vartheta_{j\,max} = 85\,°C$, innerer Wärmewiderstand $R_{thjc} = 0{,}5$ K/W, Isolation Glimmerscheibe 50 µm dick, quadratische Kühlfläche Aluminium 2 mm dick, blanke Oberfläche, vertikale Montage

$$R_{thjc} = \frac{\vartheta_{j\,max} - \vartheta_a}{P_v} = 16\,\text{K/W} = R_{thjc} + R_{tht} + R_{thls} + R_{thka}$$

$R_{thls} = 1{,}2$ K/W (s. Tabelle 2.32)
$R_{thka} = R_{thjka} - R_{thjc} - R_{thls} - R_{tht} = 6{,}8$ K/W

Aus der Gleichung für R_{thka} und Tabelle 2.36 folgt: $A = 105\,\text{cm}^2$

Bild 2.91 zeigt die Abhängigkeit der Verlustleistung eines Ge-Transistors von der Umgebungstemperatur.

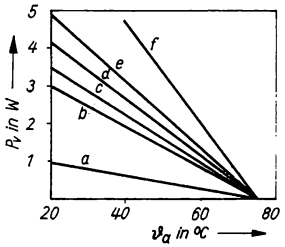


Bild 2.91. Abhängigkeit der Verlustleistung eines 4-W-Ge-Transistors von der Umgebungstemperatur
a ohne Kühlfläche, b $A = 50\,\text{cm}^2$, isolierte Montage,
c $A = 50\,\text{cm}^2$, d $A = 200\,\text{cm}^2$, isolierte Montage,
e $A = 200\,\text{cm}^2$, f ideale Kühlung Alu 2 mm, blank, vertikal,
Isolierung: Hartpapier 100 µm

2.3.2. Unipolare Transistoren

2.3.2.1. Grundlagen

Bei den unipolaren Transistoren werden durch Feldeffekte in dem stromführenden Kanal Leitfähigkeitsänderungen hervorgerufen. Die Feldstärke wird durch eine isoliert über dem Kanal befindliche und an Spannung liegende Steuerelektrode erzeugt (Feldeffekttransistoren mit isolierter Steuerelektrode IGFET). Zur Gruppe der IGFET gehören die Metall-Isolator-Halbleiter-FET (MISFET) und die Dünnfilmtransistoren TFT.
Am häufigsten zur Anwendung gelangen aus der Gruppe der MISFET die Metalloxid-Halbleiter-FET (MOSFET).
Die Elektroden der FET werden mit Drain D, Source S und Gate G bezeichnet.

Source (Quelle): Kanalanschluß, von dem die Ladungsträger in den Kanal gelangen;

Drain (Abfluß): Kanalanschluß, an dem die Ladungsträger den Kanal verlassen;

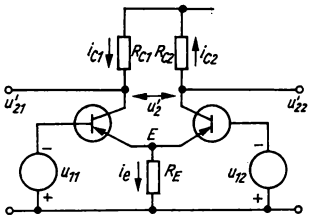
Gate (Tor): Steuerelektrode für den Ladungstransport im Kanal
Bulk B (Substrat): meist mit der Sourceelektrode verbunden.

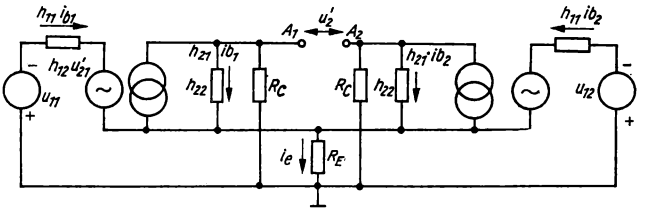
Begriffe, Formel- und Kurzzeichen

U_P, U_T	Abschnür- bzw. Schwellenspannung
G	Gate (Steuerelektrode)
B	Bulk (Substrat)
S	Source (Quelle)
D	Drain (Abfluß)
MOS	metal-oxide-semiconductor

Einteilung und Symbole der Feldeffekttransistoren enthält Tabelle 2.37, Bild 2.92 die Kennlinie eines n-Kanal-Transistors.

Emittergekoppelter Gegentakt-Differenzverstärker

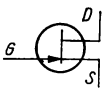
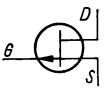
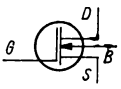
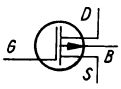
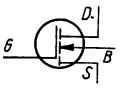
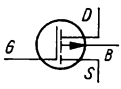
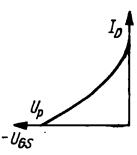
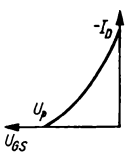
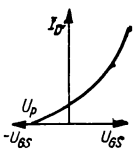
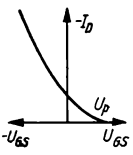
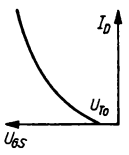
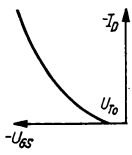
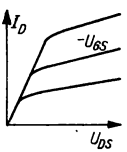
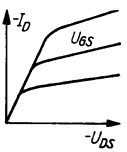
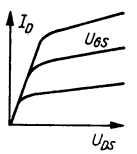
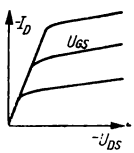
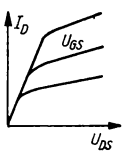
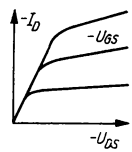




$$R_{C1} = R_{C2} = R_C\text{:}\quad u_a' \approx (u_{11} - u_{12})\,\frac{h_{21}}{2h_{11}}\,R_C$$

$$r_a' \approx \frac{2R_C(1 + h_{22}R_C + h_{22}R_E) + 4h_{22}R_CR_E^2}{(R_E + R_ER_Ch_{22})(1 + R_Ch_{22}) + R_Eh_{22}}$$

Tabelle 2.37: Typen von Feldeffekttransistoren

	Sperrschicht-FET		MOSFET-Verarmungstyp (depletion)		MOSFET-Anreicherungstyp (enhacement)	
	n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal
Symbol						
Kennlinienfelder						
						

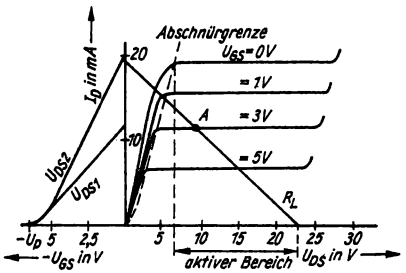


Bild 2.92. Kennlinienfelder eines Sperrschicht-FET

Ersatzschaltbilder

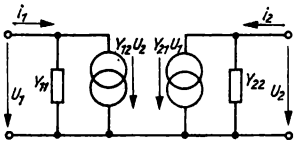


Bild 2.93. y-Ersatzschaltbild eines FET
$i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2$
$i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2$

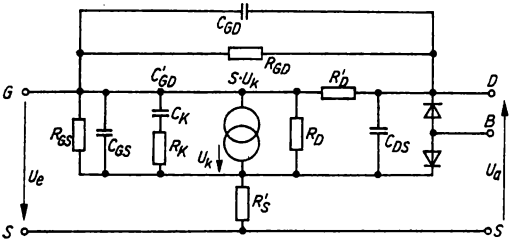


Bild 2.94. Vollständiges Ersatzschaltbild eines FET
Index K: Kanal-

Richtwerte zu Bild 2.94:

R_{GS}	Eingangswiderstand $10^{15}\,\Omega$
C_{GS}	Eingangskapazität 5 pF
C_K	Kanalkapazität 4 pF
R_K	Kanalwiderstand 100 Ω
C'_{GD}	dynamische Längskapazität 0,05···0,5 pF
C_{GD}	Rückwirkungskapazität 0,1 pF
$S \cdot U_K$	Stromgenerator 5 mA
R_{GD}	Rückwirkungswiderstand $2 \cdot 10^6\,\Omega$
R_S'	Sourcewiderstand 1 Ω
R_D	wirksamer Ausgangswiderstand 10 kΩ
R_D'	unmodulierbarer Drainwiderstand 300 Ω
C_{DS}	Ausgangskapazität 2 pF

Kenngrößen

Steilheit $S = \sqrt{2I_D\beta} \approx \beta U_{DS}$
β dynamische Stromverstärkung
Frequenzgang $VB = \dfrac{S}{2\pi C_{GS}}$
V Verstärkung, B Bandbreite

Relative Änderungen einiger Kenngrößen mit der Steuerspannung s. Bild 2.95.
Richtwerte des Eingangswiderstandes:
bei Gleichstrom $R_e > 10^{12}\,\Omega$
bei Wechselstrom $R_e \approx 10\,\text{k}\Omega$ (200 MHz)

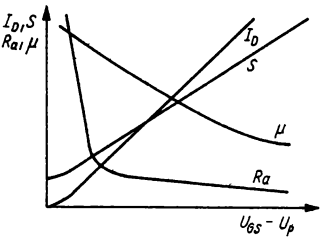
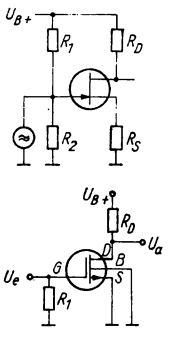
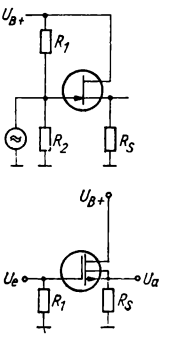
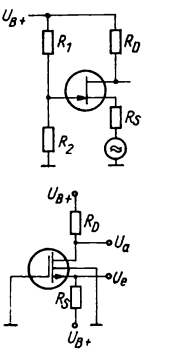


Bild 2.95. Änderung der Kenngrößen von FETs mit der Steuerspannung
μ Verstärkungsfaktor

2.3.2.2. Schaltungstechnik

Tabelle 2.38 enthält Grundschaltungen von FET-Transistoren.

Tabelle 2.38: Grundschaltungen von FET-Transistoren

Bezeichnung	Sourceschaltung	Drainschaltung	Gateschaltung
Schaltung			
Verstärkung V_U	$\approx \dfrac{R_D}{1/g_m + R_S}$	$\approx \dfrac{R_S}{1/g_m + R_S}$	$\approx \dfrac{R_D}{1/g_m + R_S}$
Eingangswiderstand R_e	$\approx R1 \parallel R2$	$\approx R1 \parallel R2$	$\approx R_S + \dfrac{1}{g_m}$
Ausgangswiderstand R_a	$\approx R_D$	$\approx R_S \parallel \dfrac{1}{g_m}$	$\approx R_D$
Phasendrehung	180°	0°	0°

Eine typische Kennlinie mit Lastgeraden zeigt Bild 2.92. Die Bestimmung der Lage der Lastgeraden erfolgt nach 2.3.1.3. Die Erzeugung der erforderlichen Gatevorspannung $-U_{GS}$ ist aus Bild 2.96 ersichtlich.

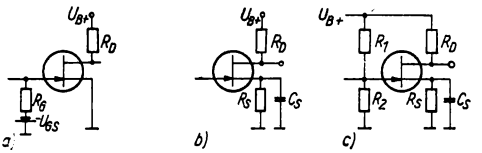


Bild 2.96. Gatevorspannungserzeugung
a) separate Vorspannungsquelle, b) durch Sourcewiderstand, c) durch Gatespannungsteiler mit Sourcewiderstand

2.4. Elektronen- und Ionenröhren

2.4.1. Stromleitung in Gasen und im Vakuum

Unter normalen Druck- und Temperaturbedingungen sind Gase Nichtleiter. Bei extrem hohen Temperaturen unter Einfluß hoher elektrischer Feldstärken oder bei vermindertem oder erhöhtem Druck können sie jedoch gute bis sehr gute Leitfähigkeit erreichen (Tabelle 2.39).

Elektronenröhren: Stromleitung bei sehr geringem Druck. Sie lassen sich entsprechend ihrem Anwendungsgebiet einteilen in:

- Empfängerröhren,
- Senderöhren,
- Elektronenstrahlröhren,
- Höchstfrequenzröhren.

Ionenröhren: Stromleitung durch Stoßionisation mit Glimmentladung.

Tabelle 2.40: Typenschlüssel von Empfängerröhren

	1. Buchstabe Heizung	2. Buchstabe und weitere		
		Elektrodenzahl	Bezeichnung	Anwendung
A	4,0 V Parallelheizung	2	Diode	HF-Gleichrichtung
B	–	3	Duodiode mit gemeinsamer Katode	HF-Gleichrichtung, Regelspannungserzeugung
C	–	3	Triode	Universalverstärker
D	1,4 V Batterieheizung	3	Endtriode	Batterieendverstärker
E	6,3 V Parallelheizung	4	Tetrode	NF-Verstärker
F	–	5	Pentode	HF-, NF-Vorverstärker
H	–	6,7	Hexode, Heptode	Mischröhre, HF-Verstärker
L	–	4,5	Endtetrode, Endpentode	Leistungsverstärker
M	–		Anzeigeröhre	Abstimmanzeige
P	300 mA Serienheizung		–	–
U	100 mA Serienheizung		–	–
Y	–	2	Diode	Einwegnetzgleichrichter
Z	–	3	Duodiode mit gemeinsamer Katode	Zweiwegnetzgleichrichter

Elektrodenzahl: Summe von Katoden-, Anoden- und Gitteranzahl

Tabelle 2.39: Stromleitung

Normaler und erhöhter Druck	Verminderter Druck		Vakuum
$p \geq 0{,}1$ MPa ($\approx$ 760 Torr)	$p = 0{,}01 \cdots 1$ kPa ($\approx 0{,}1 \cdots 10$ Torr)		$p \leq 0{,}1$ Pa ($\approx 10^{-3}$ Torr)
Schaltfunken, Lichtbogen, Spannungsüberschläge, Blitze, Plasmabildung	*unselbständige Entladung:* geringer Elektronen- und Ionenstrom durch Fremdionisation von Gasatomen, z. B. durch Strahlung	*selbständige Entladung* (Stoßionisation): 1. Glimmentladung (Elektronen-, Ionenleitung); 2. Bogenentladung (bei extremen Temperatur- und Druckwerten Plasma)	Elektronenleitung der von der Katode emittierten Elektronen zur Anode

2.4.2. Elektronenröhren (Empfängerröhren)

2.4.2.1. Grundlagen

Aufbau der Elektronenröhre: In einem evakuierten Röhrenkolben (meist Glas) werden von einer aufgeheizten Katode Elektronen emittiert. Der Elektronenstrom zur Gegenelektrode (Anode) wird von dazwischenliegenden Elektroden (Gittern) beeinflußt. Kennzeichnung des Röhrentyps nach Anzahl der Elektroden und notwendiger Heizspannung und notwendigem Heizstrom (Tabelle 2.40).

Gitterelektroden (Bild 2.97)

Steuergitter g_1: durch Anlegen einer Wechselspannung Steuerung des Anodenstromes;
Schirmgitter g_2: durch wechselstrommäßige Erdung Abschirmung des Anoden-Steuergitterraumes, dadurch Verringerung der Gitter-Anodenkapazität und Erhöhung der Verstärkung, Gleichstrompotential $\approx$ 1/3 der Anodenspannung zur verstärkten »Absaugung« von Elektronen aus dem Katodenraum;
Bremsgitter g_3: durch Massepotential Verhinderung der Rückkehr von Sekundärelektronen aus der Anode zum Steuergitter.
Grundschaltung einer Elektronenröhre s. Bild 2.98.

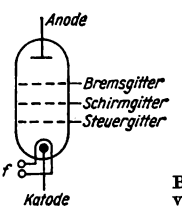


Bild 2.97. Elektrodenaufbau von Elektronenröhren

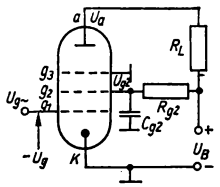


Bild 2.98. Grundschaltung einer Elektronenröhre

2.4.2.2. Kennlinien, Ersatzschaltbilder, Kenngrößen

Kennlinienfelder einer Triode s. Bild 2.99.

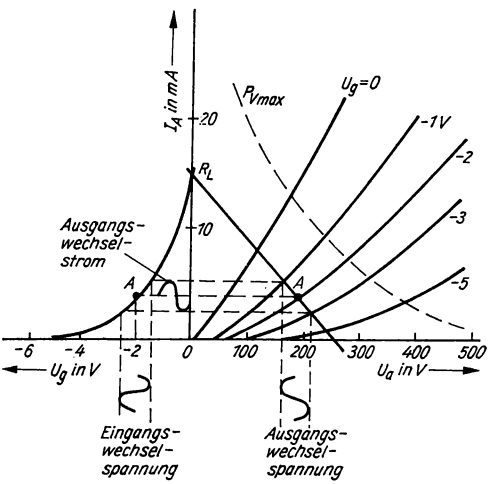


Bild 2.99. Kennlinienfelder einer Triode

Die Lage der Widerstandsgeraden folgt aus:

Schnittpunkt mit U_a-Achse: $U_a = U_B$ (Betriebsspannung) $I_a = 0$
Schnittpunkt mit I_a-Achse: $I_a = \frac{U_B}{R_L}$ $U_a = 0$

Wahl des Arbeitspunktes A (U_g-Parameter) auf der Widerstandsgeraden nach Größe der zu verstärkenden Eingangswechselspannung.

Kenngrößen von Verstärkerröhren (Katalogwerte)

Steilheit S: Änderung des Anodenstromes mit der Änderung der Steuergitterspannung bei konstanter Anodenspannung

$$S = \frac{dI_a}{dU_g} \quad (U_a = \text{konst.})$$

Innenwiderstand R_i*:* Änderung der Anodenspannung mit der Änderung des Anodenstromes bei konstanter Steuergitterspannung

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} \quad (U_g = \text{konst.})$$

Durchgriff D: Änderung der Anodenspannung mit der Änderung der Steuergitterspannung bei konstantem Anodenstrom

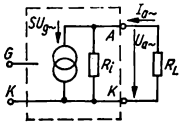
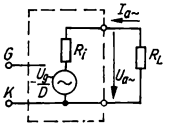
$$D = \frac{dU_a}{dU_g} \quad (I_a = \text{konst.})$$

Verstärkungsfaktor μ*:* Kehrwert des Durchgriffs

$$\mu \approx \frac{1}{D} = SR_i$$

Dabei gilt: $SDR_i = 1$ (BARKHAUSEN-Gleichung).
Berechnung der Betriebsdaten und Ersatzschaltbilder s. Tabelle 2.41.

Tabelle 2.41: Ersatzschaltbilder von Verstärkerröhren

Größe	Stromquellen-ersatzschaltung	Spannungsquellen-ersatzschaltung
		
R_i	$= \frac{1}{SD}$	$= \frac{1}{SD}$
$I_{a\sim}$	$= SU_{g\sim} \frac{R_i}{R_i + R_L}$	$= \frac{U_{g\sim}}{D} \frac{1}{R_i + R_L}$
$U_{a\sim}$	$= -SU_{g\sim} \frac{R_i R_L}{R_i + R_L}$	$= -\frac{U_{g\sim}}{D} \frac{R_L}{R_i + R_L}$
S_d	$= S \frac{1}{1 + (R_L/R_i)}$	
V_U	$= -SR_i \frac{1}{1 + (R_i/R_L)}$	

S_d dynamische Steilheit

2.4.2.3. Schaltungstechnik

Gitterableitwiderstand: in Katalogen vorgegebener Widerstandswert zur Ableitung von Elektronen aus dem Katodenstrom;
Gittervorspannung: zur Festlegung des Arbeitspunktes notwendige Gleichspannung am Steuergitter; Erzeugung der Gittervorspannung s. Bild 2.100.
Einteilung von Leistungsverstärkern nach Lage des Arbeitspunktes s. Tabelle 2.42.
Ausgewählte Schaltungsvarianten s. Tabelle 2.43.

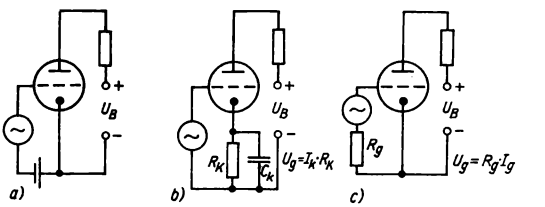
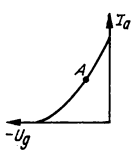
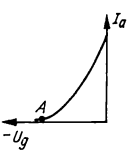
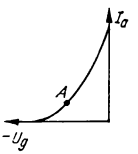


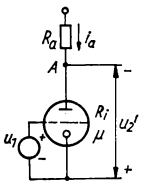
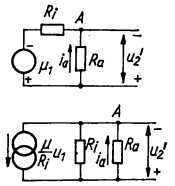
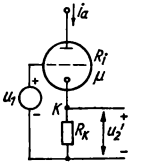
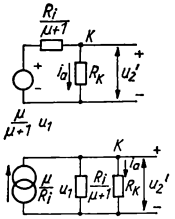
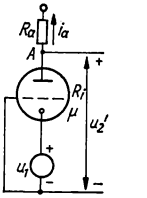
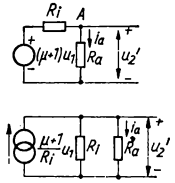
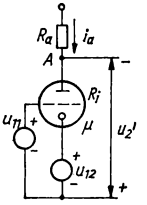
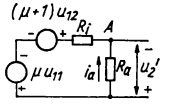
Bild 2.100. Vorspannungserzeugung
a) durch separate Spannungsquelle; b) durch Katodenwiderstand, C_K wechselstrommäßiger Kurzschluß des Katodenwiderstandes; c) durch Gitteranlaufstrom (bei Vorstufen)

Tabelle 2.42: Leistungsverstärker

Größe	A-Verstärker	B-Verstärker	AB-Verstärker
Lage des Arbeitspunktes			
η	max. 50%	max. 78,5%	max. 50 bis 78,5%
$P_{a\,max}$	$0{,}5P_{v\,max}$	$4{,}93P_{v\,max}$	$3{,}38P_{v\,max}$
I_a	0	1:4 im Mittel	1:1,15 im Mittel

η Wirkungsgrad, $P_{a\,max}$ maximal am Lastwiderstand auftretende Leistung, $P_{v\,max}$ maximal zulässige Verlustleistung der Röhre (Katalogwert), I_a Anodenstrommittelwertänderung zwischen 0 und Vollaussteuerung.

Tabelle 2.43: Schaltungen mit Elektronenröhren

Schaltung	Prinzipschaltbild	Ersatzschaltbilder	Ersatzspannung u_2'	Ersatzinnenwiderstand R_i'
Katodenbasisverstärker			$u_2' = -\mu u_1 \frac{R_a}{R_a + R_i}$	$R_i' = \frac{R_i R_a}{R_i + R_a}$
Anodenbasisverstärker			$u_2' = \frac{\mu}{\mu + 1} u_1 \frac{R_K(\mu + 1)}{R_K(\mu + 1) + R_i}$	$R_i' = \frac{R_i R_K}{R_i + R_K(\mu + 1)}$
Gitterbasisverstärker			$u_2' = (\mu + 1) u_1 \frac{R_a}{R_a + R_i}$	$R_i' = \frac{R_i R_a}{R_i + R_a}$
Einfacher Differenzverstärker			$u_2' = -[\mu u_{11} - (\mu + 1) u_{12}] \frac{R_a}{R_a + R_i}$	$R_i' = \frac{R_i R_a}{R_i + R_a}$

2.4.3. Elektronenröhren (Spezialröhren)

2.4.3.1. Bildwiedergaberöhren

Bildwiedergaberöhren sind Elektronenstrahlröhren, die in einem evakuierten Glaskolben Strahlsystem und Bildschirm, in einigen Fällen auch das Ablenksystem enthalten.
Die Bündelung des Elektronenstrahls erfolgt durch elektronenoptische Anordnung (statische, magnetische Fokussierung).
Sie haben fast trägheits- und leistungslose Ablenkung durch elektrostatische oder elektromagnetische Felder.

Elektrostatische Ablenkung: zwei zueinander senkrechte, hintereinander angeordnete Kondensatorenplatten; katodennahes Plattenpaar — Signalspannung; schirmnahes Plattenpaar — Kippspannung/Zeitablenkung (vorwiegend bei Oszillografenröhren).

Elektromagnetische Ablenkung: Strahlablenkung durch Ablenkspulen (vorwiegend bei Bildröhren).
Elektrodenanordnung von Oszillografen- und Bildröhren s. Bild 2.101. Tabelle 2.44 enthält den Typenschlüssel von Bildwiedergaberöhren.

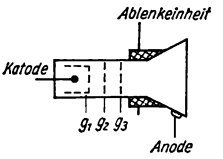


Bild 2.101. Elektrodenanordnung bei Bildwiedergaberöhren; g_1 Steuergitter/Wehneltzylinder

Tabelle 2.44: Typenschlüssel von Bildwiedergaberöhren

1. Buchstabe	1. Zahl	2. Buchstabe	2. Zahl	3. Buchstabe
B Bildschirmröhre	größter Schirmdurchmesser in cm	M magnetisch fokussiert und abgelenkt G statisch fokussiert, magnetisch abgelenkt S statisch fokussiert und abgelenkt P Polarkoordinatenröhre	laufende Nummer (bei Zweistrahlröhren Vorsatz einer 2)	Leuchtstoff (s. Tabelle 2.45)

Tabelle 2.45: Leuchtstoffkennzeichnung (nach Tabelle 2.44)

Schirmbezeichnung	A	G	N	L	DN
Fluoreszenz	grün	grün	grünblau	orange	blau
Phosphoreszenz	grün	—	grün	orange	gelbgrün
Nachleuchtdauer	mittel	kurz	mittel	sehr lang	lang

2.4.3.2. Mikrowellenröhren

Einteilung von Mikrowellenröhren s. Bild 2.102.

Dichtegesteuerte Röhren: Der Elektronenstrom wird durch ein elektrostatisches Feld (Steuergitter) gesteuert. Anwendung bis einige GHz; Leistung maximal 100 W; Richtabmessungen: Länge ≈ 70 mm, Durchmesser ≈ 30 mm.

Laufzeitröhren: Ein zunächst kontinuierlicher Elektronenstrom wird längs seines Weges einem steuernden elektrischen Feld dergestalt ausgesetzt, daß die Elektronen je nach Schwingungsrichtung des Feldes entweder beschleunigt oder verzögert werden. Dadurch erfährt der Elektronenstrahl eine Geschwindigkeitsmodulation (Dichtemodulation). Die Frequenzinformation dieses pulsierenden Gleichstroms kann am Ende des Laufweges wiedergewonnen werden.

1. *Triftröhren* (Klystrons): Prinzipaufbau s. Bild 2.103. Die Schwingkreise bestehen aus den Hohlraumresonatoren Kreis 1, Kreis 2 mit den Kreiskapazitäten der Resonatorspalten 1 und 2. Der Elektronenstrahl wird im Resonatorspalt 1 dichtemodu-

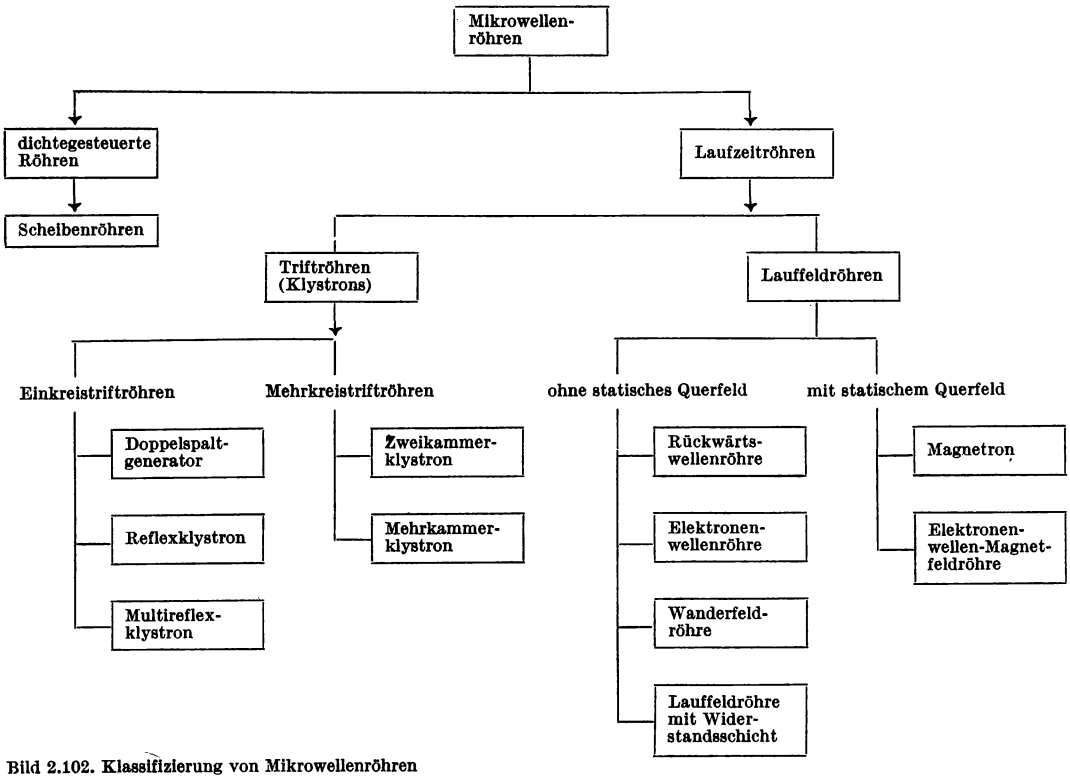


Bild 2.102. Klassifizierung von Mikrowellenröhren

lert und gelangt in den feldfreien Laufraum. Beim Durchlaufen des Resonatorspaltes 2 wird die Energie wieder abgegeben (Auskopplung im Kreis 2).
Anwendung bei Frequenzen > 2 GHz.

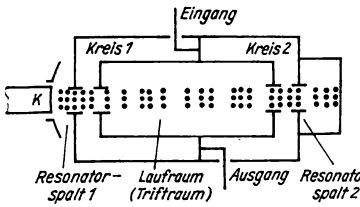


Bild 2.103. Aufbau von Triftröhren

2. *Lauffeldröhren:* Prinzipaufbau s. Bild 2.104. Der Elektronenstrahl tritt in Wechselwirkung mit einem sich in gleicher Richtung ausbreitenden elektromagnetischen Feld. Elektronen und Feld müssen annähernd gleiche Geschwindigkeit haben (ohne statisches Querfeld).

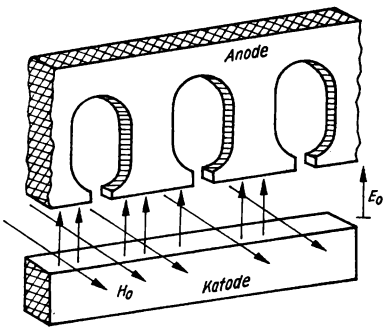


Bild 2.104. Aufbau von Lauffeldröhren

Elektronen können zusätzlich von einem dazu senkrecht stehenden elektrischen Feld gesteuert werden (gekreuzte statische Felder); Auskopplung durch eine Koaxialleitung im Innern des Hohlleiters. Bild 2.105 zeigt den Aufbau eines *Vielkreismagnetrons* mit Signalausgang. Anwendung: Magnetrons als Oszillatoren im GHz-Bereich bei großen Leistungen (z. B. YJ 1230 Impulsleistungen von 12000 kW bei 5 µs); *Wanderfeldröhre* als Verstärker zwischen 1 und 12 GHz bei Leistungen unter 1 kW, Wirkungsgrad bis 50%.

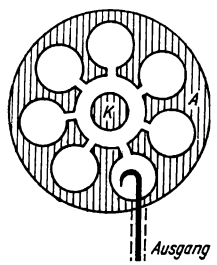


Bild 2.105. Vielkreismagnetron

2.4.4. Ionenröhren (Gasentladungsröhren)

2.4.4.1. Grundlagen

Elektronen werden durch angelegte Gleichspannung beschleunigt und stoßen auf ihrem Wege mit Gasmolekülen zusammen. Kinetische Energie wird dabei in Licht (Glimmentladung) umgewandelt oder führt zur Ionisation des Gasmoleküls. Lawinenartiges Anwachsen der Anzahl der Ladungsträger wird durch Vorwiderstand (Strombegrenzung) verhindert.
Strom-Spannungs-Verlauf einer Gasentladungsröhre s. Bild 2.106.

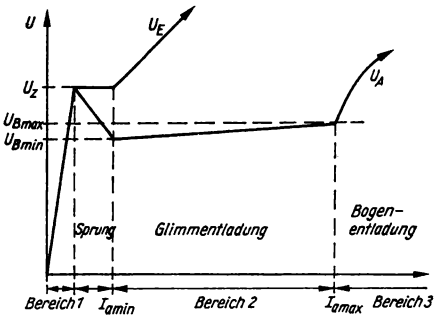


Bild 2.106. Strom-Spannungs-Kennlinien von Ionenröhren

Bereich 1: unselbständige Entladung; geringes lineares Anwachsen des Reststromes mit der angelegten Spannung U_E, Sprung: Beginn der *Stoßionisation* bei Erreichen der Zündspannung; Verringerung des Spannungsabfalls über der Röhre auf die Brennspannung U_B,

Bereich 2: selbständige *Glimmentladung;* starkes Anwachsen des Stromes bei nur geringfügiger Änderung des Spannungsabfalls über der Röhre (Spannungsstabilisierung),

Bereich 3: *Bogenentladung;* weitere Erhöhung der Stromdichte durch die angelegte Spannung U_E führt zur Zerstörung der Röhre.
Meßanordnung s. Bild 2.107.

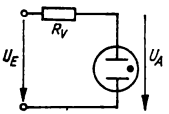


Bild 2.107. Meßanordnung zur Bestimmung der Strom-Spannungs-Abhängigkeit

Kennwerte

Zündspannung U_Z: Einsetzen der Stoßionisation

Brennspannung U_B: sich nach der Glimmentladung einstellender Spannungsabfall über der Röhre

Löschspannung U_L: unterschreitet die angelegte Spannung diesen Wert, erlischt die Glimmentladung

Maximaler Katodenstrom I_{kS}: maximal zulässiger Strom durch die Röhre

Tabelle 2.46 enthält die Einteilung von Gasentladungsröhren, Tabelle 2.47 Eigenschaften von Kaltkatodenröhren.

Tabelle 2.46: Einteilung von Gasentladungsröhren

Katodentyp	Beispiele
Kaltkatode (nicht geheizte Katode)	Zünddioden Glimmdioden Spannungsstabilisatoren Glimmlampen Anzeigeröhren Relaisröhren Leistungsschaltröhren Dekadenzählröhren
Glühkatode (geheizte Katode, direkt oder indirekt)	Gleichrichterröhren Thyratronröhren

Tabelle 2.47: Eigenschaften von Kaltkatodenröhren (Vergleich mit Glühkatodenröhren)

Vorteile	Nachteile
keine Heizleistung erforderlich — besserer Wirkungsgrad; ständige Betriebsbereitschaft; keine Ausfälle durch Heizfadenbruch; einfacher Aufbau und geringer Preis	relativ hohe Zündspannung zur Einleitung der Stoßionisation; geringer Emissionsstrom (zur Einleitung der selbständigen Entladung ausreichend); falsche Funktion bei Wechselspannungsbetrieb möglich (Anode kann Funktion der Katode übernehmen)

Schaltzeichen von Katoden s. Bild 2.108. Die Darstellung der Gasfüllung wird durch einen Punkt symbolisiert.

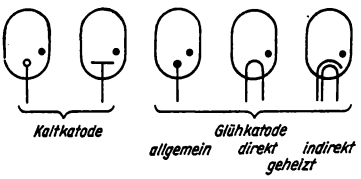


Bild 2.108. Schaltsymbole von Katoden

2.4.4.2. Glimmröhren

Glimmlampen: Ausnutzung der Lichterscheinung der Glimmentladung zur Signalisierung eines Schaltzustandes

Ziffernanzeigeröhren: Die Katoden sind in Form von Ziffern ausgebildet; bei Ansteuerung einer Katode Ausbildung der Glimmentladung (Katodenstrom ≈ 3 mA), s. Bild 2.109. Die Vorspannung U_V verhindert das Mitglimmen benachbarter Ziffern.

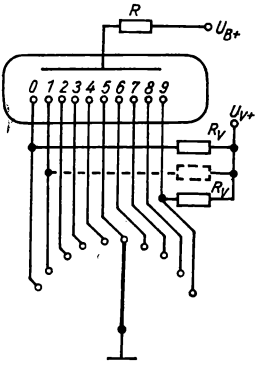


Bild 2.109. Prinzipschaltung von Ziffernanzeigeröhren

Ziffernzählröhren: Kreisförmig um die Anode angeordnete Haupt- und Hilfskatoden übergeben die Glimmentladung bei Eintreffen eines Impulses an die benachbarte Katode. (Vor-, Rückwärtszählung möglich).

Stabilisatorröhren: Ausnutzung der nahezu konstanten Brennspannung im Bereich der selbständigen Entladung (s. Bild 2.106); Genauigkeit $\pm 1{,}5 \cdots \pm 3\%$.

Kaltkatodenrelaisröhren: Eine oder mehrere Starterelektroden erleichtern das Einleiten der Stoßionisation; die Starterspannung ist nur wenig größer als Brennspannung; das Löschen erfolgt durch kurzzeitiges Unterschreiten der Löschspannung an der Anode (Bild 2.110).
Anwendung: in Zeitrelais; Symbol: s. Bild 2.111.
Tabelle 2.48 enthält den Typenschlüssel von Anzeige- und Zählröhren, Tabelle 2.49 den Typenschlüssel von Stabilisatorröhren.

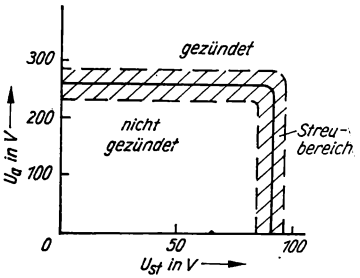


Bild 2.110. Ausgangsspannungs-Steuerspannungs-Abhängigkeit von Relaisröhren

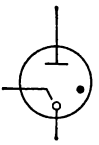
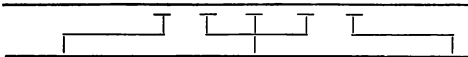


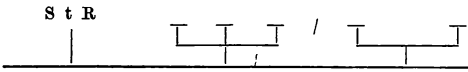
Bild 2.111. Schaltungssymbol von Relaisröhren

Tabelle 2.48: Typenschlüssel von Anzeige- und Zählröhren



1. Buchstabe	Zifferngruppe	2. Buchstabe
Z Kaltkatodenröhre	werksinterne Kennzeichnung	C Zählröhre M Anzeigeröhre S Relaisröhre

Tabelle 2.49: Typenschlüssel von Stabilisatorröhren



Stabilisatorröhre	Brennspannung U_B in V	Maximaler Querstrom $I_{q\,max}$ in mA

2.4.4.3. Stromrichter

Thyratron: gesteuerter Gleichrichter; Änderung der notwendigen Zündspannung durch Veränderung der Vorspannung an einem Steuergitter; Symbol: s. Bild 2.112, Kennlinienfeld: s. Bild 2.113. Steuerungsarten von Thyratrons enthält Tabelle 2.150.

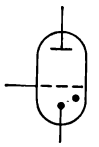


Bild 2.112. Schaltungssymbol von Thyratrons

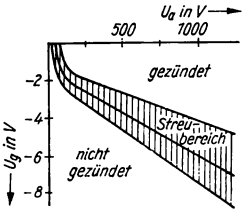
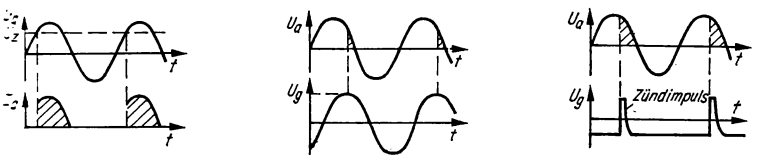


Bild 2.113. Zündkennlinie eines Thyratrons

Tabelle 2.50: Steuerungsarten von Thyratrons

Vertikalsteuerung	Horizontalsteuerung	Impulssteuerung
Durch Veränderung der Gittergleichspannung wird der Einsatzpunkt der Gleichrichtung verschoben; maximale Verschiebung 90°	Veränderung der Phasenlage der Gitterwechselspannung ergibt Verschiebung des Zündeinsatzes bis 180°	Positive Impulse am Steuergitter verschieben den Zündeinsatz bis 180°
Strom nicht auf 0 steuerbar	mittlerer Stromfluß bis 0 steuerbar	



Gleichrichterröhren: großflächige Katoden und Anoden bei unterschiedlichen Gasfüllungen; Fülldruck ≈ 0,01 kPa (≙ ≈ 0,1 Torr). Gleichrichterwirkung s. Bild 2.114, z. B. Quecksilberdampf-Stromrichterventil:

Quecksilberdampf-Stromrichterventile werden für mittlere und große Leistungen verwendet. Man unterscheidet folgende

Arten

1. *Glas-Stromrichter* mit 3 oder 6 Anodenarmen an dem birnenförmigen Kolben mit Luftkühlung, bei größeren Leistungen durch Ventilator. Auch als Wechselrichter und mit Steuergitter (Bild 2.115).

$U = 100\cdots600$ V; $I = 10\cdots500$ A.

2. *Pumpenlose Eisen-Stromrichter* mit 6 Anoden in vakuumdicht verschweißtem Eisengefäß mit Kühlrippen für Ventilatorkühlung. Auch als Wechsel- und Umrichter und mit Steuergitter.

U = bis 20 kV; $I = 300\cdots1500$ A.

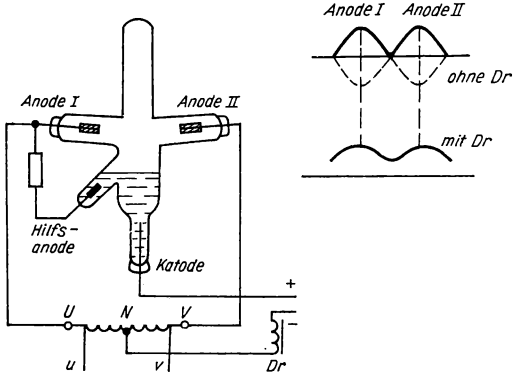


Bild 2.115. Quecksilberdampf-Glas-Gleichrichter

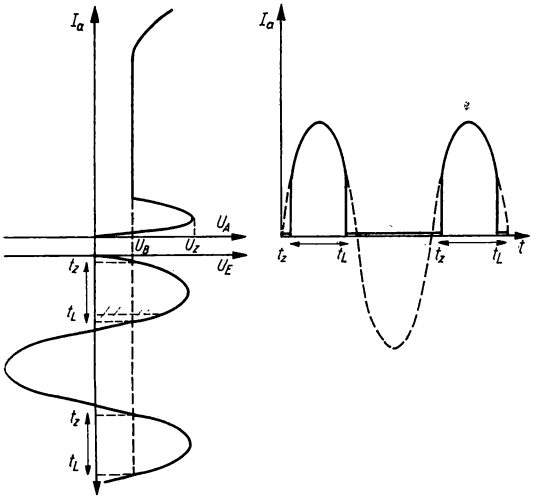


Bild 2.114. Gleichrichterwirkung einer Gleichrichterröhre

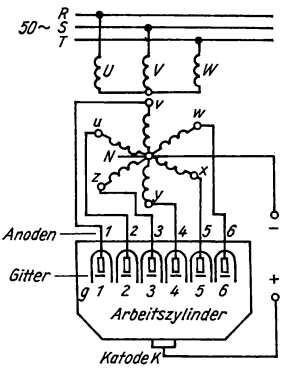


Bild 2.116. Quecksilberdampf-Groß-Gleichrichter

3. *Groß-Stromrichter* mit oder ohne Kühlwasserpumpe, bis 1800 A, mit 12- bis 24anodigen Stahlgefäßen. Hierfür werden jetzt Einanoden-Gefäße verwendet, wobei man (je nach Leistung) 6···24 Einzelgefäße zu je 500 A zu einem Block zusammenfaßt (Bild 2.116).

Aufbau der Quecksilberdampf-Stromrichterventile

Bei allen Ausführungen ist die aus Quecksilber bestehende *Katode* (unten) für alle *Anoden* eines Gefäßes (oben) gemeinsam. Bei Stahlgefäßen sind die aus Graphitzylindern bestehenden Anoden durch eine eingeschweißte Glasisolierung gegen das Gefäß isoliert. Die Anoden sind zur Vermeidung von Rückzündungen mit Schutzrohren umgeben, in denen sich auch die Steuergitter befinden. Die sehr hohe Luftleere wird bei Groß-Stromrichtern durch eine Luftpumpe ständig aufrechterhalten. Die Gittersteuerung dient in erster Linie zur Spannungseinstellung. Die *Zündung* erfolgt bei kleinen Glasgefäßen durch Kippen, wodurch eine kurzzeitige Strombrücke zwischen Hilfsanode und Katode entsteht, die den Lichtbogen einleitet. Bei mittleren Gefäßen verwendet man die Tauchzündung, bei der eine in das Katodenquecksilber eintauchende Nadel unter Spannung gesetzt und durch einen außenliegenden Magneten aus dem Quecksilber herausgehoben wird, so daß ein Lichtbogen entsteht, der über die Erregeranoden den Lichtbogen zu den Hauptanoden einleitet. Bei großen Gefäßen wird die Spritzzündung benutzt, bei der in einem unten angebrachten, mit Quecksilber gefüllten Rohr ein kleiner Eisenkolben durch eine das Rohr umschließende Magnetspule nach unten gezogen wird, wodurch das Quecksilber nach oben an die Zündanode spritzt, den Stromkreis schließt und damit den Lichtbogen einleitet.

Tabelle 2.51 enthält den Typenschlüssel für Stromrichter.

Tabelle 2.51: Typenschlüssel für Stromrichter

G Gleichrichterröhre (ungesteuert) S Thyratron (gesteuert)	maximale Anodenspannung in kV	maximaler Katodenstrom in A	i indirekte, d direkte Heizung	Füllung: I Argon II Helium III Wasserstoff IV Krypton V Xenon VI Neon M Mischfüllung – Quecksilber

2.5. Analoge integrierte Schaltkreise

2.5.1. Schaltzeichen, Grundbegriffe

Analoge integrierte Schaltkreise lassen sich nach ihrem Anwendungsgebiet einteilen (Bild 2.117).
Packungsdichten verschiedener aktiver Bauelemente s. Tabelle 2.52.

Tabelle 2.52: Packungsdichte bei verschiedenen Entwicklungsstufen der Technik

Bauelement	Elemente je dm³	Raumbedarf bei 10^5 Einzelteilen
Röhren	15	zwei Schränke
Transistoren	35	Schreibtisch
Mikromodule	750	Aktentasche
Festkörperschaltkreise	6 500	Zigarrenkiste
Molekularkreise	bis 200 000	Zigarettenschachtel
Biologische Systeme	500 000	Fliegenauge

Die weiteren Angaben beziehen sich auf Operationsverstärker.

Operationsverstärker: mehrstufige, als eine Einheit zu betrachtende Verstärker mit sehr hoher Verstärkung und großer Bandbreite (ursprünglich Rechenverstärker).

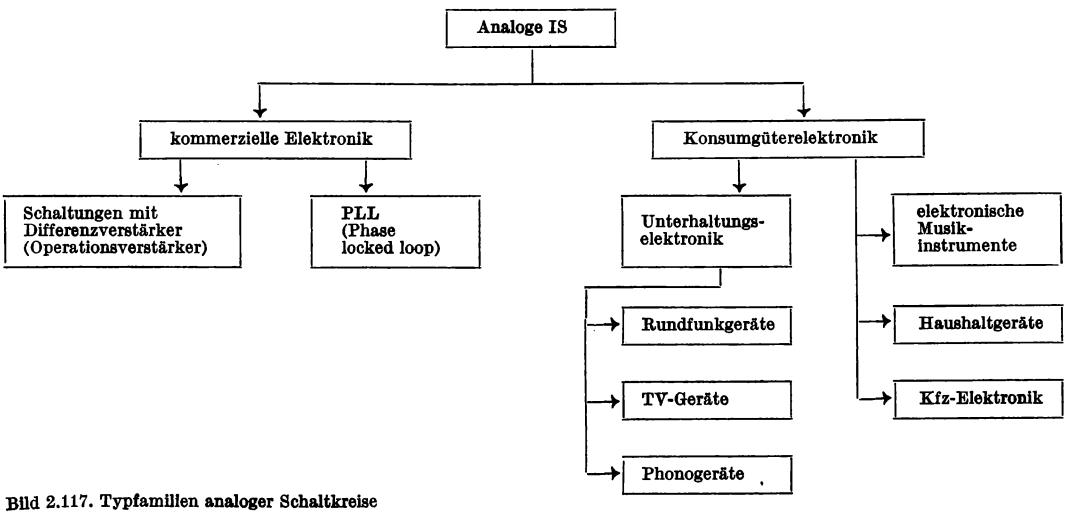


Bild 2.117. Typfamilien analoger Schaltkreise

Kenngrößen

Leerlaufverstärkung V_U: ohne äußere Gegenkopplung gemessene Spannungsverstärkung,

Gleichtaktunterdrückung CMR: Verhältnis von Leerlauferstärkung zu Gleichtaktverstärkung,

Gleichtaktverstärkung V_G: Verstärkung zweier Signale gleicher Phase und Amplitude, die gleichzeitig an beiden Eingängen anliegen,

Differenzverstärkung V_D: Verstärkung der Differenz zweier Signale, die gleichzeitig an beiden Eingängen anliegen,

Eingangsruhestrom I_0: Basisstrom der Eingangstransistoren des Operationsverstärkers, der sich dem Signalstrom überlagert,

Offsetstrom I_{I_0}: Differenz der beiden Eingangsruheströme,

Offsetspannung (Nullpunktfehler): am Ausgang bei Abwesenheit einer Eingangsspannung auftretende Gleichspannung,

Differenzeingangsspannung U_D: maximal zulässige Differenz beider Eingangssignale,

Drift: Veränderung von Parametern durch Temperatur-, Alterungseinfluß, Änderung der Betriebsspannung,

Inversion: Eingangs- und Ausgangsspannung haben unterschiedliche Polarität (Phasendrehung 180°).

Schaltzeichen und Hauptanschlüsse eines Operationsverstärkers s. Bild 2.118.

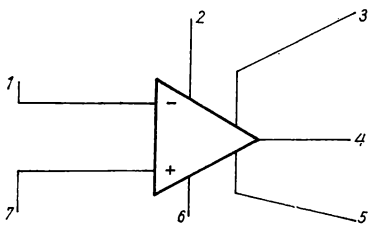


Bild 2.118. Symbol und Grundbeschaltung des Operationsverstärkers

1 invertierender Eingang: steigendes positives Potential am Eingang erniedrigt Ausgangsspannung, 2 positive Betriebsspannung U_{B+}, 3 Zusatzanschluß zur Offsetkompensation, 4 Ausgang des Verstärkers im Ruhezustand bei erfolgter Kompensation $U_A = 0$, 5 Zusatzanschluß zur Frequenzkompensation, 6 negative Betriebsspannung U_{B-} bei symmetrischen Verstärkern $U_{B+} = U_{B-}$, 7 nichtinvertierender Eingang: positives Potential am Eingang erhöht Ausgangsspannung

2.5.2. Schaltungstechnik

Richtwerte des Operationsverstärkers sind in Tabelle 2.53 zusammengestellt.

Tabelle 2.53: Richtwerte des Operationsverstärkers

Kenngröße	Idealer Verstärker	Realer Verstärker
Leerlaufverstärkung A_U	∞	$\approx 5 \cdot 10^4$
Eingangsimpedanz Z_D	∞	≈ 400 kΩ
Z_G	∞	≈ 30 MΩ
Ausgangsimpedanz	0 Ω	≈ 150 Ω
Bandbreite	0 bis ∞ Hz	entsprechend der Frequenzgangkorrektur
Gleichtaktunterdrückung	∞	≈ 80 dB
Nullpunktfehler	ohne	Offsetkompensation erforderlich

Offsetkompensation: Durch Einspeisen eines zusätzlichen Stromes wird der Nullpunktfehler kompensiert (Bild 2.119).

Frequenzkompensation: Zur Anwendung bei höheren Frequenzen ist in Abhängigkeit von der Verstärkung $\left(V \approx \frac{R2}{R1}\right)$ durch äußere Beschaltung eine Kompensation innerer Phasenverschiebungen notwendig (Bild 2.120, Tabelle 2.54).

Tabelle 2.54: Frequenzkompensation in Abhängigkeit von der Verstärkung V

V dB	R1 kΩ	R2 kΩ	R3 kΩ	R4 kΩ	C1 pF	C2 pF
0	10	10	5	1,5	5000	200
20	1	10	1	1,5	500	20
40	1	100	1	1,5	100	3
60	0,5	500	0,5	0	10	3
	Gegenkopplung			Frequenzkompensation		

Driftminderung: Verringerung des Einflusses äußerer Bedingungen (Bilder 2.121 und 2.122).

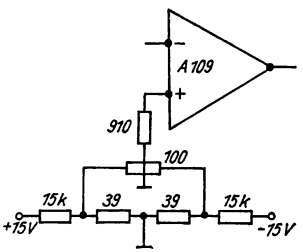


Bild 2.119. Offsetkompensation des A 109

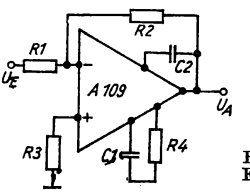


Bild 2.120. Frequenzkompensation des A 109

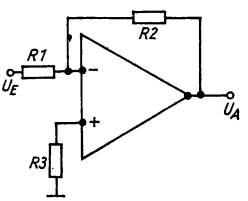


Bild 2.121. Driftminderung eines invertierenden Verstärkers

$$R3 = \frac{R1R2}{R1 + R2}$$

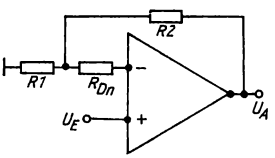


Bild 2.122. Driftminderung eines nichtinvertierende Verstärkers

$R_{Dn} \approx R_G$ (Quellwiderstand von U_e)

$R_S \gg R1 \parallel R2$

2.5.3. Grundschaltungen

Tabelle 2.55 enthält die Anwendungsmöglichkeiten von Operationsverstärkern.

Tabelle 2.55: Anwendung von Operationsverstärkern

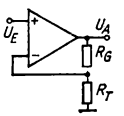
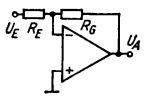
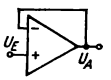
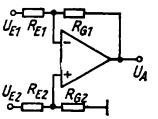
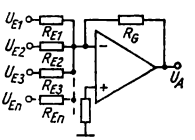
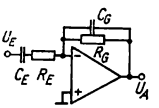
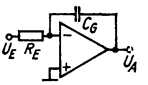
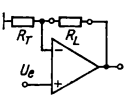
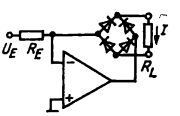
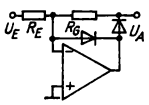
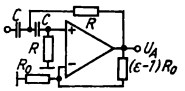
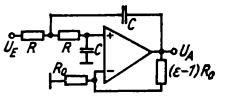
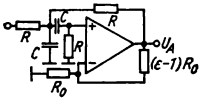
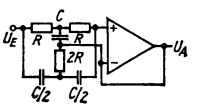
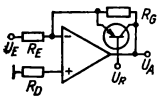
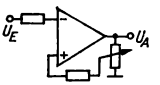
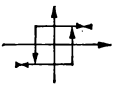
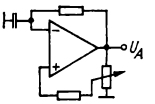
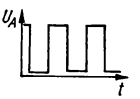
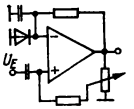
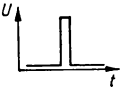
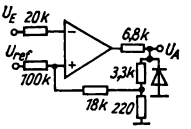
Variante	Schaltung	Funktionsgleichung	Richtwerte, Randbedingungen
Nichtinvertierender Verstärker		$U_A = \frac{R_G + R_T}{R_T} U_E$	$R_e \geqq 1\,M\Omega$
Invertierender Verstärker		$U_A = -\frac{R_G}{R_E} U_E$	$R_e \approx R_E$
Spannungsfolger		$U_A \approx U_E$	$R_e \gg 1\,M\Omega$ $R_a \approx 0\,\Omega$
Differenzverstärker		$U_A = \frac{R_G}{R_E}(U_{E2} - U_{E1})$	$R_{E1} = R_{E2}$ $R_{G1} = R_{G2}$
Addierer		$U_A = -\left(\frac{R_G}{R_{E1}} U_{E1} + \frac{R_G}{R_{E2}} + \cdots\right)$	
Differentiator		$U_A = -R_G C_E \frac{dU_E}{dt}$	
Integrator		$U_A = -\frac{1}{R_E C_G} \int_0^t U_E\,dt$	$U_A = 0$ bei $t = 0$
Konstantstromquelle		$I_A = \frac{U_E}{R_T}$	
Gleichrichter		$I = \frac{U_E}{R_E}$	linear bereits bei wenigen Millivolt

Tabelle 2.55 (Fortsetzung)

Variante	Schaltung	Funktionsgleichung	Richtwerte, Randbedingungen
Präzisions-gleichrichter		$U_A = -\frac{R_G}{R_E} U_E$	extrem linear
Selektiv-verstärker (Hochpaß)		$U_A = \varepsilon U_E$ $f_g = 1/(2\pi RC\sqrt{\gamma})$	$f \gg f_g$ γ, ε abhängig vom Filtertyp
Selektiv-verstärker		$U_A = \varepsilon U_E$ $f_g = \sqrt{\gamma}/(2\pi RC)$	$f \ll f_g$ γ, ε abhängig vom Filtertyp
Selektiv-(Resonanz-) Verstärker		$U_A = \frac{\varepsilon}{4-\varepsilon} U_E$ $f_0 = 1/(\sqrt{2}\pi RC)$	$f = f_0$ $Q = \frac{\sqrt{2}}{4-\varepsilon}$ γ, ε Parameter
Selektiv-verstärker (Sperrfilter)		$f_0 = 1/(2\pi RC)$	
Phasen-empfindlicher Gleichrichter			U_R = Referenz-spannung
Signum-funktion mit Hysterese			
Astabiler Multivibrator			
Monostabiler Multivibrator			
Komparator			

Zur Veränderung der Eingangs- und Ausgangsparameter werden Gegenkopplungsschaltungen eingesetzt (Tabelle 2.56).

Tabelle 2.56: Gegenkopplungsschaltungen

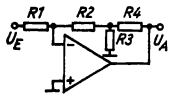
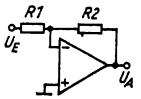
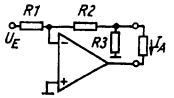
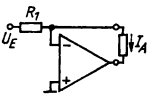
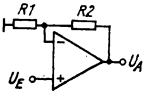
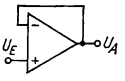
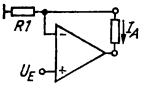
Typ	Schaltung	Übersetzung	R_e	R_a
Spannungs-Parallel-Gegenkopplung		$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R2}{R1}\left(1 + \frac{R4}{R3} + \frac{R4}{R2}\right)$	$R1$	0
Spannungs-Parallel-Gegenkopplung		$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R2}{R1}$	$R1$	0
Strom-Parallel-Gegenkopplung		$\frac{I_A}{U_E} = \frac{1}{R1}\left(1 + \frac{R2}{R3}\right)$	$R1$	∞
Strom-Parallel-Gegenkopplung		$\frac{I_A}{U_E} = \frac{1}{R1}$	$R1$	∞
Spannungs-Serien-Gegenkopplung		$\frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R2}{R1}$	∞	0
Spannungs-Serien-Gegenkopplung		$\frac{U_A}{U_E} = 1$	∞	0
Strom-Serien-Gegenkopplung		$\frac{I_A}{U_E} = \frac{1}{R1}$	∞	∞

Tabelle 2.57: Universell einsetzbare Schaltkreise

	A 109 C	B 109 C	A 110 C	B 110 C	µA 709	µA 741	µA 710
U_{B+}	15···18 V	15···18 V	12···14 V	12···14 V	bis 18 V	bis 18 V	bis +14 V
U_{B-}	−15···−18 V	−15···−18 V	−6···−7 V	−6···−7 V	bis −18 V	bis −18 V	bis −7 V
U_D	±5 V	±5 V	±5 V	±5 V	±5 V	±30 V	±5 V
P_{VL}	300 mW	300 mW	300 mW	300 mW	300 mW	500 mW	300 mW
U_{IO}	≦ 7,5 mV	≦ 5 mV	≦ 7,5 mV	≦ 5 mV	≦ 2 mV	≦ 2 mV	≦ 1,6 mV
I_{IO}	≦ 1,5 µA	≦ 0,5 µA	≦ 1,5 µA	≦ 5 µA	≦ 0,1 µA	≦ 30 µA	≦ 1,8 µA
U_A	≧ ±10 V	≧ ±10 V	≧ 2,5 V	≧ 2,5 V	≧ ±13 V	≧ ±13 V	≧ 3,2 V
CMR	≧ 65 dB	≧ 70 dB	≧ 70 dB	≧ 70 dB	≧ 90 dB	≧ 90 dB	≧ 90 dB
A_U	≧ $1{,}5 \cdot 10^4$	≧ $2{,}5 \cdot 10^4$	≧ 750	≧ 10^3	≧ $4{,}5 \cdot 10^4$	≧ 10^5	≧ $1{,}5 \cdot 10^3$
R_e	≧ 50 kΩ	≧ 150 kΩ			≧ 250 kΩ	≧ 1 MΩ	
R_a	≦ 150 Ω				≦ 150 Ω		≦ 200 Ω

Tabelle 2.58: Anschlußbelegung von Universaltypen

	A 109 C, B 109 C	A 110 C, B 110 C	µA 710	µA 709	µA 741
Gehäusetyp	DIL-14	DIL-14	TO-99	TO-99	TO-99
Anschlüsse					
1			Masse	Eingangsfrequenz-kompensation	Offsetkompensation
2		Masse	nichtinvertierender Eingang	invertierender Eingang	invertierender Eingang
3	Eingangsfrequenz-kompensation	nichtinvertierender Eingang	invertierender Eingang	nichtinvertierender Eingang	nichtinvertierender Eingang
4	invertierender Eingang	invertierender Eingang	$U_B -$	$U_B -$	$U_B -$
5	nichtinvertierender Eingang			Ausgangsfrequenz-kompensation	Offsetkompensation
6	$U_B -$	$U_B -$		Ausgang	Ausgang
7			Ausgang	$U_B +$	$U_B +$
8			$U_B +$	Eingangsfrequenz-kompensation	
9	Ausgangsfrequenz-kompensation	Ausgang			
10	Ausgang				
11	$U_B +$	$U_B +$			
12	Eingangsfrequenz-kompensation				

2.5.4. Standardtypen

Einige Typen (Tabellen 2.57 und 2.58) sind universell einsetzbar und besitzen daher besondere Bedeutung.

A 109, B 109, µA 709: Universalverstärker mit externer Frequenzkompensation;
A 110, B 110, µA 710: Spannungskomparator, Logikangleichung; µA 741: Universalverstärker mit interner Frequenzkompensation.

Zählrichtung und Bauform (Draufsicht) s. Bild 2.123.

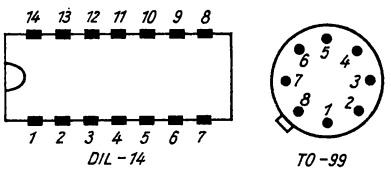


Bild 2.123. Anschlußzählrichtung bevorzugter Bauformen analoger Schaltkreise (von Bestückungsseite gesehen)

2.6. Digitale integrierte Schaltkreise

2.6.1. Grundsätzliches und Klassifizierung

Digitale integrierte Schaltkreise finden vorrangig in Geräten der elektronischen Rechentechnik und anderer Zweige der Digitaltechnik eine breite Anwendung. Funktionell sind sie in logische und Speicherschaltkreise unterteilbar.

Digitale integrierte Schaltkreise werden mit Hilfe der bekannten Grundtechniken zur Fertigung integrierter Schaltungen realisiert (Tabelle 2.59).

Tabelle 2.59: Grundtechniken zur Herstellung integrierter Schaltungen

Schichttechnik (Filmtechnik)	Realisierung sämtlicher Bauelemente durch Aufbringen von Metall-, Halbleiter-, Widerstands- und Isolatorschichten auf einem Glas- oder Keramikträger (Substrat)
Festkörperschaltkreistechnik (Halbleiterblocktechnik, monolithisch[1])	Realisierung sämtlicher aktiver und passiver Bauelemente durch selektives Einbringen von Störatomen (Akzeptoren, Donatoren) in einen Halbleiterkristall (Chip)
Hybridtechnik	Einfügen einzelner aktiver Bauelemente oder Chips mit integrierten Schaltungen in ein Verbindungssystem, das weitere passive Bauelemente enthalten kann (Kombination gewisser Elemente der beiden o. a. Techniken)

[1]) monolithisch: aus einem Stein, hier in der Bedeutung ein Kristall

Digitale Schaltkreise eignen sich im Gegensatz zu linearen (analogen) integrierten Schaltkreisen besser für eine höhere Integration, da wegen der zumeist vorliegenden Realisierung von nur zwei unterschiedlichen Zuständen (zweiwertige Logik) geringere Toleranzforderungen an die Bauelemente existieren. Tabelle 2.60 enthält die Integrationsgrade digitaler Schaltungen, Tabelle 2.61 eine Übersicht der Kennzeichnung integrierter Schaltungen.

Tabelle 2.60: Integrationsgrade digitaler Schaltungen

Meßgröße	Erreichte Werte	
Bauelementedichte in Anzahl von Bauelementen (BE) je Chip bzw. je mm²	Klassifizierung: MSI (medium scale integration, d. h. mittlerer Integrationsgrad) bei kleiner als 1000 BE/Chip LSI (large scale integration, d. h. sehr großer Integrationsgrad) bei größer als 1000 BE/Chip Gegenwärtig: ≈ 2500 BE/mm²	
Schaltungsdichte in Anzahl von Grundschaltungen (i. allg. Gatter) je Chip bzw. je mm² bzw. je cm³	≈ 2000 Schaltungen/Chip bzw. 30 Schaltungen/mm²	
Packungsdichte in Anzahl von BE je cm³	normale Verdrahtung	0,05
	Hybridschaltung	20···200
	Festkörperschaltung	
	bipolar auf Kristall	10^5
	bipolar mit Gehäuse	10^2···10^3
	MOS-Technik	
	theoretisch auf dem Kristall	10^9
	Neuronendichte des menschlichen Gehirns (zum Vergleich)	10^7

Tabelle 2.61: Kennzeichnung von integrierten Schaltungen

Kennzeichnung	Bedeutung
1. Buchstabe	
D	digitale Schaltkreise mit bipolaren Transistoren für den Temperaturbereich 0···70 °C
E	digitale bipolare Schaltkreise für den Temperaturbereich −25···+85 °C
F	digitale polare Schaltkreise für den Temperaturbereich −55···+125 °C
U	digitale unipolare Schaltkreise
Die folgenden drei Ziffern	laufende Numerierung
2. Buchstabe	
C	dual-in-line-Gehäuse (DIL-Gehäuse) aus Keramik
D	DIL-Gehäuse aus Plast
G	Flat-Pack-Gehäuse

Beispiel:

D 120 C (s. a. Bild 2.124)

- C: DIL-Gehäuse, Keramik
- 120: lfd. Nummer
- D: digitaler bipolarer Schaltkreis für den Temperaturbereich 0···70 °C

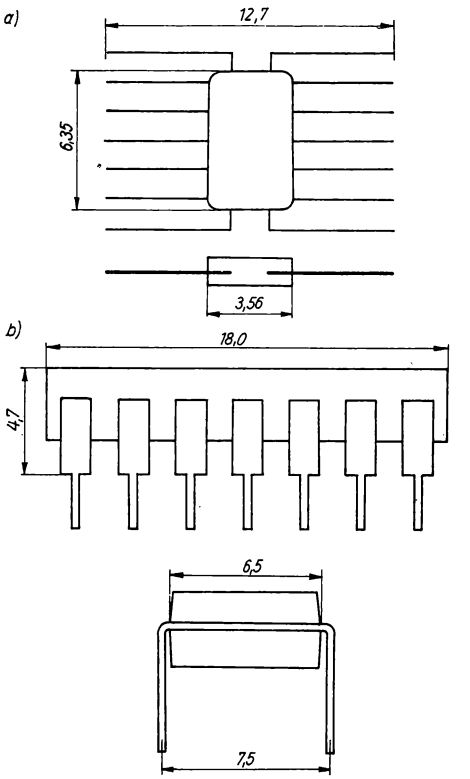


Bild 2.124. Gehäusearten für integrierte Schaltungen (Maße in mm)
a) Flat-Pack-Gehäuse, b) DIL-Gehäuse

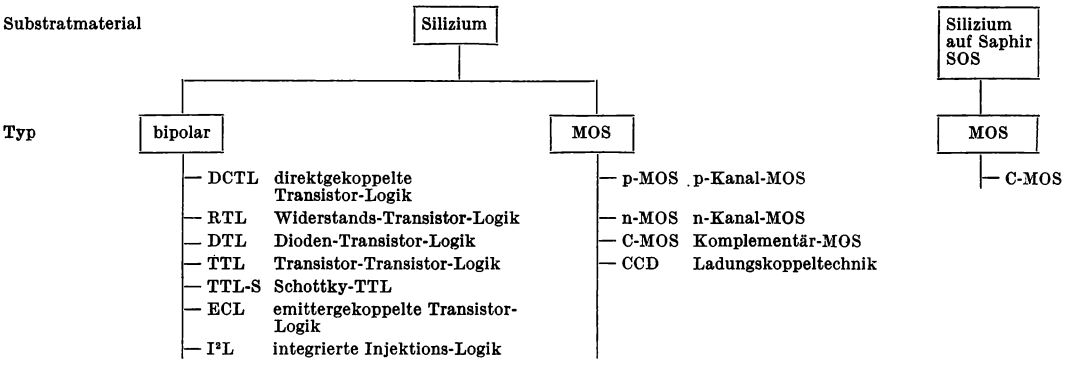


Bild 2.125. Halbleitertechnologien und Schaltkreisfamilien (Auswahl)

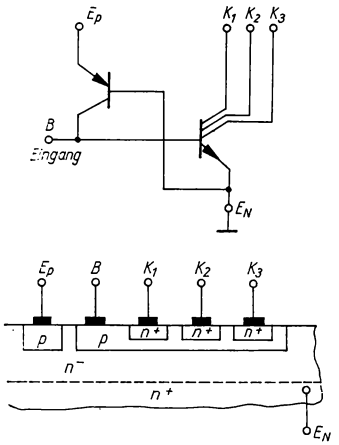


Bild 2.126. I²L-Gatter
a) Schaltbild, b) Struktur der integrierten Schaltung

2.6.2. Monolithische Schaltkreise

Vorrangige Grundlage für die Entwicklung digitaler integrierter Schaltungen mit hohem Integrationsgrad bilden die *Festkörperschaltkreise (monolithische Schaltkreise)*. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Technologie großintegrierter Schaltungen führten zu einer Vielzahl bipolarer und unipolarer (MOS) Bausteine, die sich in sog. Schaltkreisfamilien standardisieren lassen (Vorteil hoher Produktionsstückzahlen). Im Bild 2.125 sind ausgewählte Halbleitertechnologien und Strukturen zur Realisierung logischer Schaltungen (*Schaltkreisfamilien*) dargestellt. Dabei sind besonders Schaltkreisfamilien bekannt, deren Schaltungen bevorzugt aus Transistoren bestehen. Als Beispiel einer modernen Technologie ist im Bild 2.126 ein I²L-Gatter aufgeführt.
Ausgewählte Eigenschaften derartiger Grundtechnologien sind in Tabelle 2.62 zusammengestellt.
Ein Überblick zu den in der DDR gefertigten Reihen integrierter Schaltungen wird in Tabelle 2.63 gegeben.

Tabelle 2.62: Ausgewählte Kenngrößen von Grundtechnologien zur Herstellung moderner LSI-Schaltkreise

Parameter	p-MOS	n-MOS	C-MOS	I²L	low-power Schottky TTL
Schaltungsdichte in Gatter/mm²	150	200	100	300	50
Verzögerung je Gatter in ns	100···1000	10···50	50	10···50	1···10
Geschwindigkeits-Leistungs-Produkt in pJ	50···100	10	4	0,1···1,0	10···20
Technologischer Aufwand anhand der notwendigen Anzahl von Fotoschablonen	4	5	6	4···5	7
Anzahl von Diffusions- oder Legierungsoperationen	1	3	3	2···3	4

Tabelle 2.63: Typische Parameter der Reihen digitaler integrierter Schaltungen

	Bipolar		Unipolar	
Kenngröße	Gatter	Flip-Flop	Gatter	Flip-Flop
Betriebsspannungen	(5 ± 0,25) V		$U_{B1} = (-27^{+2}_{-1})$ V $U_{B2} = (-13^{+1,5}_{-0,5})$ V	
Betriebstemperatur	0···70 °C		0···70 °C	
Lagertemperatur	−65···+150 °C		−40···+70 °C	
Eingangsspannung für »O«	< 0,8 V		< −2 V	
Eingangsspannung für »L«	> 2 V		> −9 V	
Ausgangsspannung für »O«	0,2···0,4 V		< −1 V	
Ausgangsspannung für »L«	2,4···3,3 V		> −10 V	
Stromaufnahme bei »L«-Ausgang	1···2 mA	8···20 mA	1···2 mA	
Stromaufnahme bei »O«-Ausgang	3···5,5 mA			
Ausgangslastfaktor	10			
Eingangslastfaktor	1			

Tabelle 2.63 (Fortsetzung)

	Bipolar		Unipolar	
	Gatter	Flip-Flop	Gatter	Flip-Flop
Beispiele	D 100: 2-Eingangs-NAND-Gatter (4fach) D 110: 3-Eingangs-NAND-Gatter (3fach) D 120: 4-Eingangs-NAND-Gatter (2fach) D 130: 8-Eingangs-NAND-Gatter (1fach)	D 172: RS-Flip-Flop (1fach) D 173: JK-Flip-Flop (2fach) D 174: D-Flip-Flop (2fach)	U 102 D: 3-Eingangs-NOR-Gatter (2fach) U 103 D: RS-Flip-Flop U 106 D: 2-Eingangs-NOR-Gatter (2fach) U 107 D: 2-Eingangs-AND-Gatter (3fach); 2-Eingangs-AND/NAND-Gatter (1fach)	U 108 D: JK-Flip-Flop

Tabelle 2.64: Effekte in der Optoelektronik

Bezeichnung	Effekt
Linearer elektrooptischer Effekt	Doppelbrechung bestimmter Kristalle und Flüssigkeiten beim Anlegen eines elektrischen Feldes (Richtungsabhängigkeit der optischen Eigenschaften des Stoffes)
Quadratischer elektrooptischer Effekt (KERR-Effekt)	Änderung des Brechungsindex proportional dem Quadrat der elektrischen Feldstärke in bestimmten Stoffen
Magnetooptischer Effekt (FARADAY-Effekt)	Beeinflussung der Polarisation einer linear polarisierten Lichtquelle durch ein Magnetfeld
Fotoeffekt	Ablösung von Elektronen aus ihrer atomaren bzw. Kristallgitterbindung durch Einwirkung von Photonen
Äußerer Fotoeffekt	Elektronen verlassen das Material
Innerer Fotoeffekt	Elektronen verbleiben im Material (Erhöhung der Leitfähigkeit durch Lichteinwirkung)
Lumineszenz	Alle Arten von kaltem Leuchten (im Gegensatz zur Temperaturstrahlung z. B. einer Glühlampe) Anregung durch:
Fotolumineszenz	Licht aller Wellenlängen
Elektrolumineszenz	elektrische Felder
Katodenlumineszenz	Elektronenstoß
Chemilumineszenz	chemische Reaktionsenergie
Biolumineszenz	Vorgänge in Organismen

2.7. Optoelektronik

2.7.1. Optoelektronische Grundgesetze und Überblick

Gegenstand der modernen Optoelektronik ist die Erzeugung, Übertragung, Verarbeitung und Speicherung von Informationen durch Wechselwirkung von Photonen und elektrischen Ladungsträgern in optischen bzw. elektronischen Einrichtungen im Bereich des elektromagnetischen Spektrums vom Ultraviolett über das sichtbare Licht bis zum Mikrowellenbereich. Neben der Nutzung klassischer optischer Gesetze (Reflexion, Brechung, Totalreflexion, Interferenz, Beugung und Polarisation) kommen eine Reihe weiterer Effekte zur Anwendung (Tabelle 2.64).
Die wesentlichen Kategorien optoelektronischer Bauelemente lassen sich an Hand des prinzipiellen Aufbaues einer *optoelektronischen Übertragungskette* (Tabelle 2.65) ableiten. Eine große Anzahl der ständig anwachsenden Anwendungsmöglichkeiten der Optoelektronik läßt sich darauf zurückführen.

2.7.2. Lichtsender

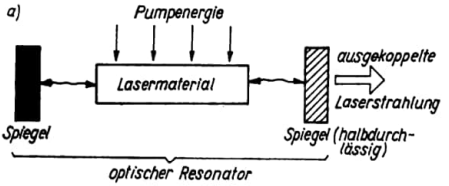
2.7.2.1. Laser

Der Laser ist eine kohärente, monochromatische Lichtquelle im Bereich des Infraroten, Sichtbaren und Ultravioletten, dessen Strahlung sich zu nahezu parallelen Bündeln (Öffnungswinkel $< 4{,}848137 \cdot 10^{-6}$ rad $\triangleq 1''$) bzw. auf engstem Raum (Leuchtfleckdurchmesser ≈ 1 µm) konzentrieren läßt, wodurch hohe Leistungsdichten bis zu mehr als $5 \cdot 10^{14}$ W/cm² erreichbar sind. Nach Betriebs- und Strahlungsweise unterscheidet man *Impuls-* und *Dauerstrich-* (*kontinuierliche*) *Laser*, nach der das Licht emittierenden Substanz *Gas-*, *Flüssigkeits-*, *Festkörper-* und *Halbleiterlaser*. Der prinzipielle Aufbau ausgewählter Lasertypen ist Bild 2.127 zu entnehmen.

Tabelle 2.65: Überblick zu Bauelementen und Bestandteilen einer optoelektronischen Übertragungskette

Lichtsender	→	Modulations- bzw. Ablenkungseinrichtung	→	Übertragungsweg	→	Lichtempfänger Anzeigeeinrichtung Speichermedium

Umwandlung von elektrischer Energie in Licht Direkte Modulation der Lichtquelle	Übertragung des Lichtes Modulation und/oder Ablenkung durch Anwendung optoelektronischer, magnetooptischer bzw. mechanischer Prinzipien	Umwandlung von Licht in elektrische Energie Nutzung des äußeren Fotoeffektes	Nutzung des inneren Fotoeffektes
Glühlampen	Vakuum	gasgefüllte Fotozelle	Fotowiderstände (Se, CdS, PbS, InSb)
Gasentladungslampen	Atmosphäre	Hochvakuumfotozelle	Halbleiter-Sperrschichtelemente (Ge, Si, Se, GaAs)
Lichtemittierende Dioden (LED, Leuchtdioden)	Spiegel- und Linsensysteme	Fotovervielfacher (Sekundärelektronenvervielfacher)	– Fotodiode – Fotoelement – Fototransistor – Fotothyristor
Lumineszenzelemente	Faseroptik (Lichtleitfaser, optische Wellenleiter)		
Laser (kohärent) Gaslaser Flüssigkeitslaser Festkörperlaser Halbleiterlaser			



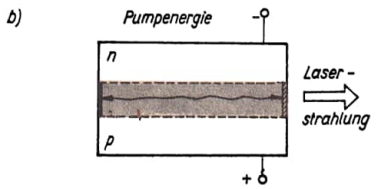


Bild 2.127. Laser
a) schematischer Aufbau, b) Halbleiterlaser

2.7.2.2. Lumineszenzdioden

Die Lumineszenzdiode (lichtemittierende Diode, LED) beruht auf einem in Durchlaßrichtung betriebenen pn-Übergang in einem Halbleitermaterial. Im Gefolge von Rekombinationsprozessen innerhalb der pn-Schicht tritt bei bestimmten Halbleitermaterialien der freigesetzte Energiebetrag in Form von sichtbarer oder infraroter Strahlung auf. Ihr Austritt wird durch eine entsprechende Gestaltung der Lumineszenzdiode optimiert [z. B. durch eine kugelförmige Struktur zur Verminderung von Reflexionen in das Innere (Bild 2.128)]. Die

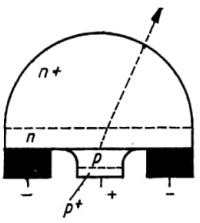


Bild 2.128. Halbleiter-Lumineszenzdiode in Kuppelform (Durchmesser 0,5···2,5 mm)

Wellenlänge des emittierten, nichtkohärenten Lichtes ist von dem gewählten Halbleitermaterial und seiner Dotierung abhängig (Tabelle 2.66). Seine Intensität ist proportional zum Diodenstrom. Die Lumineszenzdiode ist relativ einfach modulierbar (bis zu 50 MHz); erreichbare Schaltzeiten liegen bei 10···200 ns.

Tabelle 2.66: Charakteristische Werte für Lumineszenzdiodenmaterialien

Material	Farbe des emittierten Lichtes	Wellenlänge des Lichtes	Betriebsspannung	Lichtausbeute	Wirkungsgrad
		nm	V	lm/W	%
GaAs	infrarot	900	1,3		3···6
GaAs	grün	540			
GaAsP	orange	610	2,0		
GaAsP	rot	650	1,6	0,15	0,1···0,5
GaAsP	gelb	590	3,0	0,015	
GaP, N	grün	550	3,0	0,04	0,05···0,2
GaP, ZnO	rot	700	2,0	0,2	1···7
SiC	gelb	590	3,0		

Besondere *Vorteile* von Lumineszenzdioden sind

- niedrige Betriebsspannung (1,3···3,5 V bei 10···100 mA), Kompatibilität zu integrierten TTL-Schaltkreisen,
- hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer (einige 1 000 h),
- niedrige Ansprechzeiten,
- Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen sowie
- Erzeugung monochromatischen Lichtes.

Ihre hauptsächliche *Anwendung* finden LED im sichtbaren Bereich als Signallämpchen (Konkurrenz zur Glühlampe) und in Kombination als numerische bzw. alphanumerische Anzeigeeinrichtung sowie als Bildwiedergabe, im infraroten Bereich zur Informationsübertragung (optimale Anpassung an die spektrale Empfindlichkeit der Lichtempfänger).

2.7.2.3. Lumineszenzelemente

Lumineszenzelemente in Form von *Lumineszenzplatten* oder *-zellen* besitzen den Aufbau von Kondensatoren mit einer elektrolumineszenten Schicht aus GaAs, GaP, ZnS oder CdS (Bild 2.129). Beim Anlegen einer Wechselspannung tritt eine Strahlung auf, deren Leuchtdichte und Wellenlänge von der Frequenz der angelegten Wechselspannung abhängig ist. Anwendung finden Lumineszenzplatten in Anzeigeeinrichtungen.

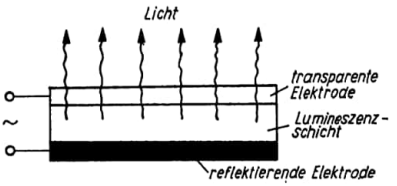


Bild 2.129. Aufbau einer Lumineszenzplatte

2.7.3. Lichtempfänger

2.7.3.1. Fotozelle und Fotovervielfacher

Hochvakuumfotozelle und gasgefüllte Fotozelle sowie Fotovervielfacher sind Lichtempfänger, die auf dem äußeren Fotoeffekt beruhen. Sie bestehen aus einer lichtempfindlichen Katode und einer Anode innerhalb eines Glaskolbens. Der höheren Empfindlichkeit einer gasgefüllten *Fotozelle* steht ihre größere Trägheit gegenüber (Nutzung nur für langsame Vorgänge).
Beim *Fotovervielfacher* (*Sekundärelektronenvervielfacher*) erfolgt im Anschluß an die primäre Fotoelektronenerzeugung eine gesteuerte Vervielfachung im Rahmen eines lawinenartigen Prozesses mit Hilfe weiterer Elektroden, so daß der primäre Fotoelektronenstrom erheblich verstärkt wird (bis etwa 10^{10}fach).

2.7.3.2. Fotowiderstand und Halbleitersperrschichtelemente

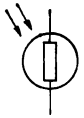
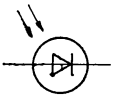
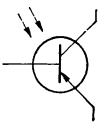
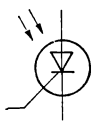
Die Lichtempfänger dieser Gruppe nutzen den inneren Fotoeffekt. Ausgewählte Kenndaten von Lichtempfängern sind in Tabelle 2.67 zusammengestellt.

2.7.4. Optische Koppler

2.7.4.1. Faseroptik

Bei der Übertragung von Licht zwischen Sender und Empfänger mit Mitteln der *Faseroptik* erfolgt eine Aufteilung des Lichtes auf mehrere lichtleitende Fasern (z. B. Glasfasern), die in einem flexiblen Bündel (*Lichtleitkabel*) zusammengefaßt sind. Das Verfahren der Lichtleitung in Fasern beruht auf dem Prinzip der Totalreflexion an Grenzflächen zweier Medien, wobei das äußere Medium (Mantel) einen kleineren Brechungsindex als das innere Medium (Kern) besitzen muß (Bild 2.130). Der Durchmesser der einzelnen Glasfaser beträgt etwa 70 µm, die Anzahl der Fasern im Kabel bis zu 100. Bei geordneter Führung der Fasern im Kabel ist eine Übertragung bildlicher Informationen (Bildleitung, Bildformwandler) möglich, bei einer ungeordneten Führung lediglich die Übertragung von Helligkeitswerten.

Tabelle 2.67: Kenndaten von Lichtempfängern

Typ/ Schaltungssymbol	Material	Spektrale Empfindlichkeit nm	Betriebsspannung V	Betriebsfrequenz Hz	Empfindlichkeitsschwelle lx	Aufbau und Wirkungsweise
Fotowiderstand 	CdS	sichtbarer Bereich Max.: 650 (rot)	500	10···1000	10^{-2}	Unterlage (Substrat) mit einer Schicht aus fotoempfindlichem Material; Änderung des Widerstandswertes in Abhängigkeit von der einfallenden Lichtintensität
	CdSe	sichtbarer Bereich Max.: 700 (rot)	500	10···1000		
	PbS	infraroter Bereich Max.: 2500···3500	300			
	InSb	infraroter Bereich Max.: 6000				
Fotodiode 	Ge	sichtbarer und infraroter Bereich Max.: 1500	30	bis 10000	10	in Sperrichtung betriebener pn-Übergang; Erzeugung von Elektron/Loch-Paaren durch Lichteinfall; Fotostrom proportional zur Lichtintensität (einige 100 µA bei ≈ 20 mW/cm²)
	Si	sichtbarer und infraroter Bereich Max.: 900	50	bis 10^6	1	
	Si-(pin)	sichtbarer Bereich Max.: 800 (rot)	100	> 10^6		
	Si (Lawinen-)	sichtbarer Bereich Max.: 750 (rot)	90			
Fotoelement						Aufbau wie Fotodiode, jedoch im Betrieb ohne Spannung; unter Lichteinfall entstehende Elementespannung ist abhängig vom Material
Fototransistor 	Ge	sichtbarer und infraroter Bereich Max.: 1550	15	10^5	10	Beeinflussung des Kollektorstromes durch Lichteinfall auf den Basis-Kollektor-Übergang; Verstärkung des vom Fotoeffekt abhängigen Basisstromes im Transistor; Fotostrom proportional der Lichtintensität (bis zu 10 mA bei ≈ 20 mW/cm²)
	Si	sichtbarer und infraroter Bereich Max.: 900	80	$5 \cdot 10^5$	1	
Fotothyristor 	Si	sichtbarer und infraroter Bereich Max.: 900	400		10^3···10^5	vierschichtiges (pnpn)-Bauelement mit zwei von der Lichtintensität abhängigen diskreten Schaltzuständen; erreichbare Schaltströme bis zu 2 A

Die Übertragungsdämpfung wird durch Lichtabsorption innerhalb der Faser (≈ 25···30%/m) und Reflexion an den Grenzflächen zur Luft (≈ 4···8%) verursacht. Neben Glas kommen neuerdings weitere Kern- bzw. Mantelmaterialien zur Anwendung, z. B. transparente Plaste.

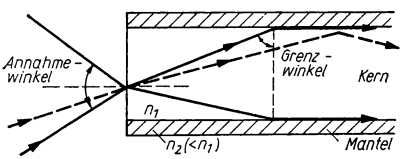


Bild 2.130. Wirkungsweise einer Lichtleitfaser

2.7.4.2. Optoelektronische Koppler

Optoelektronische Koppler dienen zur Übertragung von Informationen zwischen Schaltungen, die voneinander elektrisch isoliert sein müssen. Sie verkoppeln Systeme miteinander mit Hilfe der Lichtenergie, ohne daß eine gemeinsame Erdung der

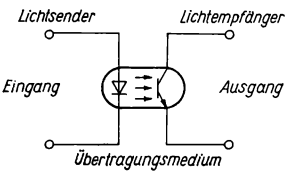


Bild 2.131. Optoelektronischer Koppler

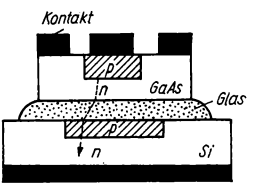


Bild 2.132. Optoelektronischer Koppler (monolithische Anordnung)

Tabelle 2.68: Optoelektronische Koppler

Lichtsender	Lichtempfänger	Bandbreite	Isolationswiderstand	Isolationsspannung	Anstiegszeit
		MHz	Ω	kV	µs
Lichtemitter-Diode (GaAs)	Fotodiode	8,5	10^{11}	1,5	0,01···0,001
	Fototransistor	0,3	10^{11}	1···5	2···5
	Fotothyristor		10^{11}	2,5	

Systeme erforderlich ist. Optische Koppler enthalten eine vollständige optoelektronische Übertragungskette (Lichtsender – Übertragungsweg – Lichtempfänger) in geringem Abstand als geschlossene Anordnung (diskreter Aufbau in einem Gehäuse oder monolithische Halbleiterausführung). Im Bild 2.131 ist der prinzipielle Aufbau und im Bild 2.132 die praktische Ausführung eines optoelektronischen Kopplers dargestellt. Die wesentlichen *vorteilhaften Eigenschaften* optoelektronischer Koppler sind

– hohe Rückwirkungsfreiheit bei der Signalübertragung, vollständige galvanische Trennung von Eingang und Ausgang,
– hohe Isolationsspannung,
– hoher Isolationswiderstand,
– hohe Stromverstärkung (Möglichkeit der Ansteuerung von integrierten Schaltungen),
– kurze Übertragungsstrecke, geringe Größe (Möglichkeit einer Einbeziehung in integrierte Schaltungen),
– hohe Arbeitsfrequenz, große Modulationsbreite,
– große Zuverlässigkeit und Lebensdauer,
– geringe Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen.

Beispiele kommerzieller Typen optoelektronischer Koppler und ihre charakteristischen technischen Daten sind in Tabelle 2.68 zusammengestellt.

2.8. Widerstände

2.8.1. Lineare Widerstände

2.8.1.1. Widerstandsnomogramm

Mit Hilfe des Nomogramms Bild 2.133 lassen sich Widerstandswert und Leistung unmittelbar ablesen.

Beispiel: Durch einen Widerstand fließt bei anliegender Spannung von 200 V ein Strom von 10 mA. Nach Eintragen des Punktes P, entsprechend den Koordinaten von U und I, können der Widerstandswert $R = 20\,\text{k}\Omega$ und die Leistung $P = 2$ W abgelesen werden.

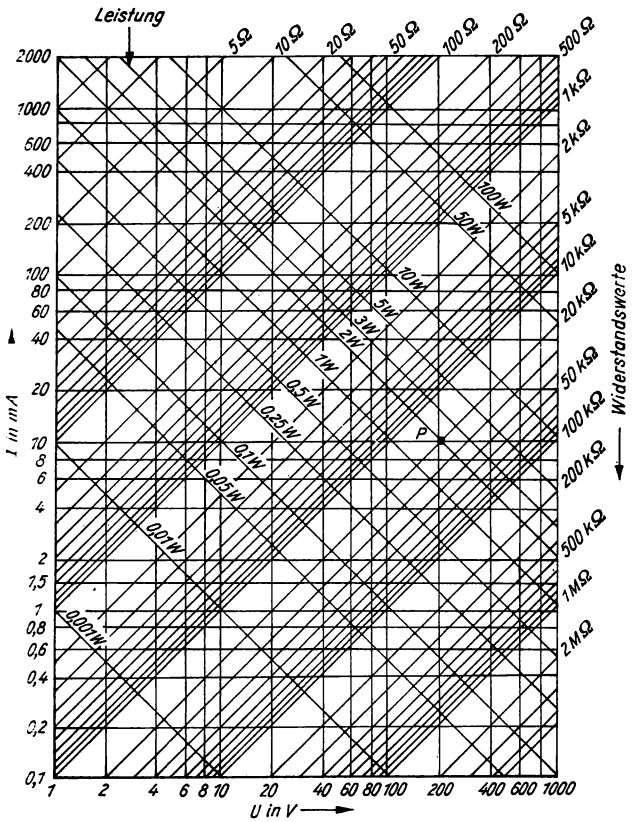


Bild 2.133. Widerstandsnomogramm

2.8.1.2. Festwiderstände

Schichtwiderstände

Der Widerstandswert von Schichtwiderständen ist fast unabhängig von der anliegenden Spannung und nur wenig abhängig von der Temperatur. Der Strom durch einen Schichtwiderstand folgt dem OHMschen Gesetz, so daß die Funktion $U = f(I)$ eine Gerade ist. Der Widerstand gilt sowohl für Wechselstrom als auch für Gleichstrom. Schichtwiderstände bestehen meist aus einem zylindrischen Voll- oder Hohlkörper aus Keramik, auf den eine Schicht aus Glanzkohle, Borkohle oder Metall als Widerstandsmaterial angebracht ist. Die Art der Schicht, ihre Stärke und die eingeschliffenen Wendeln bestimmen den Widerstandswert. Die an beiden Enden der Widerstände angebrachten Anschlußkappen mit ihren Anschlußdrähten oder -schellen gestatten einen kontaktsicheren Anschluß des Widerstandes. Durch einen Lacküberzug ist die Widerstandsschicht gegen Umwelteinflüsse geschützt.
Nennwerte: Nennlast ≈ 0,05 W··· ≈ 250 W.
Die Kenngröße wird charakterisiert durch die Baureihe und die Abmessungen (Bild 2.134). Sie erhält eine bestimmte Kurzbezeichnung.

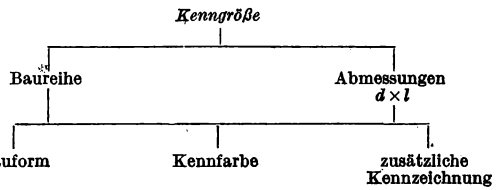


Bild 2.134. Kennzeichnung von Schichtwiderständen

Einer Kenngröße werden die technischen Parameter einer oder mehrerer Prüfcharakteristiken zugeordnet.

Kennzeichnung von Schichtwiderständen (Festwiderstände)

Der *Widerstandswert* und die *Auslieferungstoleranz* bzw. der *Temperaturkoeffizient* sind entweder auf dem Widerstand aufgedruckt oder durch Farbringe bzw. durch Farbpunkte gekennzeichnet (Tabelle 2.69).

Tabelle 2.69: Farbreihe zur Widerstandskennzeichnung (nach TGL 24197/02)

Farbe	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring
	1. Ziffer des Widerstandswertes	2. Ziffer des Widerstandswertes	Multiplikator	Toleranz
Silber	–	–	10^{-2}	±10%
Gold	–	–	10^{-1}	±5%
Schwarz	–	0	10^{0}	–
Braun	1	1	10^{1}	±1%
Rot	2	2	10^{2}	±2%
Orange	3	3	10^{3}	–
Gelb	4	4	10^{4}	–
Grün	5	5	10^{5}	±0,5%
Blau	6	6	10^{6}	±0,25%
Violett	7	7	10^{7}	±0,1%
Grau	8	8	10^{8}	–
Weiß	9	9	10^{9}	–

Die *Farbringe* haben folgende Bedeutung:

1. Ring: 1. Ziffer des Widerstandswertes,
2. Ring: 2. Ziffer des Widerstandswerts,
3. Ring: Multiplikator, das heißt Zehnerpotenz, mit der die durch die ersten zwei Ziffern dargestellte Zahl multipliziert werden muß,
4. Ring: Toleranz (bei der Toleranz von ±20% entfällt der vierte Ring).

Kennzeichnungsbeispiele s. Bilder 2.135 und 2.136.

Temperaturkoeffizienten der Widerstände sind in Tabelle 2.70 angegeben.

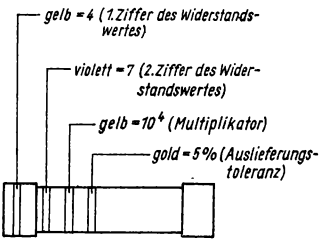


Bild 2.135. Kennzeichnungsbeispiel eines Schichtwiderstandes durch Farbringe (Widerstandswert 470 kΩ, Auslieferungstoleranz 5%)

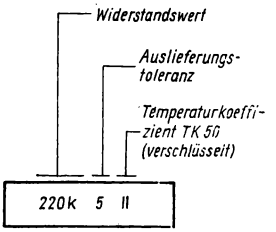


Bild 2.136. Kennzeichnung eines Schichtwiderstandes durch Aufdruck der Werte (Widerstandswert 220 kΩ, Auslieferungstoleranz 5%, Temperaturkoeffizient $5 \cdot 10^{-6}$/K)

Tabelle 2.70: Temperaturkoeffizienten für Widerstände (nach TGL 24197/02)

Temperaturkoeffizient	Angaben des Temperaturkoeffizienten nach Wahl des Herstellers	
	unverschlüsselt	verschlüsselt
$100 \cdot 10^{-6}$/K	TK 100	1 senkrechter Strich
$50 \cdot 10^{-6}$/K	TK 50	2 senkrechte Striche
$25 \cdot 10^{-6}$/K	TK 25	1 Punkt
$15 \cdot 10^{-6}$/K	TK 15	2 Punkte

Widerstandsangaben

Widerstandswerte

sind nach Reihe E 6, E 12, E 24 oder E 48 entsprechend Tabelle 2.71 auszuwählen. Für Schichtwiderstände mit Auslieferungstoleranzen von ±1% sind alle Zwischenwerte zulässig, die aus drei Ziffern und einer Zehnerpotenz bestehen. Für Schichtwiderstände mit Auslieferungstoleranzen von ±0,5% und kleiner sind Zwischenwerte zulässig, die aus vier Ziffern und einer Zehnerpotenz bestehen, wenn die erste Ziffer kleiner oder gleich 5 ist.

Auslieferungstoleranz (in %)

±0,1; ±0,25; ±0,5; ±1; ±2; ±5; ±10; ±20.

Nennverlustleistung (in W)

0,05; 0,125; 0,25; 0,33; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 3; 5; 10; 25; 50; 100; 250.

Die höchstzulässige Verlustleistung in % der Nennverlustleistung ist von der Umgebungstemperatur in °C der jeweiligen Baureihen abhängig (s. Bilder 2.137 und 2.138 für die Baureihe 11). Bei ungünstigen Betriebsbedingungen, z. B. gedrängtem Einbau, schlechter Wärmeableitung, ist eine Verringerung der höchstzulässigen Verlustleistung zu berücksichtigen.

Tabelle 2.71: Widerstandsreihe[1])

Auslieferungstoleranz	Reihe	Widerstandswert Ω					
±20%	E 6	1,00	1,50	2,20	3,30	4,70	6,80
±10%	E 12	1,00	1,50	2,20	3,30	4,70	6,80
		1,20	1,80	2,70	3,90	5,60	8,20
±5%	E 24	1,00	1,50	2,20	3,30	4,70	6,80
		1,10	1,60	2,40	3,60	5,10	7,50
		1,20	1,80	2,70	3,90	5,60	8,20
		1,30	2,00	3,00	4,30	6,20	9,10
±2% und kleiner	E 48	1,00	1,50	2,20	3,30	4,70	6,80
		1,05	1,55	2,30	3,45	4,90	7,15
		1,10	1,60	2,40	3,60	5,10	7,50
		1,15	1,70	2,55	3,75	5,35	7,85
		1,20	1,80	2,70	3,90	5,60	8,20
		1,25	1,90	2,85	4,10	5,90	8,60
		1,30	2,00	3,00	4,30	6,20	9,10
		1,40	2,10	3,15	4,50	6,50	9,55

[1]) Diese Werte können mit ganzen positiven Potenzen von 10 erweitert werden.

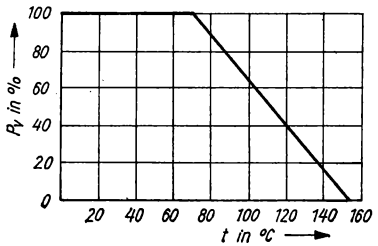


Bild 2.137. Abhängigkeit der höchstzulässigen Verlustleistung P_V in % der Nennverlustleistung von der Umgebungstemperatur t für die Baureihe 11

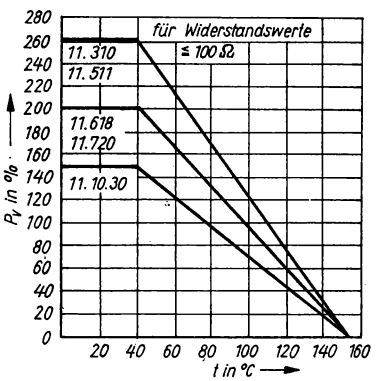


Bild 2.138. Abhängigkeit der höchstzulässigen Verlustleistung P_V in % der Nennverlustleistung von der Umgebungstemperatur t mit hoher zeitlicher Konstanz für die Baureihe 11

Grenzspannung (in V)

75; 100; 150; 250; 350; 500; 750; 1000; 1250; 1500; 2000; 3000; 5000; 6800; 9000; 10000; 20000; 30000.
Die maximal zulässige Grenzspannung, die von der Spannungsfestigkeit bestimmt wird, darf entsprechend dem jeweiligen Widerstandstyp nicht überschritten werden.

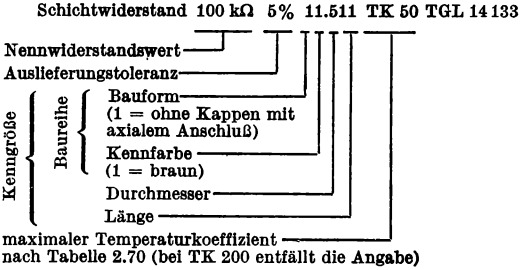
Tabelle 2.72 gibt die höchste Verlustleistung der Widerstände der Baureihe 11 nach Bild 2.138 an.

Tabelle 2.72: Höchste Verlustleistung

Kenngröße	Höchste Verlustleistung W
11.310	0,33
11.511	0,66
11.618	1
11.720	1,5
11.1030	3

Schichtwiderstände der Baureihe 11 sind für Einsatzbedingungen geeignet, bei denen eine hohe zeitliche Konstanz und kleine Temperaturkoeffizienten von wesentlicher Bedeutung sind. Bei Einsatzbedingungen, bei denen keine hohe zeitliche Konstanz gefordert wird, sind diese Schichtwiderstände bis zu einem bestimmten Widerstandswert für höhere Verlustleistungen einsetzbar.

Bezeichnungsbeispiel für einen Schichtwiderstand der Baureihe 11:



Drahtwiderstände

Drahtwiderstände bestehen gewöhnlich aus einem *Keramikkörper*, der *Drahtwicklung* und den *Anschlußelementen*. Die Drahtwicklung ist einlagig spiralförmig auf dem Keramikkörper aufgebracht. Er ist daher nicht induktionsfrei. Induktivitätsarme Widerstände werden bifilar oder zweifädig gewickelt. Je nach Widerstandswert und Klasse wird Chromnickel- oder Konstantandraht verwendet. Mit Chromnickeldraht ergeben sich höhere Widerstandswerte, dagegen hat der Konstantandraht den kleineren Temperaturkoeffizienten.
Die Drahtwiderstände werden in folgenden Ausführungen hergestellt: glasiert und zementiert mit Draht- oder Schellenanschluß, lackiert und ungeschützt mit Draht-, Lötfahnen-, Schellen- oder Steckanschluß.
Glasierte und zementierte Drahtwiderstände sind für höhere Belastbarkeit vorgesehen. Die lackierten und ungeschützten Drahtwiderstände werden entsprechend ihren Eigenschaften in zwei Klassen eingeteilt (s. Tabelle 2.73).
Einstellbare Abgriffschellen können bei Widerständen mit Schellenanschluß und bei lackierten oder ungeschützten Widerständen angebracht werden (nur für die Auslieferungstoleranz

Tabelle 2.73: Einteilung der Drahtwiderstände[1])

Kennwert		Klasse 0,5	Klasse 2
Temperaturkoeffizient des Widerstands zwischen 20 °C und 170 °C	höchstens	$1 \cdot 10^{-4}$/°C	$10 \cdot 10^{-4}$/°C
Auslieferungstoleranz	normal	±5%	±10%
	eingeengt	±2% ±1%	±5%

[1]) Bei glasierten und zementierten Drahtwiderständen darf der Temperaturkoeffizient des Widerstands zwischen 20 °C und 300 °C höchstens $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ je °C sein.

±10%), wobei sich aber der Gesamtwiderstand um ≈10% und die Belastbarkeit vermindern. Die Belastbarkeit des Widerstands hängt von der Umgebungstemperatur t ab (s. Bild 2.139).

Beispiel (im Bild 2.139 eingetragen): Ein glasierter Drahtwiderstand (Vollkörper) mit den Abmessungen 11 mm × 44 mm kann bei der Umgebungstemperatur $t = 40\,°C$ mit höchstens 10,5 W belastet werden. Bei $t = 110\,°C$ darf der Widerstand nur noch mit 75% der bei $t = 40\,°C$ möglichen Belastung, also ≈ 8 W, belastet werden.
Drahtwiderstände werden für Nennlasten 0,25 W bis etwa 500 W hergestellt. Die Stufung erfolgt nach der E-Reihe. Widerstandswert und Auslieferungstoleranz sind entweder aufgedruckt oder bei kleineren lackierten Widerständen auf einem Reißstreifen angegeben (Tabelle 2.74).

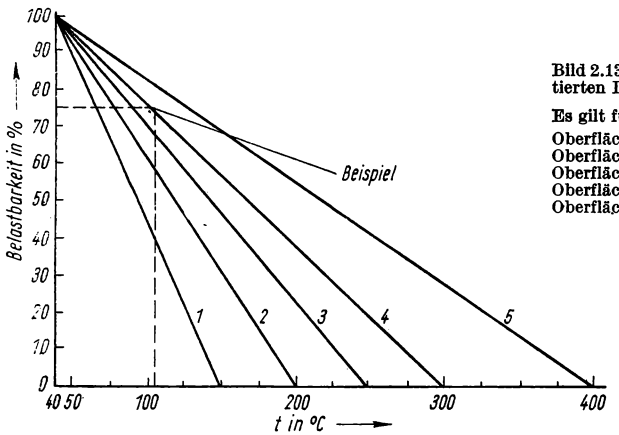


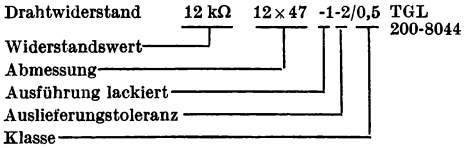
Bild 2.139. Belastungsverminderung von glasierten und zementierten Drahtwiderständen mit Voll- und Rohrkörper

Es gilt für	Vollkörper	Rohrkörper
Oberflächentemperatur 150 °C	Kurve 1	—
Oberflächentemperatur 200 °C	Kurve 2	Kurve 2
Oberflächentemperatur 250 °C	Kurve 3	—
Oberflächentemperatur 300 °C	Kurve 4	Kurve 4
Oberflächentemperatur 400 °C	—	Kurve 5

Tabelle 2.74: Widerstandswerte

Reihe	Auslieferungstoleranz	Oberflächenschutz
E 12	±10%	glasiert, zementiert lackiert, ungeschützt
E 24	±1% ±2% ±5% ±5%	lackiert, ungeschützt zementiert

Bezeichnungsbeispiel für Drahtwiderstand



Einstellbare Drahtwiderstände

Einstellbare Drahtwiderstände nach TGL 24197/02 sind Bauelemente, bei denen eine Wicklung Widerstandsdraht in regelmäßigen Abständen auf einen keramischen Isolierkörper aufgebracht ist und mittels eines Schleifers ein bestimmter Widerstandswert eingestellt werden kann.

2.8.1.3. Veränderliche Widerstände

Schichtdrehwiderstände (nach TGL 24197/02)

Der Schichtdrehwiderstand ist ein Widerstand, der durch kreisförmige Bewegung von Abnehmerkontakten (Schleifer) eine streng monoton steigende Änderung des Widerstandes ermöglicht. Der Widerstandswerkstoff befindet sich als Schicht auf einem wärmebeständigen, elektrisch nichtleitenden Träger. Die wichtigsten elektrischen Forderungen sind in den Tabellen 2.75···2.78 enthalten.
Bei Teilbelastung eines Schichtdrehwiderstandes ist die zulässige Verlustleistung dem belasteten Teil des Gesamtwiderstandes proportional.

Tabelle 2.75: Kenngröße, Nennverlustleistung P_V und Grenzspannung U_g

Kenngröße	Lineare Kurve		Nichtlineare Kurve	
	P_V in W	U_g in V	P_V in W	U_g in V
05	0,05	250	—	—
1	0,1	300	0,05	250
2	0,2	450	0,1	300
3	0,3	600	0,15	350
4	0,5	650	0,25	450
8	1,0	750	0,5	650

Tabelle 2.76: Nennwiderstand[1])

Nennwiderstand für die R-Reihe															
Ω			kΩ									MΩ			
100	250	500	1	2,5	5	10	25	50	100	250	500	1	2,5	5	10
Nennwiderstand für die E-Reihe															
Ω			kΩ									MΩ			
100	220	470	1	2,2	4,7	10	22	47	100	220	470	1	2,2	4,7	10

[1]) Für die Kurven 8···12 (Tabelle 2.78) ist der Nennwiderstand 1,3 MΩ zulässig.

Tabelle 2.77: Zulässige Auslieferungstoleranz des Gesamtwiderstandes vom Nennwert

Nennwiderstand	Qualitätsgruppe 1	2	3
	Auslieferungstoleranz		
< 220 kΩ	±10%	±20%	±30%
≧ 220 kΩ	±20%		

Tabelle 2.78: Kurve und Kurvenverlauf

Kurve	Verlauf der Kurve	Kurvendarstellung, Beschaltung s. Bild[1])
1	linear	2.140a)
2	steigend exponentiell	
3	fallend exponentiell	
6	zweimal linear (Überblender)	2.140b)
7	zweimal exponentiell (Überblender)	
8	lineare Dämpfung mit 1 Anzapfung	2.141 und 2.142a)
9	angehobene Dämpfung mit 1 Anzapfung	
10	angehobene Dämpfung mit 2 Anzapfungen	2.141 und 2.142b)
11	lineare Dämpfung mit 2 Anzapfungen	
12	lineare Dämpfung mit 3 Anzapfungen	2.141 und 2.142c)

[1]) In den Bildern 2.140···2.142 bedeuten: a Anfangslötfahne, b Schleiferlötfahne, c Endlötfahne, Z Anzapfungslötfahne

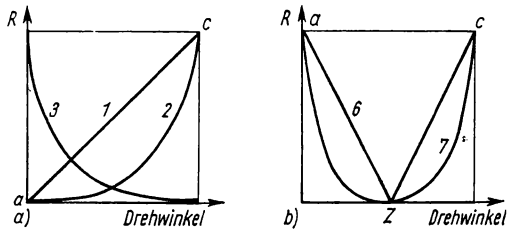


Bild 2.140. Abhängigkeit des Widerstandswertes vom Drehwinkel

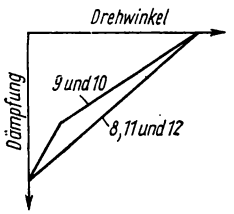


Bild 2.141. Dämpfungsverlauf im beschalteten Zustand

Die höchstzulässige Grenzspannung zwischen den Lötfahnen a und c läßt sich für jede Kenngröße aus der Nennverlustleistung und dem Nennwiderstand errechnen.
Die in Tabelle 2.75 festgelegten Werte dürfen jedoch nicht überschritten werden.

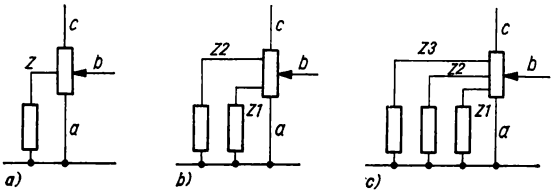


Bild 2.142. Beschaltungen

Durch Anschalten bestimmter Widerstände nach Tabelle 2.79 an die Anzapfungen Z wird größte Annäherung an den geforderten Dämpfungsverlauf erreicht.

Tabelle 2.79: Kennzeichnung von Schichtdrehwiderständen

Widerstand in kΩ	0,1	0,22	0,47	1	2,2	4,7	10	22	47	100
Kennbuchstabe	x	y	z	a	b	c	d	e	f	g

Die Kennbuchstaben werden der Kurvenziffer in der Reihenfolge ihrer Zugehörigkeit zu den Anzapfungen Z 1, Z 2, Z 3, z. B. 12 beg, angehängt. Bei gleich großen anzuschaltenden Widerständen ist der Buchstabe nur einmal anzuhängen.

Kennzeichnung von Schichtdrehwiderständen

Folgende Kennzeichnungen sind am Schichtdrehwiderstand angebracht: Nennwiderstand, Kurve, Herstellerzeichen, Prüfklasse, besondere Oberfläche der Kontaktteile. Die Angabe der Prüfklasse 766 entfällt. Bei Platzmangel kann die Kennzeichnung durch Farbpunkte erfolgen (Tabelle 2.80).

Tabelle 2.80: Bedeutung der Farbpunkte

a) für Nennwiderstand und Kurve

schwarz	△ 0	grün	△ 5
braun	△ 1	blau	△ 6
rot	△ 2	violett	△ 7
orange	△ 3	grau	△ 8
gelb	△ 4	weiß	△ 9

b) für die Prüfklassen

goldener Punkt	△ 554
silberner Punkt	△ 665
nicht gekennzeichnet	△ 766

c) für besondere Oberfläche der Kontaktteile

gelb = vergoldet

Anordnung der Farbpunkte s. Bild 2.143. Der erste Farbpunkt muß mindestens doppelt so groß sein wie die anderen Farbpunkte. Die Angabe für die Kurve 1 kann entfallen.



Bild 2.143. Anordnung der Farbpunkte

Bei Schichtdrehwiderständen mit Netzschalter oder Kleinspannungsschalter in Einschalt- oder Umschaltausführung werden für die Schalter nachstehende Kurzzeichen verwendet:
N für Netzschalter, K für Kleinspannungsschalter, D für Drehschalter, S für Schiebeschalter (eingeschaltet bei axial ge-

drückter Welle), Z für Zugschalter (eingeschaltet bei axial herausgezogener Welle), U für Umschalter, 1; 2; 3 usw. für die Anzahl der Schaltkontakte.
Für N und K sind Daten in Tabelle 2.81 enthalten.

Tabelle 2.81: Daten von Netz- und Kleinspannungsschaltern

Schalter	Kurzzeichen	Nennspannung V	Nennstrom A	Schaltkontaktwiderstand mΩ
Netzschalter	N	250	1	< 20
Kleinspannungsschalter	K	24	0,5	< 40

Die Spitzenspannung darf das $\sqrt{2}$fache der Nennspannung nicht überschreiten. Bei mehrpoligen Schaltern ist jeder Kontakt mit dem Nennwert belastbar.
Schichtdrehwiderstände werden als Einfach-, Doppel- und Tandem-Schichtdrehwiderstände gefertigt.

Drahtdrehwiderstände

Der *Drahtdrehwiderstand* ist ein Widerstand, der durch kreisförmige Bewegung von Abnehmerkontakten (Schleifer) eine stetige Änderung der Widerstandswerte ermöglicht. Er besteht aus einem ringförmigen Wicklungskörper aus Preßstoff oder aus Keramik, der auf dem Wicklungskörper einlagig spiralförmig aufgebrachten Drahtwicklung und den Abnehmerkontakten.

Vorteile gegenüber den Schichtdrehwiderständen:
hohe Belastbarkeit, kleinerer Temperaturkoeffizient.

Nachteile gegenüber den Schichtdrehwiderständen:
nicht induktionsfrei, Nennwiderstand nur bis 25 kΩ (Schichtdrehwiderstand maximal 10 MΩ).

Drahtdrehwiderstände gibt es in den Ausführungen als *Hochlastdrahtdrehwiderstände* (HDD) mit den Oberflächenschutzarten ungeschützt, lackiert, glasiert und zementiert sowie als *Normallast-* (NDD) und *Meßdrahtdrehwiderstände* (MDD) mit lackierter Oberfläche.

2.8.2. Nichtlineare Widerstände

2.8.2.1. Varistoren

Varistoren (spannungsabhängige Widerstände) haben eine nichtlineare Strom-Spannungs-Kennlinie.
Sie werden aus Siliziumkarbid (SiC) unter Zusatz eines Bindemittels gepreßt und anschließend bei hohen Temperaturen gesintert. Der Durchmesser der meist scheibenförmigen Varistoren liegt zwischen 7,5 und 150 mm, während die Dicke 1,2·· 20 mm beträgt. Zwischen den einzelnen Siliziumkarbidkörnern entstehen Kristallkontakte, die man sich als kompliziertes Netzwerk von Gleichrichtern vorstellen kann. Dieses Netzwerk bestimmt die elektrische Charakteristik der Varistoren, d. h., mit Erhöhung der angelegten Spannung nimmt der Widerstandswert ab (Bild 2.144).

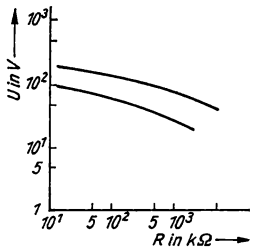


Bild 2.144. Widerstands-Spannungs-Kennlinie

Nach dem OHMschen Gesetz gilt für den Gleichstromwiderstand eines Varistors die Beziehung

$$R = \frac{C}{I^{(1-\beta)}} \quad (\beta < 1)$$

($\beta = 1$ entspricht einem ohmschen Widerstand)

Die Konstante C ist von der Bauform und dem Werkstoff abhängig. Sie ist zahlenmäßig gleich dem Spannungswert, der am Widerstand läge, wenn durch ihn ein Strom von 1 A fließen würde. β ist ein Nichtlinearitätskoeffizient, der die Größe der Spannungsabhängigkeit angibt. Kenngrößen und -werte (in Klammern angegeben) sind Nichtlinearitätskoeffizient β (0,17···0,30), Konstante C (100···3000), maximale Verlustleistung P_{max} (0,5···3,5 W), zulässige Abweichung von der Nennspannung und maximale Betriebstemperatur (bis 110 °C).
Die Kennlinie von Varistoren ist mit der der Gleichrichter vergleichbar, die mit entgegengesetzter Polarität in Reihe oder parallel geschaltet sind. Für die im Bild 2.145 gezeigte Strom-

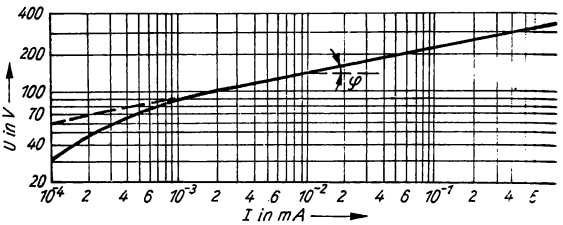


Bild 2.145. Strom-Spannungs-Kennlinie (doppeltlogarithmischer Maßstab)

Spannungs-Kennlinie (doppeltlogarithmischer Maßstab) für $C = 340$ und $\beta = 0{,}21$ ist im Bereich geringer Stromdichten eine Abweichung von der Geraden zu erkennen. Die Kennwerte für C und β gelten nur innerhalb des Bereiches der Stromdichten von 0,1 mA/cm² bis zu 1 A/cm².
Für Schaltungsanordnungen, in denen Varistoren und ohmsche Widerstände gemeinsam verwendet werden (z. B. Spannungsteiler), empfiehlt sich ein linearer Maßstab. Im Bild 2.146 ist die Strom-Spannungs-Kennlinie ($\beta = 0{,}19$) mit dem C-Wert als Parameter dargestellt.

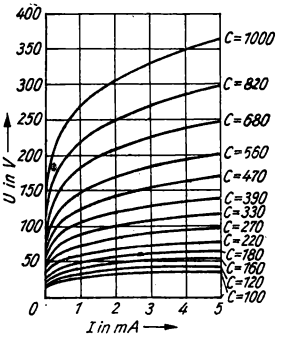


Bild 2.146. Strom-Spannungs-Kennlinie (linearer Maßstab)

Zur Ermittlung der interessierenden Strom- und Spannungswerte vorhandener Varistoren bzw. zur Auswahl derselben benutzt man das Nomogramm Bild 2.147.

Beispiel: Eine Schaltungsanordnung erfordert einen Varistor, an dem bei 5 mA ein Spannungsabfall von 45 V und bei 30 mA einer von 68 V auftreten soll. Die jeweiligen Stromwerte werden durch eine Gerade mit den dazugehörigen Spannungen verbunden (gestrichelte Linien). Beide Geraden treffen sich im Punkt P_1. Eine weitere Gerade verbindet den Punkt P_1 mit dem Wert für $I = 1$ A (der Wert C entspricht dabei dem von U), und auf der Spannungsskala kann der C-Wert als 150 abgelesen werden. Der β-Wert beträgt 0,23.
Sind der C- und β-Wert (in Herstellerdaten angegeben) eines Varistors bekannt, so geht man umgekehrt vor. Der Wert für

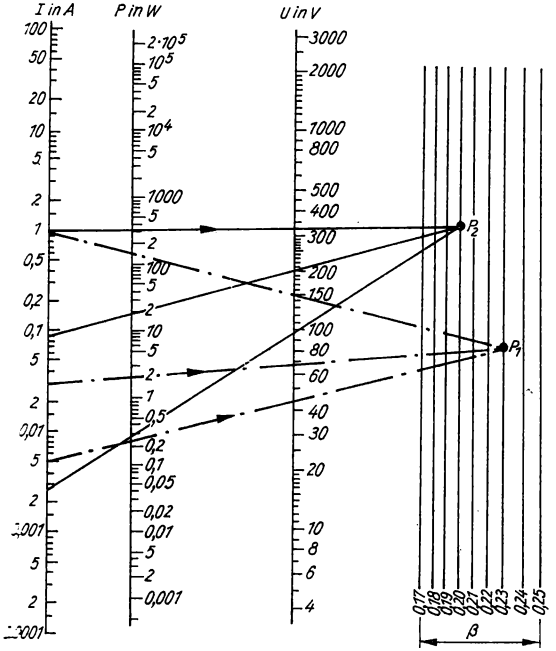


Bild 2.147. *I-P-U*-Nomogramm für Varistoren

$I = 1$ A wird mit dem C-Wert durch eine Gerade verbunden, die bis zur senkrechten Geraden für den bekannten β-Wert verlängert wird. Der Schnittpunkt P_2 ist Ausgangspunkt für alle Arbeitsgeraden. Das Verhalten eines Varistors mit dem C-Wert von 330 und einem β-Wert von 0,20 (volle Linien) ist im Nomogramm eingezeichnet. Bei einer Spannung von 100 V fließt ein Strom von 2,8 mA (Belastung 0,3 W). Für 200 V fließt bereits ein Strom von 90 mA (Belastung 19 W).
Die Belastung wird durch die maximal zulässige Betriebstemperatur bestimmt. Wegen auftretender Schäden an den Lötstellen darf die Betriebstemperatur von 110 °C nicht überschritten werden, obwohl die Varistoren Temperaturen bis 300 °C ertragen können.
Betreibt man Varistoren mit Wechselspannung bzw. -strom, so führt die nichtlineare Kennlinie zu Verzerrungen der Strom- oder Spannungskurve. Varistoren wirken bezüglich Material und Aufbau als verlustbehaftete Kapazitäten. Die maximale Einsatzfrequenz von etwa 5 kHz darf nicht überschritten werden. Bild 2.148 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie eines Varistors bei verschiedenen Frequenzen.

Verwendungszweck: Zum Schutz von Bauelementen und Geräten gegen Überspannungen, zur Spannungsstabilisierung,

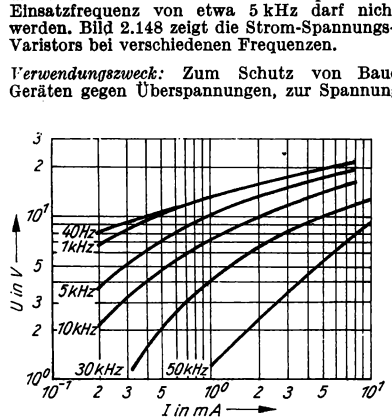


Bild 2.148. Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Frequenzen

Funkenlöschung an Kontakten, Entstörung von kleinen Gleichstrommotoren, Spannungserzeugung aus Hochspannungsimpulsen, Erhöhung der Spannungsempfindlichkeit von Relais.

2.8.2.2. Thermistoren

Thermistoren sind temperaturabhängige Widerstände mit nichtlinearen Strom-Spannungs-Kennlinien. Es ist gleichgültig, ob der Temperaturwert durch Erwärmung infolge des durchfließenden Stromes oder durch die Temperatur der Umgebung entsteht. Dabei können große Temperaturkoeffizienten erreicht werden, die sowohl positiv als auch negativ sein können.

Thermistoren mit negativem Temperaturkoeffizienten (Heißleiter)

Charakteristisch ist die große negative Temperaturabhängigkeit ihres elektrischen Widerstandes, d. h., der Widerstand nimmt im Vergleich zu einem Kupferwiderstand mit zunehmender Erwärmung ab (Bild 2.149), wobei der Temperaturkoeffizient je nach Widerstandstyp $-3 \cdots -6$ %/K betragen kann.

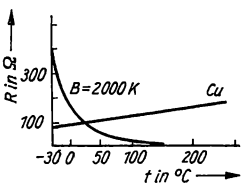


Bild 2.149. Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Heißleiters im Vergleich zu einem Kupferdraht

Heißleiter werden aus Metalloxiden und oxidischen Mischkristallen hergestellt, die, nach Zusatz plastischer Bindemittel zu Scheiben, Zylindern, Röhren oder Perlen geformt, bei hohen Temperaturen gesintert werden. Durch den Sinterprozeß werden die geforderten elektrischen Eigenschaften sowie die mechanische Verfestigung erreicht. Durch die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe lassen sich die Kennwerte stark beeinflussen.
Für den Widerstandswert von Heißleitern gilt annähernd die Beziehung

$$R = A\, e^{\frac{B}{T}}$$

R Widerstand in Ω bei der Temperatur T; A Mengenkonstante in Ω (abhängig von Bauform und Werkstoff); B Energiekonstante in K (abhängig vom Werkstoff), die die Größe der Temperaturabhängigkeit bei 20 °C bestimmt; T absolute Temperatur in K.

Beispiel: Ein Heißleiter hat entsprechend den Herstellerdaten bei einer Temperatur $t_1 = 20$ °C einen Widerstand $R_1 = 2$ kΩ. Der B-Wert beträgt 2470 K. Gesucht sei der Widerstand R_2 bei einer Temperatur $t_2 = 100$ °C.
Zur Berechnung verwendet man folgende Gleichung:

$$R_2 = R_1\, e^{B\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}$$

$$R_2 = 2\,000\ \Omega \cdot e^{2470\ \mathrm{K}\left(\frac{1}{373\ \mathrm{K}} - \frac{1}{293\ \mathrm{K}}\right)}$$

$$R_2 = 2\,000\ \Omega \cdot e^{-1{,}81} = 2\,000 \cdot 0{,}163\,7\ \Omega$$

$$R_2 = 327\ \Omega$$

Mit Hilfe des Nomogramms Bild 2.150 kann R_2 für t_2 einfach ermittelt werden. Durch Ablesen des Verhältnisses $R_1 : R_2$ im Punkt P_1 läßt sich der gesuchte Widerstand R_2 errechnen:

$$\frac{R_{20\,°\mathrm{C}}}{R_t} = \frac{R_1}{R_2} = 6{,}1 \qquad R_2 = \frac{2\,000\ \Omega}{6{,}1}$$

$$R_2 = 326\ \Omega$$

Nach Aufnahme von zwei Meßwerten für R_1 und R_2 bei unterschiedlichen Temperaturen T_1 und T_2 kann die Energie-

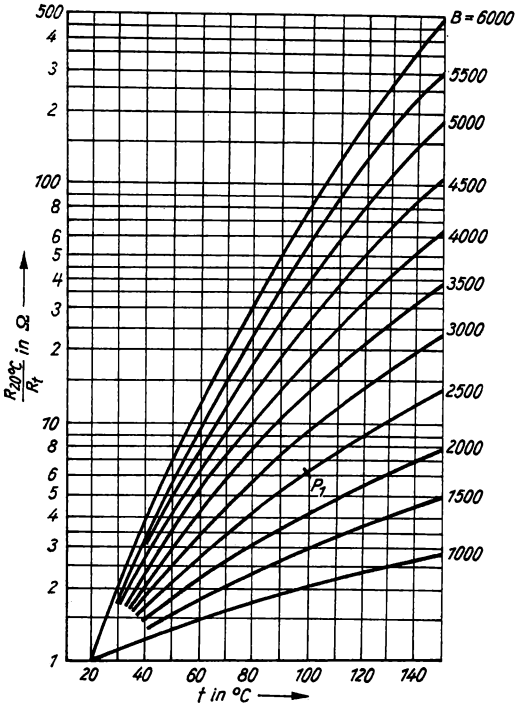


Bild 2.150. Nomogramm zur Ermittlung des Widerstandswertes von Heißleitern

konstante B ebenfalls mit Hilfe des Nomogramms abgelesen oder mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$B = \frac{1}{\lg e} \cdot \frac{\lg R_1 - \lg R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Mit obigen Beispielwerten folgt

$$B = 2{,}3 \cdot \frac{3{,}3010 - 2{,}5132}{0{,}733 \cdot 10^{-3}}\ \mathrm{K}$$

$$B = 2470\ \mathrm{K}$$

Die stationäre Strom-Spannungs-Kennlinie eines Heißleiters bei konstanter Umgebungstemperatur zeigt Bild 2.151 (doppeltlogarithmischer Maßstab). Die Werte von U und I sind erst

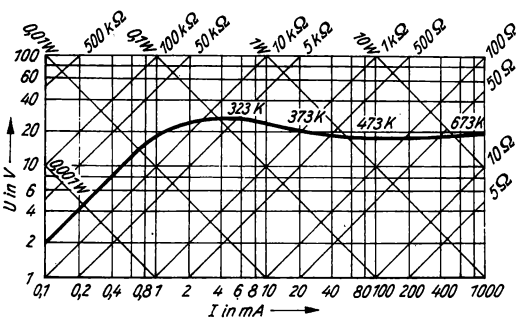


Bild 2.151. Statische Strom-Spannungs-Kennlinie eines Heißleiters (doppeltlogarithmischer Maßstab)

dann abzulesen, wenn sich ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat, d. h., wenn die abgegebene gleich der zugeführten Leistung ist.
Eine große Oberfläche der Heißleiter bewirkt eine Verschiebung des Maximums der Kennlinie in Richtung größerer Strom- und Spannungswerte.

Anwendung: als *Anlaßheißleiter* zur Unterdrückung des Einschaltstromstoßes in Röhrenheizkreisen von Rundfunk- und Fernsehempfängern sowie Einsatz in Verzögerungsschaltungen bei Relais; als *Kompensationsheißleiter* zur Temperaturstabilisierung von Transistorschaltungen, für Zwecke der Temperaturregelung und -messung sowie zur Kompensation von positiven Temperaturkoeffizienten; als *Meßheißleiter* zur Temperaturmessung und -regelung, Leistungsmessung im UHF-Gebiet, Messung von Strahlungen relativ großer Wellenlänge (z. B. Wärmestrahlen) sowie als *Mikroheißleiter* für Strömungs- und Vakuummessungen.

Thermistoren mit positivem Temperaturkoeffizienten (Kaltleiter)

Im Gegensatz zu Heißleitern haben Kaltleiter einen positiven Temperaturkoeffizienten, d. h., der Widerstand nimmt mit steigender Temperatur zu. Der positive Temperaturkoeffizient des Kaltleiters ist wie beim Heißleiter selbst temperaturabhängig und nur innerhalb eines relativ eng umgrenzten Temperaturintervalls vorhanden, wobei er dort je nach Widerstandstyp 6···60%/K betragen kann. Unterhalb und oberhalb der Grenztemperaturen verhält sich der Kaltleiter wie ein Heißleiter.
Kaltleiter bestehen aus gesintertem Bariumtitanat, das mit Metallsalzen bzw. -oxiden dotiert ist und ein polykristallines Gefüge besitzt. Sie haben meist scheibenförmige Gestalt und sind zum Schutz gegen atmosphärische Einflüsse lackiert.
Eine mathematische Formulierung des Zusammenhanges zwischen Temperatur und Widerstand eines Kaltleiters läßt sich nicht angeben, so daß man auf Kennliniendarstellungen angewiesen ist (Bild 2.152).

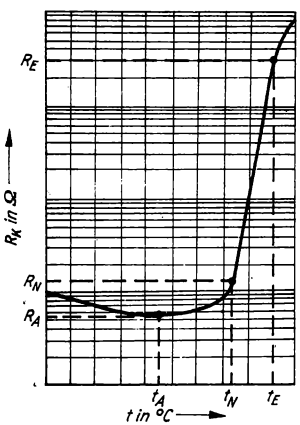


Bild 2.152. Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Kaltleiters

Unterhalb der Anfangstemperatur t_A ist der Temperaturkoeffizient negativ. Mit Erreichen seines niedrigsten Widerstandswertes R_A beginnt für den Kaltleiter bei t_A der Temperaturbereich mit positivem Temperaturkoeffizienten. Der Anfang des steilen Widerstandsanstieges ist gekennzeichnet durch die Nenntemperatur t_N, wobei der Nennwiderstand $R_N = 2R_A$ ist. Realisierbar sind derzeit Kaltleiter mit Nenntemperaturen von 30···180 °C. Der Bereich des steilen Widerstandsanstieges endet bei der Temperatur t_E mit dem Widerstand R_E. Mit weiterer Erhöhung der Temperatur wird der Temperaturkoeffizient wieder negativ. Beim Anschalten des Kaltleiters an Wechselspannung nimmt der Widerstand R_E mit steigender Frequenz ab, während er sich im Bereich R_A bis R_N nur wenig ändert.
Die stationäre Strom-Spannungs-Kennlinie des Kaltleiters bei konstanter Umgebungstemperatur zeigt Bild 2.153 (doppelt-

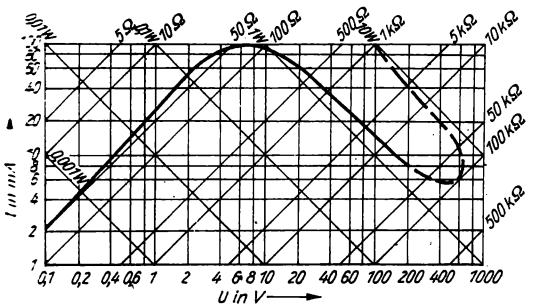


Bild 2.153. Statische Strom-Spannungs-Kennlinie eines Kaltleiters (doppeltlogarithmischer Maßstab)

logarithmischer Maßstab), wobei man alle interessierenden Daten gleichzeitig ablesen kann. Die *U-I*-Werte sind erst nach Einstellung des Temperaturgleichgewichtes abzulesen.
Bis zum Erreichen des Strommaximums verhält sich der Kaltleiter zunächst wie ein ohmscher Widerstand. Infolge Eigenerwärmung steigt der Widerstandswert dann bei weiterer Spannungserhöhung stark an, während der Strom wieder kleiner wird und die aufgenommene Leistung annähernd konstant bleibt. Mit Überschreiten der Endtemperatur des Kaltleiters steigt der Strom bei weiterer Spannungserhöhung lawinenartig an. Eine in diesem Bereich mit einem Kaltleiter ausgerüstete Schaltungsanordnung kann unstabil arbeiten und zur Zerstörung des Kaltleiters durch Überlast führen.

Anwendung: bei Erwärmung durch die Umgebung für Temperaturmeß- und -regelaufgaben (Bereich t_N bis t_E), z. B. Abschalten der Spannung bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur; bei Eigenerwärmung zur Flüssigkeitsniveaukontrolle, als Stromkonstanthalter, Überlastschutz, Zeitglied, zum Start von Gasentladungslampen, zur Steuerung der Anlauf-Hilfsphase in Wechselstrommotoren.

2.9. Kondensatoren

2.9.1. Allgemeines

Begriffe

Kondensatoren sind elektrische Bauelemente bzw. Betriebsmittel. Sie bestehen aus elektrisch leitenden Belägen, die durch einen isolierenden Stoff getrennt sind.

Ausheilende Kondensatoren sind solche, bei denen eine Durchbruchstelle im Dielektrikum unwirksam gemacht werden kann, z. B. dadurch, daß die Beläge in ihrer Umgebung an der Durchbruchstelle verdampft werden, z. B. Metallpapierkondensatoren.

Selbstheilende Kondensatoren sind ausheilende Kondensatoren, deren aufgespeicherte Energie zum Ausheilen ausreichen muß. Eine Energiezufuhr von außen ist zum Ausheilen nicht notwendig.

Kapazitätshub ΔC ist die Differenz zwischen Kapazitätswert bei einem beliebigen Drehwinkel und der Anfangskapazität.

Kapazitätstoleranz ist die höchstzulässige Abweichung des Istwertes der Kapazität von der Nennkapazität.

Kapazitäts-Temperaturbeiwert α_C ist die auf 1 K bezogene durchschnittliche Änderung der Kapazität innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches $\vartheta_1 \cdots \vartheta_2$. Der Temperaturbeiwert ist i. allg. temperaturabhängig.

Nennspannung U_n ist die Gleichspannung oder der Effektivwert der sinusförmigen Spannung bei Nennfrequenz, für die der Kondensator benannt ist. Ein Kondensator kann für unterschiedliche Anwendungen auch mehrere Nennspannungen haben, z. B. eine Nenngleich- und eine Nennwechselspannung.

Spitzenspannung U_s ist der höchstzulässige Scheitelwert der Spannung, der am Kondensator auftreten darf.

Dauergrenzspannung U_g ist die höchstzulässige Spannung, mit welcher ein Kondensator dauernd betrieben werden darf. Bei Wechselspannungs-Kondensatoren bezieht sie sich auf die Nennfrequenz, bei Gleichspannungs-Kondensatoren auf eine Temperatur.

Verlustfaktor tan δ ist der Quotient von Wirkleistung zu Blindleistung. Werden Isolations-, dielektrische und Nachwirkungsverluste in einem Verlustwiderstand zusammengefaßt und dem verlustfreien Kondensator parallel geschaltet, so kann der Verlustwinkel auch grafisch ermittelt werden (Bild 2.154). In der Starkstromtechnik wird der Begriff Leistungsfaktor cos φ verwendet.

Temperaturbereich ist der Bereich zwischen der unteren und der oberen Grenztemperatur.

Relative Dielektrizitätszahl ε_r ist die Zahl, die angibt, um wievielmal größer die Kapazität eines Kondensators wird, wenn statt eines Vakuums (Luft) ein Dielektrikum mit ε_r verwendet wird. (Relative Dielektrizitätszahlen verschiedener Stoffe s. 1.6.4.2.)

Zur Kapazitätsbestimmung von Kondensatoren nach der Formel $C = 1/(2\pi f X_C)$ benutzt man das Nomogramm Bild 2.155.

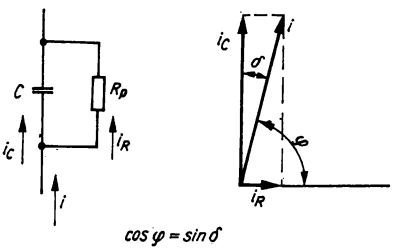


Bild 2.154. Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm eines verlustbehafteten Kondensators

Tabelle 2.82: Dauergrenzspannung U_g in Abhängigkeit von der Kondensatortemperatur

Obere Grenztemperatur ϑ_{max} in °C	30	40	50	55	60	70	80	85	90	95	100
U_g = Faktor · U_n											
Papierkondensatoren		1		0,94		0,86		0,65			0,3
Metallpapierkondensatoren		1		0,94		0,86		0,65			
Polystyrolfolie-Kondensatoren											
Gleichspannungsbelastung	1	1	0,94		0,90	0,82	0,70				
Wechselspannungsbelastung	1	0,97	0,91		0,83	0,71	0,54				
Polyesterfolie-Kondensatoren								1	0,95	0,90	0,85
Polykarbonatfolie-Kondensatoren								1	0,92	0,85	0,77

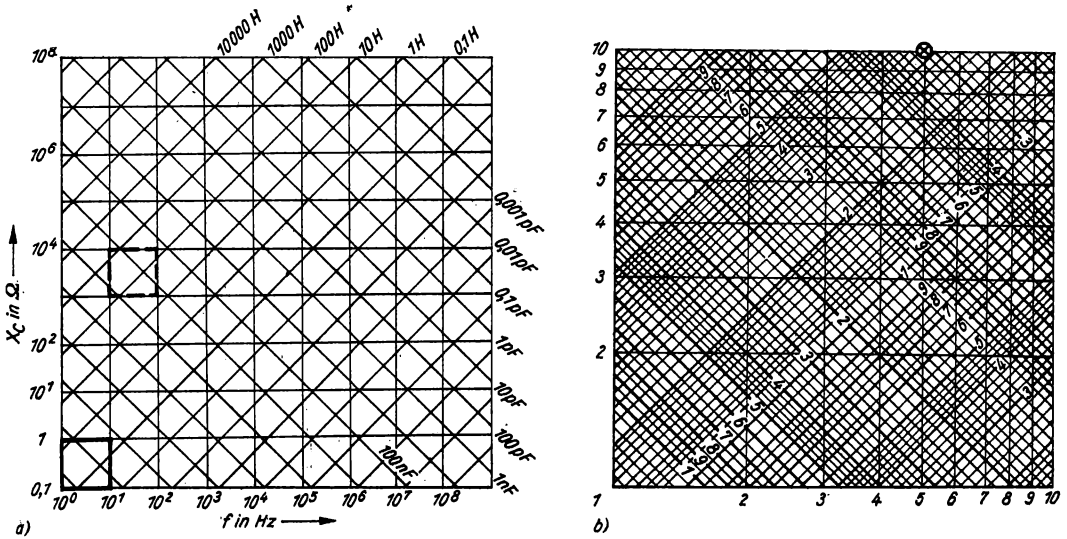


Bild 2.155. Nomogramm zur Kapazitätsbestimmung von Kondensatoren
a) Blindwiderstände und Frequenzen bei Wechselstrom, b) vergrößerte Darstellung eines Quadrates

Tabelle 2.83: Verlustfaktor

Frequenz	50 Hz	800 Hz	1 kHz	10 kHz	1 MHz
Verlustfaktor (in 10^{-3} bei 20°C)					
Papierkondensatoren		max. 12			
Metallpapierkondensatoren ≦ 10 µF/> 10 µF	−/7···8	10···12/−			
Polyesterfolie-Kondensatoren			10	25	
Polystyrolfolie-Kondensatoren			0,3···0,8		0,8···2
Polykarbonatfolie-Kondensatoren			3···12		
Lackkondensatoren		20···35			
Al-Elektrolyt-Kondensatoren					
Typ I glatt/rauh	15···60/20···80				
Typ II rauh	12···80				

Beispiel: Gegeben sei $f = 50$ Hz, $X_C = 1$ kΩ, gesucht ist C. Durch Festlegung des Quadrates [im Bild 2.155a) gestrichelt eingezeichnet] und mit Hilfe der vergrößerten Darstellung [Bild 2.155b), sie gilt für jedes Quadrat] kann die Kapazität mit $C = 320$ nF abgelesen werden.
Für einige Kondensatorenarten werden in Tabelle 2.82 die Dauergrenzspannungen und in Tabelle 2.83 die Verlustfaktoren angegeben.

2.9.2. Festkondensatoren

Papierkondensatoren (nach TGL 200-8276)

Papierkondensatoren haben Beläge aus Metallfolien und ein Dielektrikum aus Spezialpapieren, die mit Ölen, Wachsen oder Kunstharzen imprägniert sind.
Papierkondensatoren für Gleichspannung sind speziell für elektrostatische Spannungsbeanspruchung bemessen und gebaut. Sie haben nur eine Nenngleichspannung, keine Nennfrequenz und keinen Nennstrom. Für reine und überlagerte Wechselspannungsbeanspruchung sind sie jedoch geeignet.
Stufung der Nennkapazitätswerte entsprechend der E-Reihe (vgl. Tabelle 2.71):

100; 150; 220; 330; 470; 680; 1000; 2200; 4700 pF und 0,01; 0,022; 0,047; 0,1; 0,22; (0,25); 0,47; (0,5); 1; 1,5; 2; 2,2; 3,3; 4; 4,7; 6,8; 10 µF.

(Klammerwerte nur für prismatische Ausführung.)

Die Kapazitätstoleranz beträgt ±20% bei Nennkapazitäten < 0,1 µF und ±10% bei Nennkapazitäten ≧ 0,1 µF. Bei Miniaturausführung beträgt sie generell 20%.
Die Temperatur- und Frequenzabhängigkeit der Kapazität zeigt Bild 2.156. Der Temperaturbeiwert beträgt im Mittel ungefähr 1‰/K und gilt zusätzlich zur Kapazitätstoleranz.

Nenngleichspannungen (bei Kondensatortemperatur +40°C):
63; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600 V.

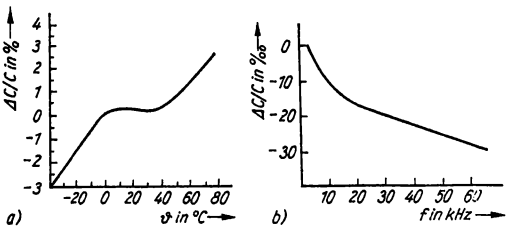


Bild 2.156. Abhängigkeit der Kapazität bei Papierkondensatoren
a) von der Temperatur, b) von der Frequenz

Bei Überlagerung von Wechselspannung darf der Scheitelwert der Gleichspannung mit überlagerter Wechselspannung im Dauerbetrieb die Dauergrenzspannung nicht überschreiten. Der Scheitelwert der der Gleichspannung überlagerten Wechselspannung darf bei Frequenzen bis zu 300 Hz nicht mehr als $0{,}2\,U_n$ betragen.
Der Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz wird im Bild 2.157 gezeigt (Parameter: verschiedene Temperaturen).

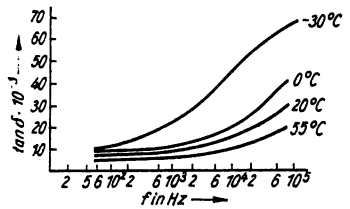


Bild 2.157. Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Temperaturen (Richtwerte) bei Papierkondensatoren

Papierkondensatoren werden dort eingesetzt, wo an die durch Alterung und Temperaturwechsel bedingte Kapazitätsänderung, an den Verlustfaktor sowie an die Isolation keine hohen Forderungen gestellt werden müssen, vorzugsweise in der Rundfunk-, Fernseh- und Verstärkertechnik. Sie dienen z. B. als Siebkondensatoren für Gleichspannungen, als Kopplungs-, Gegenkopplungs-, Trenn- und Schutzkondensatoren, als Ableitkondensatoren zur Unterdrückung unerwünschter Schwingungen.
Kondensatoren bis 1,6 kV Nenngleichspannung finden als Betriebsmittel der Nachrichtentechnik sowie im Gerätebau der Informations-, Meß- und Regeltechnik hauptsächlich für Kopplung, Siebung, Stabilisierung sowie als Zeitglieder Verwendung.

Kennzeichnung: Herstellerzeichen, Nennkapazität, Nennspannung, Prüfklasse, Standardnummer, Herstellungsdatum (Monat/Jahr), Gütezeichen des ASMW.

Metallpapierkondensatoren (nach TGL 200-8277)

Metallpapierkondensatoren (MP) sind selbstheilende Kondensatoren mit dünnen, auf Papier aufgedampften Metallbelägen und imprägniertem Papier als Dielektrikum.

Nennkapazitätswerte (auf 20 °C bezogen):

0,039; 0,047; 0,056; 0,068; 0,1; 0,22; 0,33; 0,47; 1; 2; 2,5; 4; 6; 8; 10; 20; 40 µF.

Die Kapazitätstoleranzen betragen ±20% für Nennkapazitäten < 1 µF und ±10% für Nennkapazitäten ≧ 1 µF.
Die Temperatur- und Frequenzabhängigkeit der Kapazität zeigt Bild 2.158. Der Temperaturbeiwert beträgt etwa ≈0,5‰/K.

Nenngleichspannungen (bei Kondensatortemperatur +40 °C):

50; 160; 250; 400; 630 V.

Werden n Kondensatoren gleicher Kapazität in Reihe geschaltet und sind sie gegeneinander und gegen Erde ausreichend isoliert, dann kann als Nennspannung jedes einzelnen Kondensators der n-te Teil der Nennspannung der Kondensatorkette gewählt werden. Ist keine Isolation vorhanden, so muß jeder Kondensator für die volle Nennspannung der Kondensatorkette ausgelegt werden.

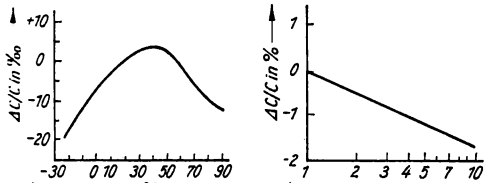


Bild 2.158. Abhängigkeit der Kapazität bei Metallpapierkondensatoren
a) von der Temperatur, b) von der Frequenz

Den Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Bild 2.159.

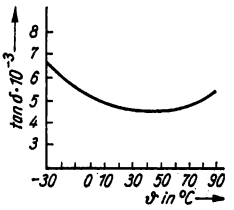


Bild 2.159. Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Temperatur bei Metallpapierkondensatoren

Anwendung: wie Papierkondensatoren, wenn große Kapazitäten bei kleinem Volumen und geringen elektrischen Verlusten benötigt werden oder wenn es auf Beständigkeit gegen unvermeidliche Überspannungsstöße ankommt und Elektrolytkondensatoren nicht einsetzbar sind. In dichter Ausführung sind sie auch in feuchtigkeitsgefährdeten Räumen einsetzbar.

Kennzeichnung: wie Papierkondensatoren, zusätzlich Angabe der Schaltung bei Zwei- und Mehrfachkapazitäten.

Kunststoffolie-Kondensatoren

In Kunststoffolie-Kondensatoren dienen Kunststoffolien als Dielektrikum. Bei den metallisierten Kunststoffolie-Kondensatoren sind die Elektroden als Metallbeläge (meist Aluminium) auf die Kunststoffolien aufgedampft. Man unterscheidet auf Grund des Dielektrikums metallisierte Polystyrolfolie-, Polyesterfolie-, Polykarbonatfolie- und Lackkondensatoren. Diese Kondensatoren sind selbstheilende Kondensatoren. Sie werden z. B. für Betriebsmittel der Informations-, Meß-, Regel- und Nachrichtentechnik verwendet.

Kennzeichnung: mindestens Kurzzeichen, z. B. MKC; Nennkapazität und zulässige Abweichung, Nenngleichspannung, Standardnummer.

Polystyrolfolie-Kondensatoren (nach TGL 200-8281)

Polystyrolfolie-Kondensatoren (MKS) haben als Dielektrikum eine Kunststoffolie aus Polystyrol (Handelsname: Styroflex). Sie werden dort eingesetzt, wo es auf geringste frequenz- und temperaturabhängige Verluste und höchste Kapazitätskonstanz ankommt. Das ist speziell in HF-Kreisen bei frequenzbestimmenden Gliedern der Fall. Wegen der hohen Isolation werden Polystyrolfolie-Kondensatoren in elektrischen Zeitgliedern als Ladekondensatoren und häufig wegen des negativen Temperaturbeiwertes und des geringen Verlustfaktors in Schwingkreisschaltungen (Bandfiltern, Spulensätzen) verwendet.

Nennkapazitäten:

Kondensatoren, zylindrisch freitragend: 10 pF···22 nF nach Reihe E 12;
Hochspannungskondensatoren: 22 pF; 47 pF; 100 pF···10 nF nach Reihe E 12;
Kondensatoren für gedruckte Schaltungen: 47 pF···59 nF für Kapazitäten ≦ 3 nF jeder Wert, > 3···10 nF auf volle 5 und > 10 nF auf volle 10 gerundet.

Kennzeichnung der Nennkapazität: unverschlüsselt in pF.

Die Kapazitätstoleranzen betragen ±20; ±10; ±5; ±2,5%, bei Kapazitäten für gedruckte Schaltungen zusätzlich ±2; ±1; ±0,5%. Kennzeichnung durch Buchstaben: F ≙ ±1 %; H ≙ ±2,5%; I ≙ ±5%; K ≙ ±10%; M ≙ ±20%.
Der Temperaturbeiwert der Kapazität ist reproduzierbar und negativ (0···200 · 10^{-6}/K).
Nenngleichspannungen (bei Kondensatortemperatur +40 °C) nach Tabelle 2.84 sowie 3; 6,3; 10 kV.

Tabelle 2.84: Farbkode für Polystyrolfolie-Kondensatoren

Nenngleichspannung in V	25	63	160	250	400	630	1000
Farbkode	blau	gelb	rot	–	braun	schwarz	orange

Die Farbringe sind an der Anschlußseite des Schirmbelages angebracht.
Die höchstzulässige effektive Wechselspannung beträgt $0{,}4U_g$ für Nennspannungen 25 und 63 V und $0{,}2U_g$ bei 160···1000 V. Für die höchste Frequenz, bis zu der der Kondensator mit der zulässigen Wechselspannung betrieben werden darf, gilt

$$f = \frac{I_{max}}{2CU_{zul}}$$

f Frequenz in Hz, C Kapazität in F, U Wechselspannung in V. Wechselspannungen $\geqq$ 200 V über 500 kHz sind nicht zulässig.

Polyesterfolie-Kondensatoren (nach TGL 26980)

Polyesterfolie-Kondensatoren haben als Dielektrikum Kunststoffolie aus Polyäthylenterephthalat und werden dort eingesetzt, wo kleines Volumen und große Toleranzen gefordert werden. Die bisher übliche Erzeugniskennzeichnung MKT wird durch einen Punkt am Beginn des Schriftbildes ersetzt.

Nennkapazitäten: 100 pF···1 µF nach Reihe E 6

Kennzeichnung nach IEC-Empfehlung 62 mit p ≙ Pikofarad, n ≙ Nanofarad, µ ≙ Mikrofarad.

Kapazitätswerte von 100···680 pF werden mit p (z. B. 100 p), die von 1000···680000 pF mit n (z. B. 10 n, 47 n) und der Kapazitätswert von 1 µF wird mit µ (z. B. 1 µ) gekennzeichnet.

Bei Kapazitäten 1 nF···1 µF beträgt die Kapazitätstoleranz ±5 (≙ I); ±10 (≙ K); ±20% (≙ M), bei Kapazitäten < 1 nF nur ±10 und ±20%.

Der Temperaturbeiwert ist temperaturabhängig und besitzt den im Bild 2.160 dargestellten Verlauf (Richtwerte).

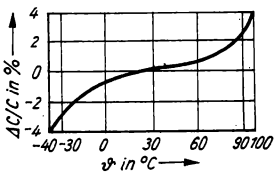


Bild 2.160. Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur bei Polyesterfolie-Kondensatoren

Nenngleichspannungen (bei Kondensatortemperatur +40°C), in Klammern zulässige effektive Wechselspannung bei 50 Hz:
160 (110); 250 (175); 630 (250); 1000 (250) V.

Kennzeichnung durch Farbringe am Schirmbelag: 160 V — rot; 250 V — grün; 630 V — schwarz; 1000 V — orange.
Wechselspannungsangaben gelten nur für +40°C und 50 Hz. Bei höheren Temperaturen und Frequenzen sind Spannungsherabsetzungen erforderlich.
Bei Belastung mit Wechselspannung (Sinusform) darf der Effektivwert der Wechselspannung $0{,}63U_g$ bei einer Frequenz von 50 Hz nicht überschreiten. Das gilt auch für die Überlagerung von Wechselspannung.

Polykarbonatfolie-Kondensatoren (nach TGL 200-8447)

Polykarbonatfolie-Kondensatoren (MKC) haben als Dielektrikum Polykarbonatfolie (Handelsname: Mokrofol).
Sie werden insbesondere in der Rundfunk-, Fernseh- und Phonoindustrie eingesetzt.

Nennkapazitätswerte sind:
0,47; 0,68; 1; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10; 15 µF.

Die Kapazitätstoleranz beträgt ±20%.
Die auf 20°C bezogene Kapazitätsänderung infolge des Temperaturbeiwertes ist werkstoffabhängig und beträgt innerhalb des zulässigen Betriebstemperaturbereiches höchstens ±1%.
Nenngleichspannung (bei Kondensatortemperatur +40°C): 100 V.
Bei Belastung mit Wechselspannung (Sinusform) darf der Effektivwert der Wechselspannung $0{,}63U_g$ bei einer Frequenz von 50 Hz nicht überschreiten.

Lackkondensatoren (nach TGL 200-8283)

Lackkondensatoren (MKL) haben Lackfolien aus Zellulosederivaten als Dielektrikum.

Nennkapazitätswerte (auf 800 Hz bezogen) sind:
0,47; 0,68; 1; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10 µF.

Die zulässige Kapazitätstoleranz beträgt ±20%.
Die Temperaturabhängigkeit der Kapazität für Lackkondensatoren zeigt Bild 2.161.

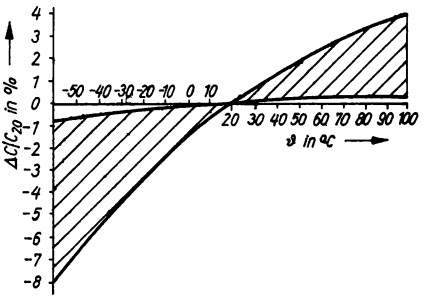


Bild 2.161. Temperaturabhängigkeit der Kapazität für Lackkondensatoren

Die Nenngleichspannung beträgt 63 V und ist auf eine Kondensatortemperatur von 70°C bezogen. Bei Überlagerung von Wechselspannung darf die Summe aus Gleichspannung und Scheitelwert der überlagerten Wechselspannung im Dauerbetrieb die Nennspannung nicht überschreiten. Die überlagerte Wechselspannung bei 50 Hz darf dabei nur max. $0{,}35U_n$ als Grenzwert sein.
Die Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Temperatur zeigt Bild 2.162. Der Temperaturbereich für den Betrieb der Lackkondensatoren beträgt −40···+70°C.
Wegen der kleinen Abmessungen und des geringen Gewichtes sind Lackkondensatoren für gedruckte Schaltungen der Transistor-, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik besonders geeignet.

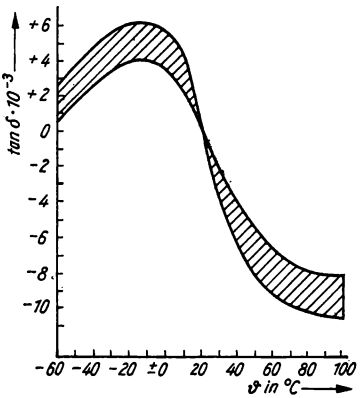


Bild 2.162. Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Temperatur bei Lackkondensatoren

Keramikkondensatoren

Keramische Kondensatoren werden als *Keramik-Kleinkondensatoren, Leistungskondensatoren* und *Trimmer* (s. 2.9.3.) hergestellt. Sie besitzen als Dielektrikum keramische Werkstoffe. Die kapazitätsbestimmenden Elektroden bestehen aus aufgetragenen oder eingebrannten Metallschichten. Je nach Ausführungsart erfolgt ein Oberflächenschutz durch Lackierung oder Umhüllung.

Keramik-Kleinkondensatoren (nach TGL 31282/01)

Entsprechend der chemischen Zusammensetzung und dem elektrischen Verhalten des Dielektrikums unterscheidet man:

Kondensatoren vom Typ I (NDK-Kondensatoren mit niedriger Dielektrizitätszahl), bei denen geringe Verluste und hohe Stabilität der Kapazität wesentlich sind. Des weiteren wird bei allen Nenntemperaturbeiwerten unterschieden in Typ I B (normale Toleranz des Temperaturbeiwertes der Kapazität) und Typ I A (gegenüber Typ I B eingeschränkte Toleranz des Temperaturbeiwertes der Kapazität) *und* Kondensatoren vom Typ II (HDK-Kondensatoren mit hoher Dielektrizitätszahl), bei denen geringe Verluste und hohe Stabilität der Kapazität von untergeordneter Bedeutung sind.

Das Dielektrikum der NDK-Kondensatoren ist auf Titandioxid-Basis und das der HDK-Kondensatoren auf Basis von Erdalkali-Titanen aufgebaut.

Der maximal zulässige Verlustfaktor darf die Werte nach Tabelle 2.85 nicht überschreiten.

Tabelle 2.85: Verlustfaktorwerte von Keramik-Kleinkondensatoren bei 20 °C

Nennkapazität C	Verlustfaktor tan δ in 10^{-3}		
	Typ I		Typ II
pF	$U_n > 63$ V	$U_n \leqq 63$ V	
< 10	$\frac{25}{C}$	$1{,}5\,\frac{25}{C}$	–
10···50	$\frac{145 - 2C}{45}$	$1{,}5\,\frac{145 - 2C}{45}$	–
> 50	1	1,5	35

In den Formeln ist die Kapazität C in pF einzusetzen.

Vorzugswerte der Nennspannungen sind: 63; 100; 160; 250; 400; 500; 630 V und die für Berührungsschutz-Kondensatoren 250 und 400 V.

Das Temperaturverhalten der Kapazität bei Kondensatoren vom Typ I ist durch den jeweiligen werkstoffkennzeichnenden Temperaturbeiwert charakterisiert (Tabelle 2.86). Der Nennwert des Temperaturbeiwertes ist infolge von unvermeidbaren tolerierten Abweichungen bei den Herstellungsprozessen der Kondensatoren sowie der Streukapazitäten, besonders bei kleinen Kapazitätswerten, mit Toleranzen behaftet.

Tabelle 2.86: Temperaturbeiwerte α_C – Typ I

Bezeichnung	Nenntemperaturbeiwert α_C $10^{-6}\,K^{-1}$	Farbkennzeichen
P 100	+100	ohne
NP 0	±0	schwarz
N 033	−33	braun
N 075	−75	rot
N 150	−150	orange
N 470	−470	hellblau
N 750	−750	violett
N 1500	−1500	dunkelblau

P 100 kann nach Wahl des Herstellers auch rot/violett gekennzeichnet sein. Unterstrichene Nenntemperaturbeiwerte sind bevorzugt anzuwenden. Typ I A wird zusätzlich durch weißes Farbzeichen gekennzeichnet.

Bild 2.163 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Kapazität. Die Steigung in jedem Punkt der Kurve ergibt α_C.

Der Temperaturgang der Kapazität der Kondensatoren des Typs II ist durch die Art der für das Dielektrikum verwendeten Stoffe bedingt.

Bild 2.164 zeigt die Temperaturabhängigkeit von Kondensatoren aus E 2000, E 5000 und E 10000 (Werkstoffgruppen V, Y, Z). Die Stoffgruppen für Kondensatoren des Typs II haben die in Tabelle 2.87 angegebenen Farbzeichen.

Den Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz für Keramik-Kleinkondensatoren des Typs I bzw. Typs II zeigt Bild 2.165.

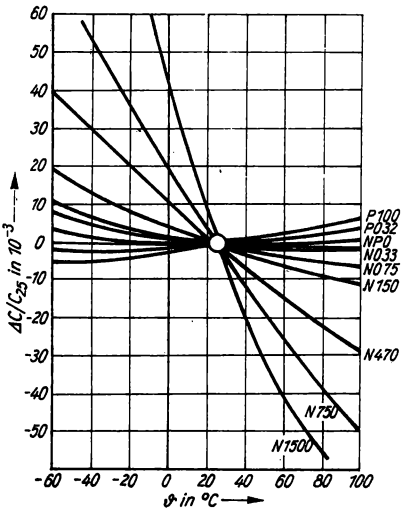


Bild 2.163. Temperaturabhängigkeit der Kapazität für Keramik-Kleinkondensatoren vom Typ I

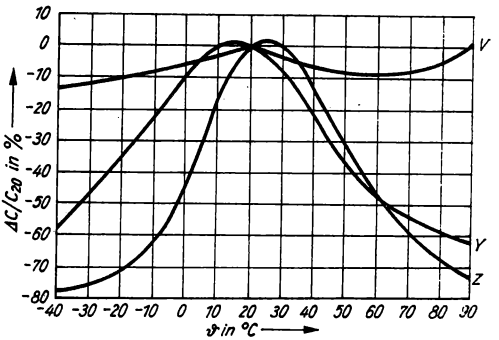


Bild 2.164. Temperaturabhängigkeit der Kapazität für Keramikkondensatoren vom Typ II (Mittelwertkurven)

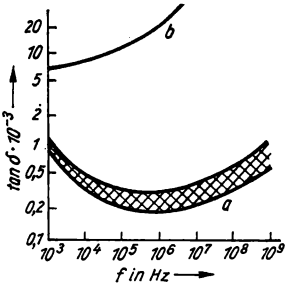


Bild 2.165. Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz für Keramik-Kleinkondensatoren
Kurve a Typ I, Kurve b Typ II

Tabelle 2.87: Farbkennzeichnung der Stoffgruppen — Typ II

Stoffgruppe	U	V	W	X	Y	Z
Farbzeichen	orange	gelb	grün	hellblau	blau	ohne

Tabelle 2.88: Grundfarben der Oberflächenschutzschicht

Kleinkondensator-Bezeichnung	Lackierung/ Umhüllung
Rohr- und Durchführungskondensatoren	
Typ I und Typ II	farblos
Scheibenkondensator	
Typ I	grau/beige
Typ II	braun
Impulskondensator	
Typ I	blau
Typ II	braun

Kennzeichnung: Außer dem Werkstoff-Farbkennzeichen besitzen die Kleinkondensatoren noch die Grundfarbe der Oberflächenschutzschicht (Tabelle 2.88).
Da die verfügbare Fläche für eine Beschriftung des Kapazitätswertes, der Toleranz und Nennspannung nicht immer ausreicht, werden besondere Kurzzeichen benutzt.

1. *Nennkapazität:* eine ein- bis dreistellige Zahl als Kapazitätswert in pF. Zahlen mit beigefügtem »n« kennzeichnen die Angabe in nF.

2. *Kapazitätstoleranz:* große Buchstaben

C	D	F	G	J	K
±0,25 pF	±0,5 pF	±1%	±2%	±5%	±10%

M	S	W	Z
±20%	+50% −20%	+80% −20%	+100% −20%

3. *Nennspannungen:* kleine Buchstaben

Gleichspannung in V

m	r	a	t	q	b	c	d	e	—	f	i	g	h
10	25	50	63	100	125	160	250	350	400	500	630	750	1000

Wechselspannung in V

u	v	w
250	350	500

Der Nennspannungsaufdruck für alle Kondensatoren mit 400 V GS entfällt. Reicht die Fläche auch für die Kurzzeichen nicht aus, dann wird lediglich der Zahlenwert der Kapazität angegeben (z. B. 22nMc bedeutet: Keramikkondensator 22 nF mit einer Kapazitätstoleranz von ±20% und einer Nenngleichspannung von 160 V).

Keramische Leistungskondensatoren

Sie werden bei Sendern hoher Leistung und Spannung, Wärmegeneratoren und elektromedizinischen Geräten angewandt.

Man unterscheidet:

Plattenkondensatoren für hohe Nennblindleistung (HF-Bereich) von 12···70 kvar und hohe Spannungen, Spitzenwert 5···15 kV. Die Kapazitätswerte betragen 50···6000 pF,

Topfkondensatoren für mittlere Leistungen von 4···24 kvar und Spitzenspannungswerte von 3,5···10 kV. Die Kapazitätswerte betragen 25···1600 pF,

Rohrkondensatoren für kleine Leistungen von 0,5···9 kvar und Spitzenspannungswerte von 2···4 kV. Die Kapazitätswerte betragen 3···2000 pF.
Die Kapazitätswerte sind *nicht* nach der E-Reihe gestuft. Die Kapazitätstoleranz beträgt ±20%.

Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren (nach TGL 200-8278)

Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren haben ein Dielektrikum (Oxidschicht), dessen eine Seite fest an einer Aluminiumfolie und dessen andere Seite an einem Elektrolyten anliegt.
Man unterscheidet Kondensatoren des Typs I, von denen eine hohe Stabilität der Kennwerte hinsichtlich Lebensdauer, Schaltfestigkeit und Betriebssicherheit gefordert wird, und des Typs II für allgemeine Zwecke.

Kondensatoren des Typs I gliedern sich in

— Typ I A: Kondensatoren für Glättungszwecke, zur HF- und NF-Ableitung sowie zur Kopplung in Verstärkerstufen,

— Typ I B: Kondensatoren für häufiges Laden und Entladen mit erhöhten Anforderungen an die zeitliche Kapazitätskonstanz, z. B. in Relaisschaltungen zum Einschalten von Zeitbedingungen, für Stoßentladungen und Energiespeicher.

Kondensatoren des Typs II gliedern sich in

— Typ II A: Kondensatoren für Glättungszwecke, zur NF-Ableitung sowie zur Kopplung in Verstärkerstufen,

— Typ II B: Kondensatoren für häufiges Laden und Entladen mit geringen Anforderungen an die zeitliche Kapazitätskonstanz, z. B. Fotoblitz-Kondensatoren.

Elektrolyt-Kondensatoren werden mit einer rauhen oder mit einer glatten Anode geliefert. Bei der rauhen Anode wird die Anodenfolie zum Zweck der Oberflächenvergrößerung und damit zur Erhöhung der Kapazität aufgerauht.
Für die Kondensatoren vom Typ I A und II A wird die Wechselspannungskapazität als Scheinkapazität angegeben. Beim Typ I B wird die Gleichspannungskapazität angegeben, deren Wert erheblich geringer als die Scheinkapazität ist.

Nennkapazitäten sind:

0,47; 1; 2,2; 4,7; 10; 22; 47; 100; 220; 470; 1000; 2200; 4700; 10000 µF, weiterhin sind zulässig:
2; 5; 20; 50; 200; (250); 500; (750); 2000; (2500); 5000 µF.
Klammerwerte sind nur für spezielle Anwendungsfälle zugelassen.

Nennspannungen (auf dem Kondensator als Gleichspannung angegeben) sind:

Niedervolt: 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; (100) V,
Hochvolt: 160; 250; 350; 450; (500) V.

Klammerwerte sind nur für spezielle Anwendungsfälle zugelassen. Die Spitzenspannung darf (in % der Nennspannung) nicht unter folgenden Werten liegen:

115% bei $U_n \leqq 315$ V und 110% bei $U_n > 315$ V.

Die Temperaturbelastung setzt sich aus Eigen- und Fremderwärmung zusammen. Kondensatortemperaturen über 40 °C führen bei je 7 K Temperaturerhöhung annähernd zur Halbierung der Lebensdauer. Der Betriebstemperaturbereich beträgt −40···+70 °C. Der Verlustfaktor ist temperatur- und frequenzabhängig (Bild 2.166). Für Kapazitäten bis max. 1000 µF bezieht er sich auf eine Frequenz von 50 Hz bei 20 °C, für Kapazitäten > 1000 µF wird der Verlustfaktor zwischen Hersteller und Abnehmer vereinbart.

Kennzeichnung: Herstellerzeichen, Kurzzeichen (Elyt) und Typ, Nennkapazität, Nennspannung, Prüfklasse, Standardnummer, Herstellungszeitraum, Gütezeichen, Polarität mindestens eines Anschlusses. Bei Platzmangel können für die Kennzeichnung außer der Kurzbezeichnung und dem Herstellerzeichen einzelne andere Angaben entfallen.

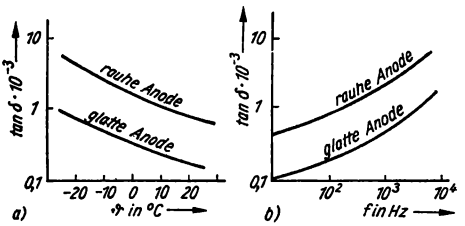


Bild 2.166. Abhängigkeit des Verlustfaktors bei Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren
a) von der Temperatur, b) von der Frequenz

Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren (nach TGL 200-8279)

Sie haben ein Dielektrikum aus Tantalpentoxid, dessen eine Seite fest an einer aus Tantal bestehenden Elektrode, der Anode, anliegt. Vorzugsweise ist die Anode ein Sinterkörper, dessen gesamte äußere und innere Porenfläche den positiven Belag bildet. Die Katode besteht aus Mangandioxid.
Gepolte Tantal-Kondensatoren enthalten so angeordnete Dielektrikumsschichten, daß der Strom nur in einer Richtung gesperrt wird. Sie sind entsprechend ihrer Polaritätskennzeichnung zu betreiben.

Nennkapazitätswerte (auf 20 °C und 50 Hz bezogen) sind:
1; 2,2; 4,7; 10; 22; 47; 100 µF.
Kapazitätswerte nach Reihe E 6 sind zulässig.
Die Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur zeigt Bild 2.167.

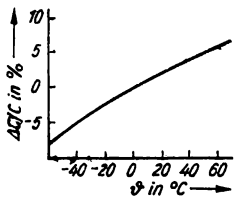


Bild 2.167. Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur bei Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren

Nenngleichspannungen (bei Kondensatortemperatur +40 °C):
3, 6; 10; 15; 20; 25; 30; 35 V.
Die Spannungsbelastbarkeit ist in Tabelle 2.89 angegeben.

Tabelle 2.89: Spannungsbelastbarkeit von Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren

Nenngleichspannung U_n	3	6	10	15	20	25	30	35 V
Spitzenspannung U_s	4	8	12	18	25	30	35	40 V
Nichthermetische Ausführung								
bis 65 °C	Dauergrenzspannung U_g							
über 65 °C bis 85 °C	3	6	10	14	18	21	25	29 V
Hermetische Ausführung								
bis 85 °C	Dauergrenzspannung U_g							
über 85 °C bis 100 °C	3	4	6	12	16	20	24	28 V
über 100 °C bis 125 °C	3	4	6	10	13	16	20	23 V

Überlagerte Wechselspannungen dürfen bei Summierung von deren Spitzenwerten mit der anliegenden Gleichspannung die Dauergrenzspannung nicht übersteigen. Die negative Amplitude darf keine Falschpolung des Kondensators hervorrufen.
Ein überlagerter Wechselstrom darf gegenüber reiner Gleichspannungsbeanspruchung nur eine Temperaturerhöhung um max. 10 K verursachen. Besondere Kühlmaßnahmen durch Wärmeableitung oder Belüftung sind zum Zwecke der Begrenzung der Temperaturerhöhung nicht statthaft.
Der Verlustfaktor ist frequenz- und temperaturabhängig (Bild 2.168).
Er wird auf 20 °C und 50 Hz bezogen. Bei höheren Frequenzen weichen Verlustfaktor und Nennkapazität vom theoretischen Funktionsverlauf ab. Der Verlustfaktor für die Nenngleichspannungen 3···35 V beträgt ≦ 0,08 für Kapazitäten < 100 µF und ≦ 0,10 für Kapazitäten ≧ 100 µF.

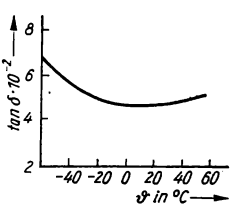


Bild 2.168. Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Temperatur bei Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren (Richtwerte)

Der Betriebstemperaturbereich wird von −65···+125 °C angegeben. Gegenüber Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren haben Tantal-Kondensatoren folgende *Vorzüge*: höhere Betriebssicherheit, günstigere Temperatur- und Frequenzabhängigkeit der Kapazität, kleinere Abmessungen, geringere Restströme, niedrigere dielektrische Verluste, längere Lebensdauer. Sie werden deshalb z. B. angewandt zur Siebung in Netzteilen, als Energiespeicher in Blitzgeräten, als Koppelkondensator in Transistorschaltungen, in Hörhilfen.
Beim Einsatz ist die große Kapazitätstoleranz zu beachten.

Kennzeichnung: wie Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren, mit anderem Kurzzeichen.

Motorkondensatoren (nach TGL 200-8268)

Motorkondensatoren werden als *Papier-*, *Metallpapier-* und *Elektrolyt-Kondensatoren* hergestellt und sind für Anlagen mit Netzspannungen bis 1 kV und Frequenzen bis 60 Hz geeignet.
Sie sind Anlaß- und Betriebskondensatoren für einphasig angeschlossene Induktionsmotoren und liegen z. B. im Stromkreis der Hilfsphasenwicklung von Einphaseninduktionsmotoren oder parallel oder in Reihe zur Wicklung eines einphasig angeschlossenen Drehstrommotors. Motoranlaßkondensatoren dienen nur dem Anlauf von Motoren. Sie werden während des Hochlaufs oder nach Beendigung des Hochlaufs abgeschaltet. Anlaßkondensatoren mit besonderen Eigenschaften sind ungepolte Elektrolyt-Kondensatoren.
Motorbetriebskondensatoren dienen außer dem Anlauf auch der besseren Ausnutzung der Motoren. Sie sind dauernd mit den Wicklungen der Motoren verbunden.

Nennkapazitäten für Motoranlaßkondensatoren sind:
5; 6; 8; 10; 16; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 100; 120; 140; 160; 200; 250; 320; 400 µF.

Nennkapazitäten für Motorbetriebskondensatoren sind:
1; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 100 µF.

Die zulässige Kapazitätsabweichung für Motoranlaß- und Betriebskondensatoren beträgt max. ±10% bei 20 °C.
Zulässige Kapazitätsabweichung in Abhängigkeit von der Temperatur: für Motorbetriebskondensatoren −8···+5% im Bereich der Kondensatortemperaturen −40···+85 °C und für Motoranlaßkondensatoren ±15% für Temperaturen von −10···+50 °C.

Nennspannungen: Motoranlaßkondensatoren: 160; 220; 320; 360 V, Motorbetriebskondensatoren: 220; 320; 380; 400; 450; 480; 560 V. Die Nennspannung eines Motorkondensators muß bei Nennkapazität an den Klemmen des Motors bei jedem Arbeitspunkt des Motors größer oder gleich als die am Kondensator auftretende Betriebsspannung sein.
Der Kondensator darf in seiner Nennbetriebsart (Dauerbetrieb S1, Kurzzeitbetrieb S2, Aussetzbetrieb S3) bis zur oberen Grenztemperatur mit $1{,}1\,U_n$ bzw. mit Wechselstrom vom 1,25fachen des Stromes, der bei sinusförmiger Nennspannung und Nennfrequenz durch den Kondensator fließt, betrieben werden.
Die *Kennzeichnung* erfolgt entsprechend der Kondensatorart, zusätzlich ist die Betriebsart angegeben.

Funkentstörkondensatoren

Funkentstörkondensatoren werden als *Papier-*, *Metallpapier-* und *Keramikkondensatoren* hergestellt in den Ausführungen als Durchführungskondensatoren oder -filter, aber auch als Einfach- oder Mehrfachkapazitäten mit in Gehäusen eingebauten Sicherungen oder Vorwiderständen.
Sie dienen vorzugsweise dem hochfrequenzmäßigen Kurzschluß von Störspannungen bei elektrischen Maschinen, Geräten und Anlagen, deren Nennspannung 500 V zwischen spannungsführenden Leitern verschiedener Polarität und 300 V zwischen spannungsführenden Leitern und berührbaren leitenden Teilen nicht überschreitet oder zur Ableitung der Störspannungen nach Erde oder Masse oder der Verminderung von Funkenbildung an Unterbrechern und Schaltern.
Bei der Anwendung der Funkentstörmittel sind die bestehenden Sicherheitsbestimmungen zu beachten!

Man unterscheidet Funkentstörkondensatoren der

Klasse (x): Der Kondensator darf nur so in Geräte eingebaut werden, daß auch bei auftretendem Kurzschluß des Kondensators keine Gefahr einer elektrischen Schockwirkung bei Berührung leitender Teile des Gerätes möglich ist;

Klasse (y): Verwendung auch dann, wenn bei einem Kurzschluß Gefahr für Menschen auftritt. Diese Kondensatoren werden mit hoher Spannung geprüft; es werden nur begrenzte Kapazitätswerte zugelassen.

Nennkapazitäten sind: 50; 100; 125; 250; 500; 1000; 1250; 2500; 5000 pF und 0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2 µF.
Die Kapazitätstoleranz beträgt für Klasse (x) ±20%, für Klasse (y) −40% außer Keramikkondensatoren.

Nennwechselspannungen sind: 42; 125; 250; 300; 380; 500 V.
Nenngleichspannungen sind: 50; 150; 250; 350; 500 V.

Kondensatoren mit Nennwechselspannung können mit Gleichspannung gleicher Höhe betrieben werden.

Nennströme: 6; 10; 16; 25; 63; 100; 250 A.
Die *Kennzeichnung* erfolgt entsprechend der Kondensatorart, zusätzlich ist die Schutzklasse angegeben.

2.9.3. Veränderbare Kondensatoren

Drehkondensatoren

Drehkondensatoren werden als Einfach- und Mehrfachkondensatoren (mehrere Drehkondensatoren befinden sich auf einer Achse) hergestellt und zur kontinuierlichen Abstimmung von Schwingkreisen in der Meß- und Empfängertechnik verwendet.
Als Dielektrikum werden Luft oder Plaststoffe verwendet.
Ein Drehkondensator besteht aus einem Satz paralleler Platten, von denen das eine Plattenpaket fest steht (*Stator*), während das andere Plattenpaket beweglich ist (*Rotor*). Der Rotor wird in die Zwischenräume des Stators hineingedreht, und dadurch wird die Kapazität vergrößert. Da sich die gegenüberstehenden Flächen zwischen zwei Platten mit dem Drehwinkel ändern, lassen sich durch den Plattenschnitt bestimmte Verläufe der Kapazität über den Drehwinkel erzielen ($C \approx 10 \cdots 1000$ pF).

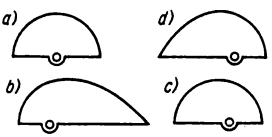


Bild 2.169. Plattenschnitte
a) kapazitätsgerade,
b) frequenzgerade,
c) wellengerade,
d) logarithmisch

Nach dem Plattenschnitt für eine geforderte Kapazitätskurve werden unterschieden (Bild 2.169):

Kreisplattenschnitt (kapazitätsgerade) — lineare Änderung der Kapazität mit dem Drehwinkel α;
frequenzgerader Plattenschnitt — lineare Änderung der Frequenz mit dem Drehwinkel α (heute seltener verwendet);
logarithmischer Plattenschnitt — Verwendung anstelle des frequenzgeraden, stark unsymmetrischen Plattenschnittes, der einen größeren Raumbedarf erfordert;
wellengerader Plattenschnitt — lineare Wellenlängenverteilung.

Anfangskapazität C_a bei Rotorstellung 0° und Verlustfaktor:

Luftdrehkondensatoren für Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich

LMK-Bereich:
$C_a \leqq 13$ pF für $\Delta C_{max} \leqq 400$ pF $\quad (\tan\delta \leqq 5 \cdot 10^{-4})$
$C_a \leqq 15$ pF für $\Delta C_{max} > 400$ pF $\quad (\tan\delta \leqq 5 \cdot 10^{-4})$

UKW-Bereich:
$C_a \leqq 4$ pF $\quad (\tan\delta \leqq 2 \cdot 10^{-3})$

LMK- und UKW-Bereich auf gemeinsamer Welle
LMK-Bereich: $C_a \leqq 13$ pF $\quad (\tan\delta = 5 \cdot 10^{-4})$
UKW-Bereich: $C_a \leqq 6$ pF $\quad (\tan\delta = 2 \cdot 10^{-3})$

Der Temperaturbeiwert beträgt bei Luftdrehkondensatoren im LMK-Bereich bei einem Plattenabstand $\leqq 0{,}25$ mm $(-70$ bis $+130) \cdot 10^{-6}/K$ und $(-50 \cdots +100) \cdot 10^{-6}/K$ bei einem Plattenabstand $> 0{,}25$ mm sowie $(0 \cdots +100) \cdot 10^{-6}/K$ im UKW-Bereich.
Die Spannungsfestigkeit ist $\geqq 400$ V GS.

Trimmer

Trimmer dienen zum genauen Abgleichen eines Schwingkreises auf die geforderte Frequenz. Der bestimmte Kapazitätswert wird i. allg. nur einmal zum Abgleich eingestellt und während des Betriebes nicht verändert. Man unterscheidet entsprechend dem mechanischen Aufbau *Scheiben-* und *Rohrtrimmer*.
Am häufigsten verwendet man wegen ihrer guten zeitlichen und mechanischen Stabilität keramische Scheibentrimmer. Sie bestehen aus einer keramischen Grundplatte (Calit) für den Stator und einer drehbaren Scheibe aus keramischen Stoffen des Typs I für den Rotor. Auf der Oberseite von Stator und Rotor sind bis etwa zur Hälfte Silberbeläge aufgebrannt, die als Elektroden des Kondensators dienen. Scheibentrimmer sind für große Kapazitätsänderungen anwendbar.
Die Regelkurve ist immer kapazitätsgerade.
Nennkapazitäten für verschiedene Nennspannungen zeigt Tabelle 2.90.

Tabelle 2.90: Nennkapazität, Nennspannung und Nennstrom von Trimmern

Nenn-gleich-spannung	Nennkapazität	Nennstrom
160 V	2/4; 3/7; 3,5/9; 4,5/15; 7/20 pF	
250 V	2/6; 3/12; 4/20; 6/25; 10/40; 10/60 pF	$\leqq 300$ mA
400 V	2/6; 3/15; 4/20; 7/45; 10/60; 15/100 pF	$\leqq 500$ mA

Der Verlustfaktor ist $\leqq 2 \cdot 10^{-3}$ bei 1 MHz und 20°C für $C_{max} = 15$ pF. Der Temperaturbeiwert ist positiv oder negativ entsprechend dem Rotorwerkstoff (s. NDK-Kondensatoren).

Kennzeichnung bei Nenngleichspannung:
160 V durch den Nenntemperaturbeiwert als Farbzeichen,
250 V Nennkapazität durch Stempel in der Kennfarbe des Rotorwerkstoffes,
400 V durch Nennkapazität.

2.10. Induktivitäten

2.10.1. Nieder- und Hochfrequenzinduktivitäten

In den HF-Spulen wird die Speicherung elektrischer Energie im Magnetfeld ausgenutzt. Entscheidende Größen sind Induktivität und Güte der Spule. Soll eine hohe Güte erreicht werden, müssen Kerne aus verlustarmen Werkstoffen verwendet werden. Eingesetzt werden Ferrite, aber auch Masseeisen.
Abkürzungsweise wird oft vom Hersteller für die Induktivitätsberechnung der *Induktivitätsfaktor* A_L (Kehrwert des magnetischen Widerstandes) angegeben, der sich für einen homogenen Magnetkreis ergibt zu

$$A_L = \frac{\mu_0 \mu_r A}{l} = \frac{L}{N^2}.$$

Es kann aber auch der *Kernfaktor* K angegeben werden zu

$$K = \frac{N}{\sqrt{L}}.$$

Hieraus folgt die notwendige *Windungszahl* N für eine gewünschte *Induktivität* L bei einem gegebenen Kernmaterial zu

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = K\sqrt{L}.$$

Beispiel: Auf ein Kernmaterial mit einem Induktivitätsfaktor von 40 nH soll eine Zylinderspule von $L = 200$ µH gewickelt werden. Wie groß muß die Windungszahl gewählt werden?
Es ist

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{H}}{40 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{H}}} \approx 71.$$

Mit Hilfe des Nomogramms im Bild 2.170 läßt sich dieser Wert im gegebenen Beispiel bei (3) sofort ablesen. Die Berechnung der Windungszahl ist nur näherungsweise möglich, da sie noch von der Form des Kerns abhängig ist. Die mit dem Nomogramm erzielten Werte sind für die Praxis ausreichend.

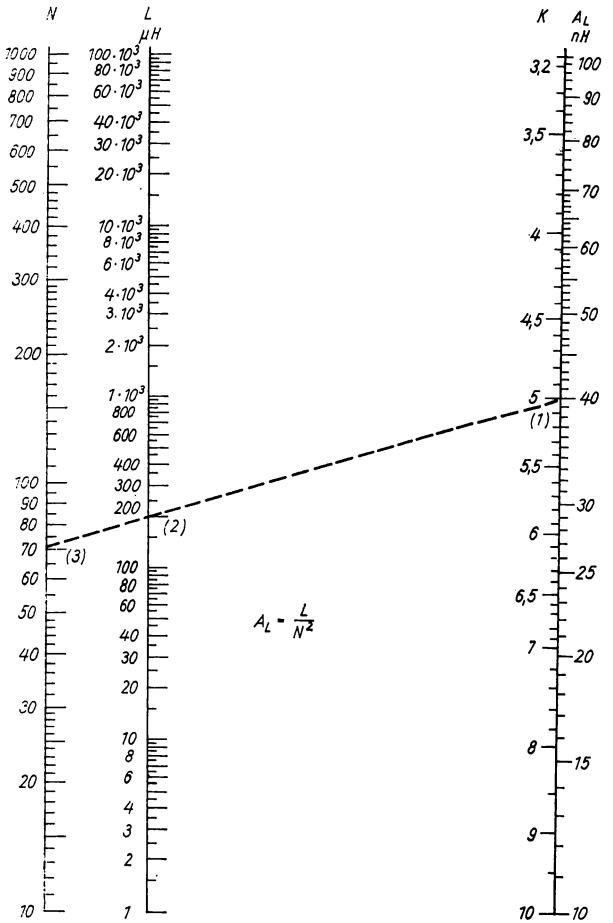


Bild 2.170. Induktivitätsfaktor und Kernfaktor

Ist von einem gegebenen Massekern kein A_L-Wert bzw. K-Wert bekannt, so bringt man probeweise z. B. 100 Windungen auf, mißt die Induktivität und bestimmt mit dem Nomogramm die gesuchten Werte. Der K-Wert im Nomogramm gilt für L in µH, der A_L-Wert für L in nH.

Für Zwecke der Nachrichtentechnik werden verlustarme, weichmagnetische Sinterwerkstoffe auf der Grundlage von Eisenoxid (Fe_2O_3) im Gemisch mit dem Oxid eines oder mehrerer zweiwertiger Metalle (MgO; MnO; CuO) verwendet. Der spezifische Widerstand dieser Werkstoffe liegt zwischen 10^2 und $10^9\ \Omega \cdot$ cm, so daß sich Wirbelströme nahezu nicht ausbilden können. Die Wirbelstromverluste, die unter anderem die Güte einer Induktivität beeinflussen, können je nach Mischung auch bei höchsten Frequenzen (bis 230 MHz) gering gehalten werden. In der Nachrichtentechnik sind Spulen mit hoher Güte Q (s. 2.11.) notwendig.

Tabelle 2.91 gibt Aufschluß über den Frequenzanwendungsbereich gebräuchlicher Ferritwerkstoffe.

Tabelle 2.91: Frequenzbereich gebräuchlicher Ferritwerkstoffe

Werkstoff	Manifer 110	Manifer 140	Manifer 150	Manifer 163
Frequenzbereich MHz	0,3···8	0,1···1,5	0,001···0,5	0,001···0,5
Anfangspermeabilität μ_i	100	400	800	1000
Werkstoff	**Manifer 183**	**Manifer 210**	**Manifer 220**	**Manifer 230**
Frequenzbereich MHz	0,001···0,3	30···100	10···50	5···25
Anfangspermeabilität μ_i	2200	6	6	15
Werkstoff	**Manifer 240**	**Manifer 310**	**Manifer 340**	**Manifer 360**
Frequenzbereich MHz	2···6	30···230	2···6	0,1···2

Die Anfangspermeabilität μ_i ist die relative Permeabilität bei der Feldstärke $H = 0$. Sie wird an einem Ringkern ermittelt.
Durch Verwendung geeigneten Ferritkernmaterials wird die Induktivität von Spulen erhöht, und es kann eine beträchtliche Güteerhöhung gegenüber der Spule ohne Kern erreicht werden.
Die genannten Bemessungsgleichungen gelten für Spulen mit Ferritkernen nur im linearen Bereich von deren Magnetisierungskurve. Oberhalb des linearen Bereiches treten Sättigungserscheinungen ein, die zu einer Verzerrung von Strom und Spannung führen.
Gehört das Kernmetall zur Gruppe der Paramagnetika, nimmt die Induktivität gegenüber der Luftspule nur gering zu. Ist jedoch der Spulenkern aus diamagnetischem Material, nimmt die Induktivität der Spule geringfügig ab.
Für die verschiedenen Anwendungsgebiete stehen verschiedene Kernformen zur Verfügung. Schalenkerne nach den Bildern 2.171 und 2.172 sowie Tabelle 2.92 werden für abgleichbare

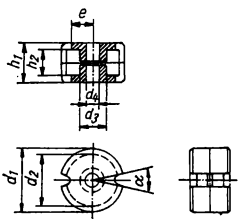


Bild 2.171. Aufbau von Schalenkernen aus Manifer

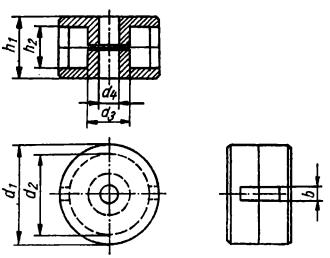


Bild 2.172. Spulenkörper für Schalenkerne

Spulen hochwertiger Filter, Schwingkreise oder Übertrager verwendet. Schalenkerne werden mit Abgleichkern geliefert, mit dem der Induktivitätswert abgeglichen werden kann. Die Abgleichkerne sind mittels Fadens im Gewinde oder mittels Wachses gegen ungewolltes Verstellen zu sichern. Der Abgleichbereich wird in % nach folgender Gleichung angegeben:

$$\Delta L = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}} 100.$$

Der Abgleichkern ist in seiner Minimumstellung noch mit zwei Gewindegängen im Eingriff.

Tabelle 2.92: Abmessungen von Schalenkernen
(Maße in mm; α in °)

Bild-Nr.	Schalenkern	d_1	h_1	d_2	d_3	d_4	h_2	b	e	α
2.171	11 × 6	11	6,6	8,8	4,5	1,8	4,0	–	3,4	30°
	14 × 8	14	8,5	11,6	6,0	3,0	5,6	–	4,9	22°
2.172	18 × 11	18	10,7	14,9	7,6	3,0	7,2	3,3	–	–
	22 × 13	22	13,6	17,9	9,4	4,4	9,2	3,3	–	–
	26 × 16	26	16,3	21,2	11,5	5,4	11,0	3,3	–	–
	30 × 19	30	19,0	25,0	13,5	5,4	13,0	3,3	–	–
	36 × 22	36	22,0	29,9	16,2	5,4	14,6	4,3	–	–

Tabelle 2.93 enthält die A_L-Werte für Schalenkerne ohne Luftspalt aus Manifer 163.

Tabelle 2.93: A_L-Werte (für Schalenkerne ohne Luftspalt)

Schalenkern mm	A_L-Wert nH	Schalenkern mm	A_L-Wert nH
11 × 6	–	26 × 16	2250
14 × 8	1000	30 × 19	2500
18 × 11	1600	36 × 22	3250
22 × 13	2000		

Tabelle 2.94 enthält die A_L-Werte für Schalenkerne mit Luftspalt, ebenfalls aus Manifer 163.

Tabelle 2.94: A_L-Werte (für Schalenkerne mit Luftspalt)

Schalenkern	A_L-Wert nH									
mm	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1250
	Luftspalt in mm									
11 × 6	0,9	0,5	0,23	0,11						
14 × 8		1,2	0,65	0,27	0,13					
18 × 11			1,10	0,55	0,28	0,13	0,05			
22 × 13			1,80	0,88	0,45	0,22	0,12	0,05		
26 × 16				1,50	0,80	0,41	0,20	0,11		
30 × 19				2,30	1,10	0,65	0,35	0,20	0,10	
36 × 22					1,95	1,00	0,55	0,30	0,15	0,11

Die Luftspalte in Schalenkernen bewirken eine hohe Konstanz der Werte und geringe Verluste. Die Spulen für Schalenkerne werden auf Spulenkörper aus Polystyrol aufgewickelt.
Zylinderkerne werden vorwiegend als Abgleichelemente von HF-Spulen verwendet. Zylinderkerne mit Gewinde erfüllen diesen Zweck besonders gut. Insbesondere werden diese in Spulen von Vor-, Oszillator- oder ZF-Bandfilterkreisen eingesetzt. Der Nenndurchmesser ist so toleriert, daß eine hemmende Einlage (Kernbremse) gegen unbeabsichtigtes Verstimmen möglich ist. Der Abgleichbereich wird in gleicher Weise wie für Schalenkerne angegeben. Da die A_L-Werte von Zylinderkernen stark von der Spulenform abhängig sind, ist deren Angabe nicht sinnvoll.
Breitbanddrosseln sind Induktivitäten mit Ferritkern, die die Impedanz der Energiezuleitungen zu Störquellen beträchtlich erhöhen und somit die Störrückwirkung auf das speisende Netz stark vermindern. Um ein breites Frequenzspektrum wirksam zu unterdrücken, sollen die Spulen eine geringe Güte haben, d. h., die Verluste in der Wicklung und im Kern sollen größer sein. Aus diesem Grunde werden Drosselkerne aus Manifer 150 vorzugsweise zur Dämpfung von Frequenzen bis 250 MHz und aus Manifer 250 bis zu 800 MHz eingesetzt. Die Anwendung der Drosselkerne erfolgt in der Rundfunk- und Fernsehtechnik zum Vermeiden unerwünschter Kopplungen, aber auch zur Herabsetzung der Störwirkungen von Kleinmotoren. Zur Erhöhung der Entstörwirkung können auch zwei Drosseln in Reihe geschaltet werden.
Eine weitere Induktivität mit Ferritkern stellt die Spule auf Ferritantennenstäben in abgestimmten Vorkreisen dar. Dabei werden Antennenstäbe aus Manifer 250 vorzugsweise im Mittel- und Langwellenbereich, aus Manifer 240 bis zum Kurzwellenbereich eingesetzt.
Bei *Spulen mit Kernen* setzt sich der Verlustwiderstand R aus Wicklungsverlusten (Kupferverluste) R_{Cu} und Kernverlusten (Eisenverluste) R_K zusammen.

$$R = R_{Cu} + R_K \quad \text{mit} \quad R_K = R_w + R_h + R_n$$

Der *Kernverlustwiderstand* besteht aus Wirbelstrom-, Hysterese- und Nachwirkungsverlusten.
Bild 2.173 zeigt das Ersatzschaltbild einer verlustbehafteten HF-Spule (C_E Eigenkapazität der HF-Spule) und Bild 2.174 das zugehörige Zeigerbild. Hieraus folgt $Q = 1/\tan\delta$.

Spulen ohne Metallkern (Luftspulen), in deren unmittelbarer Nähe sich auch keine Metallteile befinden, weisen keine Kernverluste auf; die entsprechenden Widerstandsanteile sind hier

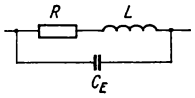


Bild 2.173. Ersatzschaltbild einer verlustbehafteten HF-Spule

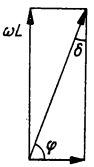


Bild 2.174. Zeigerbild einer verlustbehafteten HF-Spule

gleich Null. Nachfolgend sind die Bemessungsgleichungen für einige Arten von Luftspulen angegeben.
Die Induktivität eines gestreckten Rundrahtes bei hohen Frequenzen ist

$$L = 2l\left(\ln\frac{4l}{d} - 1\right)\cdot 10^{-3}\ \mu\text{H}$$

l Drahtlänge in cm, d Drahtdurchmesser in cm

Die Induktivität einer einlagigen Zylinderspule bei mittleren Frequenzen mit dem mittleren Spulendurchmesser D in cm und der Spulenlänge l in cm (Bild 2.175) ist

$$L = N^2DK\cdot 10^{-3}\ \text{in}\ \mu\text{H}.$$

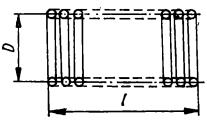


Bild 2.175.
Einlagige Zylinderspule

Der Wert für K folgt aus Bild 2.177.
Mit Hilfe des Nomogramms im Bild 2.176 lassen sich verschiedene Kennwerte einlagiger Zylinderspulen ermitteln. Die Auswertung des Nomogramms geschieht mit einem rechtwinkligen Kreuz, das (auf durchsichtigem Papier gezeichnet) beliebig auf den Leitern verschoben werden kann.

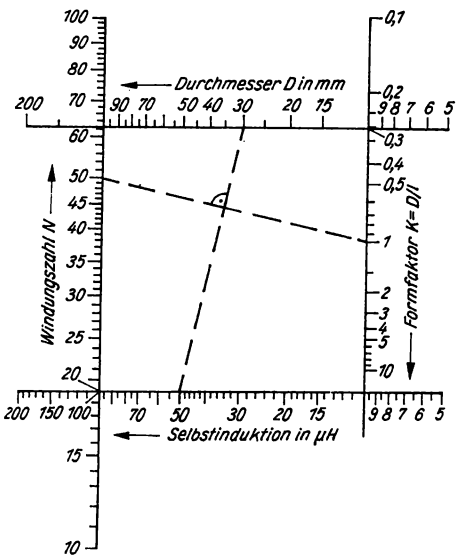


Bild 2.176. Nomogramm für einlagige Zylinderspulen

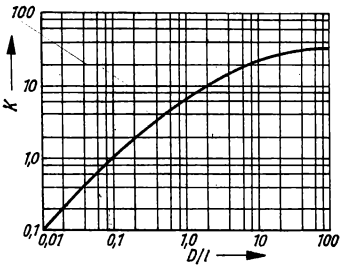


Bild 2.177. Hilfsfunktion zur Berechnung einlagiger Luft-Zylinderspulen

Beispiel: Durchmesser D und Wicklungslänge l betragen 3 cm. Mit 50 Windungen besitzt die Spule dann eine Selbstinduktion von 50 μH.
Die Induktivität einer Ringspule mit dem Spulendurchmesser D in cm mit rundem Wicklungsquerschnitt vom Durchmesser d in cm (Bild 2.178) ist bei mittleren Frequenzen

$$L = 2\pi N^2\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)\cdot 10^{-3}\ \text{in}\ \mu\text{H}.$$

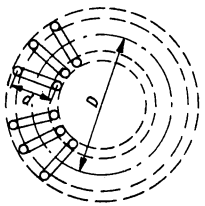


Bild 2.178. Ringspule mit rundem Wicklungsquerschnitt

Die Induktivität einer mehrlagigen langen Zylinderspule mit mittlerem Spulendurchmesser D in cm, Wicklungshöhe h in cm und Spulenlänge l in cm (Bild 2.179) ist bei mittleren Frequenzen

$$L = N^2DK - \frac{2\pi N^2Dh}{l}\,(0{,}693 + C)\cdot 10^{-3}\ \text{in}\ \mu\text{H}.$$

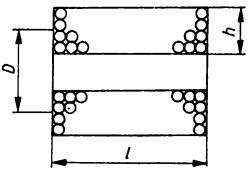


Bild 2.179.
Mehrlagige Zylinderspule

Der Wert für K ist Bild 2.177 zu entnehmen. Der Korrekturwert C folgt aus Tabelle 2.95.

Tabelle 2.95: Korrekturfaktor C

l/h	C cm	l/h	C cm
1	0,0000	16	0,3017
2	0,1202	17	0,3041
3	0,1753	18	0,3062
4	0,2076	19	0,3082
5	0,2292	20	0,3099
6	0,2446	21	0,3116
7	0,2563	22	0,3131
8	0,2656	23	0,3145
9	0,2730	24	0,3157
10	0,2792	25	0,3169
11	0,2844	26	0,3180
12	0,2888	27	0,3190
13	0,2927	28	0,3200
14	0,2961	29	0,3209
15	0,2991	30	0,3218

Bei hohen Frequenzen sind die Eigenkapazität von Spulen und deren dielektrische Verluste zu berücksichtigen. Infolge der Spannungsdifferenzen, die zwischen den verschiedenen Teilen einer stromdurchflossenen Spule bestehen, wird ein elektrisches Feld in der Luft und im Dielektrikum aufgebaut. Die Wirkung der dadurch gespeicherten elektrischen Energie kann näherungsweise durch eine Ersatzkapazität C_E parallel zur Induktivität beschrieben werden (Bild 2.173). Die Eigenkapazität einer einlagigen Zylinderspule ist etwa dem Spulendurchmesser proportional und nimmt etwas mit der Spulenlänge ab. Kapazitätsarme Zylinderspulen sollten deshalb geringen Spulendurchmesser und eine vergrößerte Spulenlänge erhalten. Die Eigenkapazität ist weitestgehend unabhängig von der Anzahl der Windungen, sofern die Windungszahl genügend groß und der Windungsabstand nicht zu klein ist. Geringer Windungsabstand erhöht bei Spulen mit nur einigen Windungen die Kapazität etwas.
Mehrlagige Spulen haben eine höhere Eigenkapazität als einlagige.
Der Induktivitätswert einer Spule ändert sich mit der Temperatur auf Grund der Änderung der Abmessungen und der Widerstandsänderung des Leiters. Diese Einflüsse sind je nach Bauart der Spule gering. Hinreichend stabil in dieser Hinsicht sind einlagige Zylinderspulen mit bandförmigem Leiter. Vorteilhaft sind Spulen, deren Leiter direkt auf die Isolierkörperoberfläche (Keramik) aufgespritzt sind. Mit diesen lassen sich Temperaturkoeffizienten (Induktivitätsänderung je Grad Celsius) von 0,005···0,015‰ je °C erreichen. Bei Kernspulen kommt noch der Effekt der Änderung der magnetischen Eigenschaften des Kernes mit der Temperatur hinzu. Gewöhnlich wird die prozentuale Änderung der Permeabilität mit der Temperatur auf die Anfangspermeabilität bezogen. Tabelle 2.96 gibt den relativen Temperaturkoeffizienten T_K, bezogen auf die Anfangspermeabilität, an.

Tabelle 2.96: Relativer Temperaturkoeffizient T_K

Werkstoff	Manifer 110	Manifer 140	Manifer 150	Manifer 163	Manifer 164
$\frac{T_K}{\mu_i}$ in $\frac{10^{-6}}{K}$	18	8	7,5	2,5	2,5
Werkstoff	Manifer 210	Manifer 220	Manifer 230	Manifer 240	Manifer 250
$\frac{T_K}{\mu_i}$ in $\frac{10^{-6}}{K}$	50	20	16	14	8

Die absolute T_K-Zahl ergibt sich erst aus der Multiplikation der Werte von Tabelle 2.96 und der Anfangspermeabilität μ_i.

2.10.2. Induktivitäten der Starkstromtechnik

Induktivitäten der Starkstromtechnik werden zum Zweck der Energieübertragung (Drosselspulen) oder zur Erzeugung von Kraftwirkung auf ferromagnetische Stoffe eingesetzt.
Man unterscheidet in der Energieübertragung *Reihen-*, *Parallel-* und *Sternpunktdrosselspulen*. Jeder der genannten Grundtypen hat eine andere Aufgabe und unterschiedliche Bauart und geht damit unterschiedlich in die Netzberechnung ein.
Die *Reihendrosselspule*, auch Längs-, Kurzschluß- oder Strombegrenzungsdrossel genannt, wird in Reihe in die Strombahn zur Kurzschlußstrombegrenzung für nachgeschaltete elektrische Anlagen geschaltet. Außerdem wird sie teilweise zur Angleichung der bezogenen Impedanz (entspricht der auf eine Spannungsebene bezogenen Kurzschlußspannung u_k%) beim Parallelbetrieb von stark unterschiedlichen Transformatoren eingesetzt. Strombegrenzungsdrosselspulen werden mit bezogenen Reaktanzen von 3, 6 und 10% für Nennspannungen von 6, 10, 20 und 30 kV hergestellt.
Um die erforderlichen relativ kleinen Reaktanzen zu erreichen, werden Strombegrenzungsdrosselspulen als eisenlose Luftdrosseln ausgeführt. Damit wird im Normalbetrieb infolge eines geringen Induktivitätswertes ein geringer Spannungsabfall erzielt. Im Kurzschluß steigt dieser Spannungsabfall proportional zur zeitlichen Stromänderung an. Es gilt:

$$u = L \frac{di}{dt}.$$

Unerwünschte Sättigungserscheinungen treten bei der Strombegrenzung infolge des Fehlens eines Eisenkerns nicht ein. Strombegrenzungsdrosseln erhalten wegen großer Kurzschlußkräfte eine stabile Holz- oder Betonabstützung.
Spulen mit Holzabstützung (Dreiphasensätze) enthalten Scheibenspulen, die zum Zweck besserer Kühlung senkrecht stehen. Ihre zulässige Übertemperatur liegt bei 65 °C. Sie darf auch im Kurzschluß nicht überschritten werden. Drosselspulen mit Betonabstützung (einpolige Einheiten) haben eine zulässige Übertemperatur von 85 °C. Tabelle 2.97 gibt die Nennstromwerte der genannten Spulenarten an.

Tabelle 2.97: Nennstrom von Drosselspulen

Drosselspule	Nennstrom in A						
Mit Holzabstützung	25	40	63	100	160		
Mit Betonabstützung	250	400	630	1000	1250	1600	2000

Bild 2.180 zeigt eine Drosselspule mit Betonabstützung in Drehstromausführung. Bei Drosselspulen in Drehstromausführung ist der Wickelsinn der mittleren Spule dem der äußeren Spulen entgegengesetzt. Dadurch verursachen die Ströme nur Druckkräfte. Das ermöglicht, relativ kleine Porzellanisolatoren einzusetzen. Drosselspulen sind von einem starken Magnetfeld umgeben. Lose ferromagnetische Materialien werden deshalb zumindest im Kurzschluß in die Drosseln hineingerissen. Eisenteile in der Nähe dieser Spulen sollen keinen geschlossenen elektrischen Eisenkreis wegen Wirbelstromerwärmung bilden. Die Leiter dieser Drosselspulen sind durch isolierende Zwischenlagen zur Verminderung von Stromverdrängungseffekten unterteilt. Parallel zu Drosselspulen werden Widerstände zur Dämpfung eventueller Überspannungswellen eingesetzt.

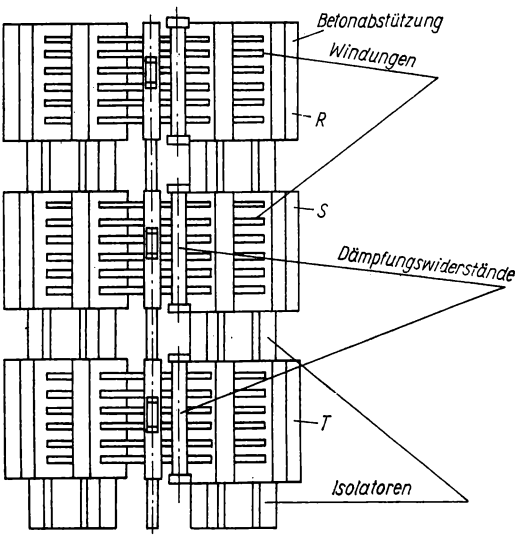


Bild 2.180. Drosselspule mit Betonabstützung

Die *Paralleldrosselspule*, auch Querdrossel-, Kompensations-, Ladestromspule oder Reaktor genannt, wird parallel an ein Drehstromsystem geschaltet. Ihre Aufgabe besteht primär in der Kompensation des kapazitiven Ladestromes leerlaufender oder schwach belasteter Hochspannungsleitungen.
Kompensationsspulen werden als Eisendrosseln unter Öl ausgeführt. Sie sind für Dauerbetrieb bemessen und normalerweise erst in Netzen über 220 kV erforderlich. Dabei werden sie meist an die Tertiärwicklung der Kuppeltransformatoren angeschlossen.

Tabelle 2.98 gibt die Kennwerte der in der DDR gefertigten Kompensationsspulen an.

Tabelle 2.98: Kennwerte für Kompensationsspulen[1])

P_n MW	U_n kV	I_n A	Schaltung	Transformator	Verluste W
10	12	480	Stern mit heraus-	220/110/10 kV	70
50	36	800	geführtem Mittel- punkt	380/220/30 kV	220

[1]) P_n Nennleistung, U_n Nennspannung, I_n Nennstrom

Bei größeren Leistungen (150···400 MW) werden Einphaseneinheiten zu Drehstromgruppen zusammengefaßt.
Um die Kompensationsleistung bei Störungen unverzögert zur Verfügung zu haben, werden Kompensationsspulen teilweise mittels Funkenstrecken eingeschaltet oder ihre Zu- und Abschaltung in den AWE-Zyklus mit einbezogen.

Sternpunktdrosselspulen werden als Einphaseneinheiten an den Sternpunkt des Transformators angeschlossen.
In Netzen mit induktiver Sternpunkterdung werden sie PETERSON- oder Erdschlußspule genannt. Ihre Aufgabe besteht darin, den kapazitiven Erdschlußstrom des Netzes zu kompensieren.
In Netzen mit niederohmiger oder starrer Sternpunkterdung dienen Sternpunktdrosselspulen zur Begrenzung des Erdkurzschlußstromes (in der DDR nicht angewandt).
Erdschlußspulen werden als Öldrosselspulen mit unterbrochenem Eisenkern für Nennspannungen von $6/\sqrt{3}$, $10/\sqrt{3}$, $20/\sqrt{3}$, $30/\sqrt{3}$, $110/\sqrt{3}$ kV und einem maximalen Spulenstrom bis 200 A gefertigt. Mit einem Umsteller kann die Stromaufnahme der Spule im strom- und spannungslosen Zustand in 5···6 Stufen bei der Reihenspannung < 110 kV max. 1:2,5 und ≧ 110 kV max. 1:2 verändert werden. Mit Tauchkernspulen läßt sich ein stetiger Regelbereich im Verhältnis 1:10 erreichen.
Die Nennleistung wird meist nur für Kurzzeitbetrieb (2 h) festgelegt.
Das *Erzeugen von Kraftwirkungen* auf ferromagnetische Körper wird in der Starkstromtechnik bei Hubmagneten, Aufspannfuttern, Zugmagneten für Relais, Schütze, Bremsen u. a. genutzt. Die Kraftwirkung beruht auf der Tatsache, daß paramagnetische, insbesondere ferromagnetische Stoffe von inhomogenen Magnetfeldern angezogen und diamagnetische Stoffe abgestoßen werden. Auf dieser Grundlage sind bereits Erzscheideanlagen gebaut worden.
Die anziehende bzw. abstoßende Wirkung wird verursacht durch das entsprechende Richten der Elementarmagnete dieser Stoffe im äußeren Magnetfeld. Para- und ferromagnetische Stoffe richten ihre Elementarmagnete dem äußeren Feld entgegen, so daß eine anziehende Wirkung zustande kommt. Bei diamagnetischen Stoffen ist es umgekehrt.
Die Hubkraft eines Elektromagneten ergibt sich zu

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu} = \frac{\mu A H^2}{2} \sim \mu I^2. \quad \text{(Formelzeichen s. 1.9.11.)}$$

Die quadratische Abhängigkeit der Hubkraft vom Strom erlaubt, Hubmagnete mit Gleich- oder Wechselstrom zu speisen. Jedoch schwankt die Hubkraft bei wechselstromgespeisten Magneten mit der doppelten Netzfrequenz zwischen Null und einem Spitzenwert. Das führt zu Materialverschleiß und Brummwirkung. Deshalb wird durch Spaltpole im Magnetkreis ein zeitlich verschobener, zusätzlicher Magnetfluß erzeugt.
Unterhalb des Sättigungsknicks ferromagnetischer Werkstoffe kann durch eine Stromverdoppelung eine vierfach größere Kraft erzeugt werden. Hochbelastete Zugmagnete werden daher stark gekühlt, z. B. mit Wasser.

2.10.3. Gedruckte Induktivitäten

Die *Induktivität gedruckter Leiter* ist die anteilige Induktivität einer Leiterschleife. Je weiter die Rückleitung entfernt ist, um so geringer ist ihr Einfluß. Die Induktivität eines geätzten Leiters mit 1···3 mm Breite und 35···105 µm Stärke beträgt grob 10 nH/cm. Schmale Leiter haben eine höhere, breite Leiter eine geringere Induktivität. Die Induktivität des gestreckten Leiters spielt meist erst bei solch hohen Frequenzen eine Rolle, bei denen die räumliche Ausdehnung des Leiters bereits an die Wellenlänge heranreicht und man ohnehin mit der verteilten Induktivität bzw. Kapazität rechnen muß.

Gedruckte Spulen werden als reine Luftspulen oder mit HF-Eisenkern in Rundfunk- und Fernsehempfängern sowohl im HF-Teil als auch im ZF-Teil eingesetzt. Es lassen sich so auch gewünschte Kopplungen, z. B. für Bandfilterzwecke, erzeugen. Die Spulen können rund, quadratisch, rechteckig, oder achteckig sein oder jede andere Form haben, die die Platzverhältnisse zulassen. Werden sehr kleine Induktivitäten benötigt, so genügen einfache Leiterschleifen und Mäanderformen. Die Windungskapazität solcher Spulen ist relativ hoch und in vielen Fällen nicht zu vernachlässigen. Sie führt zu einer scheinbaren Erhöhung der Induktivität, die mit Annäherung an die Parallelresonanzfrequenz immer stärker in Erscheinung tritt.
Eine exakte Berechnung dieser Induktivität ist praktisch nicht möglich. Erfahrung und Versuch müssen die endgültige Abmessung ergeben. Die Form sollte so gewählt werden, daß durch Verlängerung oder Verkürzung des inneren Anschlusses eine Korrektur leicht möglich ist. Bild 2.181 erlaubt eine überschlägliche Berechnung einer gedruckten Spule zwischen 0,1 µH und 30 µH mit der Form nach Bild 2.182. Für eine

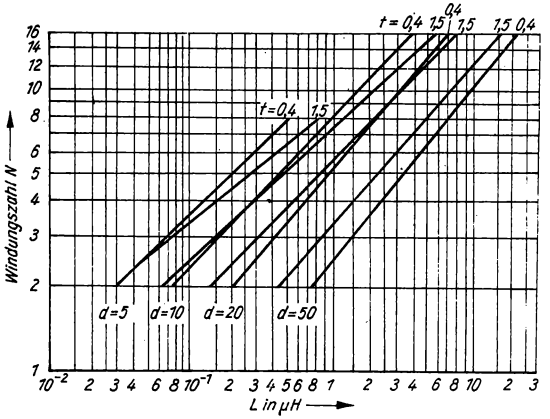


Bild 2.181. Berechnung gedruckter Spulen

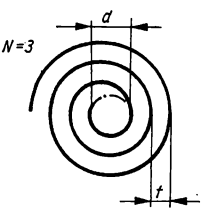


Bild 2.182. Form einer gedruckten Spule

vorgegebene Induktivität L kann die Windungszahl N von einseitigen Spulen in Abhängigkeit von dem freien Innendurchmesser d und der Spulenteilung t annähernd bestimmt werden.
Die elektrische Güte solcher Spulen ist nicht sehr hoch. Sie hat im unteren Frequenzbereich ansteigende Tendenz, weil der Blindwiderstand schneller wächst als die Verluste. Bei noch höheren Frequenzen überwiegt der Verlustanstieg den Blindwiderstandsanstieg, und die Güte sinkt wieder ab.
Wegen des weiten Streufeldes dieser Spulen werden sie allerdings auch von der Umgebung leicht beeinflußt. Elektrisch oder magnetisch leitende Flächen in der Umgebung können Induktivität und Güte ändern. In manchen Fällen wird dieser Effekt bewußt ausgenutzt, und anstelle der bekannten magnetischen Abgleichkerne werden zum Abgleich der Spulen elektrisch leitende Scheiben parallel zur Spulenfläche eingesetzt. Durch Annäherung der Scheibe an die gedruckte Spule läßt sich die Induktivität verkleinern (s. 1.9.11.4.).

2.11. Schwingkreise, Filter

2.11.1. Reihen- und Parallelschwingkreis

Das Prinzip des Reihen- bzw. Parallelschwingkreises zeigt Bild 2.183.

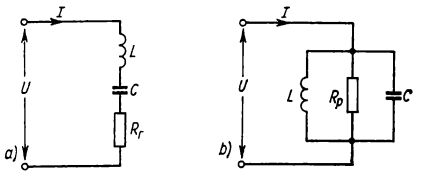


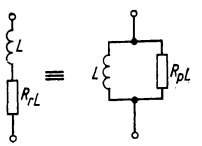
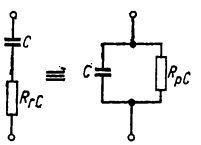
Bild 2.183. Schwingkreise
a) Reihenschwingkreis, b) Parallelschwingkreis

Resultierende Verlustwiderstände der Induktivität und Kapazität im Reihenschwingkreis R_r bzw. Parallelschwingkreis R_p:

$$R_r = R_{rL} + R_{rC}$$

$$R_p = \frac{R_{pL} \cdot R_{pC}}{R_{pL} + R_{pC}} \quad \text{(s. Tabelle 2.99)}$$

Tabelle 2.99: Darstellung der Verluste in L und C

Induktivität L	Kapazität C
	
$R_{pL} = \frac{(\omega L)^2}{R_{rL}}$	$R_{pC} = \frac{1}{R_{rC}(\omega C)^2}$
(s. Bild 2.184)	(s. Bild 2.185)

Der Strom- bzw. Spannungsverlauf an Schwingkreisen ist frequenzabhängig (Bild 2.189a) und wird bestimmt durch die Güte Q (größere Güte bedeutet steiler Kurvenverlauf und ausgeprägtes Maximum) und die Bandbreite B.

Güte Q: Maß der Verlustwiderstände des Schwingkreises (Kehrwert: Dämpfung).

Bandbreite B: Frequenzabstand, bei dem I von I_0 auf $0{,}707 I_0$ bzw. U von U_0 auf $0{,}707 U_0$ abgesunken ist.

Resonanzwiderstand Z_0: Wirkwiderstand eines Schwingkreises bei der Resonanzfrequenz f_0 (Blindwiderstände von Kondensator und Spule heben sich auf).
In Tabelle 2.100 sind die wichtigsten Größen des verlustbehafteten Schwingkreises in Reihen- bzw. Parallelschaltung zusammengestellt.

Beispiel zu Bild 2.184:
Gegeben: $L = 150\ \mu H$ (1), $R_{rL} = 1\ \Omega$ (2), $f = 1\ MHz$ (4); gesucht: R_{pL} (5).

Lösung: (1) – (2) → Hilfslinie h (3), (4) – h (3) → (5)
$R_{pL} = 880\ k\Omega$.

Eine optimale Anpassung des Schwingkreises an nachfolgende Schaltungselemente ist vorhanden, wenn der Resonanzwiderstand gleich dem Eingangswiderstand der nachfolgenden Stufe gewählt wird. Ist beispielsweise beim Parallelschwingkreis der nachfolgende Eingangswiderstand kleiner, muß eine Widerstandstransformation durch niederohmige Anzapfung des Schwingkreises (Aufteilung der Schwingkreisspule oder der Kapazität) oder durch niederohmige induktive Kopplung (Transformator) erfolgen.

Anwendung: Saugkreis, Sperrkreis, Selektivverstärker.

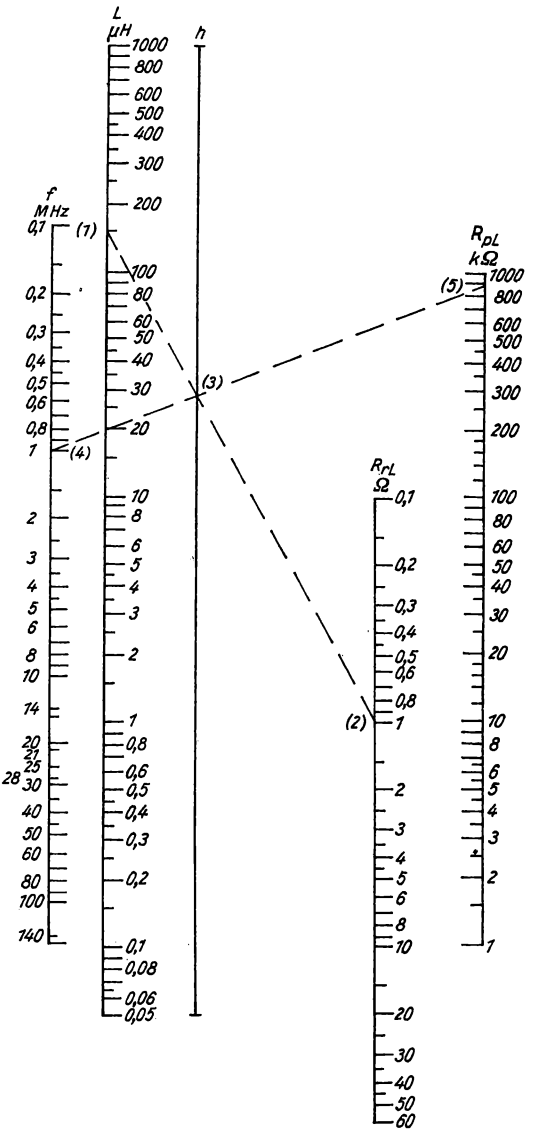


Bild 2.184. Umrechnung von Serien- in Parallelverluste bei Induktivitäten (nach Tabelle 2.99)

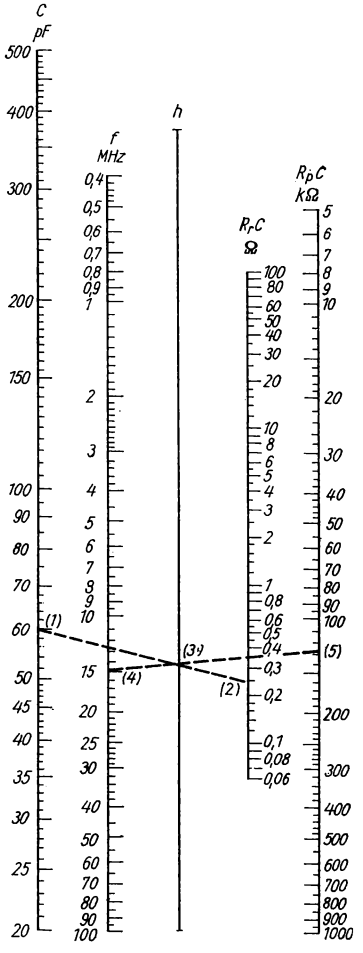


Bild 2.185. Umrechnung von Serien- in Parallelverluste bei Kapazitäten (nach Tabelle 2.99)

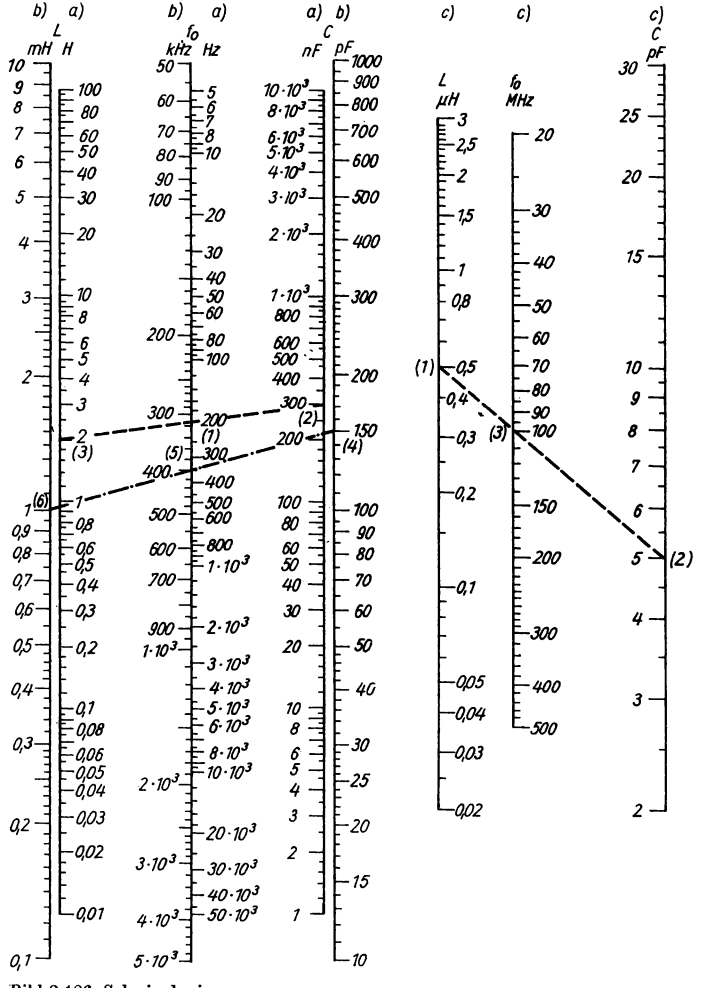


Bild 2.186. Schwingkreise
Leitern a) im NF-Bereich (5 Hz···50 kHz), Leitern b) im Bereich 50 kHz···5 MHz, Leitern c) im UKW-Bereich (20···500 MHz)

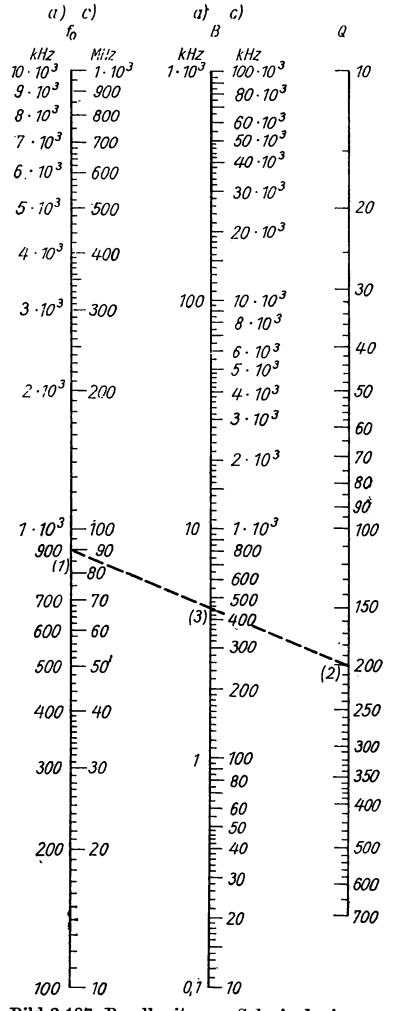


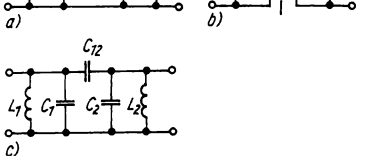
Bild 2.187. Bandbreite von Schwingkreisen (Leitern a)/a) bzw. c)/c) gehören zusammen)

Tabelle 2.100: Verlustbehafteter Schwingkreis

Größe	Reihenschwingkreis	Parallelschwingkreis
Resonanzfrequenz (THOMSONsche Schwingungsgleichung)	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	(s. Bild 2.186)
Kreisgüte Q	$Q = \frac{\omega_0 L}{R_r} = \frac{1}{\omega_0 C R_r}$	$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L} = \omega_0 C R_p$
Resonanzwiderstand Z_0	$Z_0 = R_r$ (niederohmig)	$Z_0 = R_p$ (hochohmig)
Scheinwiderstand Z	$Z = R_r\sqrt{1 + (Qv)^2}$	$Z = \frac{R_p}{\sqrt{1 + (Qv)^2}}$
Strom- bzw. Spannungsverhalten	$I = \frac{I_0}{\sqrt{1 + (Qv)^2}}$ $I_0 = \frac{U}{R_r}$	$U = \frac{U_0}{\sqrt{1 + (Qv)^2}}$ $U_0 = IR_p$
Bandbreite $B = \frac{f_0}{Q}$ (s. Bild 2.187)	$B = \frac{f_0 R_r}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$	$B = \frac{f_0}{R_p}\sqrt{\frac{L}{C}}$
Verstimmung $v = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}$		

2.11.2. Bandfilter

Bandfilter sind Resonanzkreisanordnungen, bei denen mehrere Resonanzkreise miteinander gekoppelt sind. Sie haben die Eigenschaft, aus einem Frequenzgemisch ein bestimmtes Frequenzband zu unterdrücken oder zu selektieren.
Verschiedene Kopplungsmöglichkeiten von Bandfiltern s. Bild 2.188.



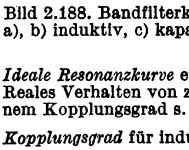


Bild 2.188. Bandfilterkopplungen
a), b) induktiv, c) kapazitiv

Ideale Resonanzkurve eines Bandfilters: Rechteckform.
Reales Verhalten von zweikreisigen Bandfiltern bei verschiedenem Kopplungsgrad s. Bild 2.189.

Kopplungsgrad für induktive Kopplung: $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$.

Die Veränderung des Kopplungsgrades ist durch eine Änderung des Abstandes und der räumlichen Lage der Induktivität möglich.

Unterkritische Kopplung: Form der Resonanzkurve entspricht der des Einzelschwingkreises (Bild 2.189 a).

Kritische Kopplung: Beginn der Einsattelung der Resonanzkurve, die Bandbreite ist um den $\sqrt{2}$fachen Betrag größer als beim Einzelschwingkreis (Bild 2.189 b).

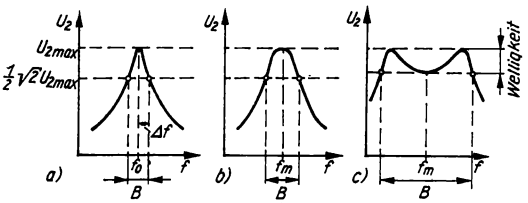


Bild 2.189. Übertragungskurven zweikreisiger Bandfilter in Abhängigkeit vom Kopplungsgrad bei transformatorischer Kopplung
a) unterkritisch, b) kritisch, c) überkritisch

Überkritische Kopplung: 2 Höcker in der Resonanzkurve. Die Bandbreite wird deshalb in Höhe des Sattels angegeben. Abstand zwischen Höcker- und Sattelpunkt der Resonanzkurve ist Welligkeit. Die Höcker liegen um so weiter auseinander, je größer die überkritische Kopplung wird (Bild 2.189 c).
Die Bandmittenfrequenz f_m in den Bildern 2.189 b) und c) entspricht der Resonanzfrequenz f_0 des Einzelkreises.

Annäherung an ideale Kurvenform:

a) Erhöhung der Flankensteilheit durch Kombination von Schwingkreisen gleicher Resonanzfrequenz bei gleichzeitiger Verringerung der Bandbreite, z. B. $b_{ges} = 0{,}642b$ (zweikreisig) und $b_{ges} = 0{,}51b$ (dreikreisig).

b) Annäherung an Rechteckform durch Kombination von Schwingkreisen mit versetzten Resonanzfrequenzen bei gleichzeitiger Erhöhung der Bandbreite.
Zur Berechnung der Einzelschwingkreise des Bandfilters und der optimalen Anpassung an nachfolgende Schaltungselemente s. 2.11.1.

2.11.3. *LC*-Filter (Siebschaltungen)

Neben den in 2.11.1. behandelten Schwingkreisen sind weitere Vierpole zum Einsatz speziell als Siebglieder geeignet. Die wichtigsten Vierpole und ihre Übertragungskurven sind in Tabelle 2.101 enthalten.
Um das Grundsätzliche hervorzuheben, soll die Dämpfung im Durchlaßbereich gleich Null sein, d. h., es gelten die Randbedingungen: Induktivität und Kapazität verlustfrei; Filter bei jeder Frequenz exakt angepaßt mit dem Wellenwiderstand $\underline{Z}_L$.

$\underline{Z}_L = Z_0\sqrt{1 - \Omega^2}$ für T-Schaltung und

$\underline{Z}_L = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \Omega^2}}$ für π-Schaltung.

In der Nähe der Grenzfrequenz steiler Anstieg der Dämpfung (vorher vernachlässigbar).
In Tabelle 2.102 sind die Berechnungsformeln für die *LC*-Filter ohne Anpassung angegeben.

Grenzfrequenz: Frequenz eines ideal angepaßten verlustfreien Filters, bei der eine merkliche Dämpfung einsetzt,

normierte Frequenz Ω: Verhältnis zwischen betrachteter Frequenz und der durch Dimensionierung vorgegebenen Resonanzfrequenz bzw. Bandmittenfrequenz,

Betriebsdämpfung a_B: Gesamtheit der Vierpoldämpfung a, der Stoßverluste zwischen Generator und Vierpol oder Vierpol und Verbraucher, der Dämpfungen infolge Gütemängel der Schaltelemente und der Verluste, wenn der Verbraucherwiderstand ungleich dem Generatorinnenwiderstand ist,

Betriebswinkelfrequenzen ω_h bzw. ω_t: höchste/tiefste Frequenz im realen Übertragungsbereich der Frequenzen, bedingt durch unvermeidbare Verluste,

Wellenwiderstand $\underline{Z}_L$: frequenzabhängiger Scheinwiderstand,

Nennwert des Wellenwiderstandes Z_0: frequenzunabhängiger Teil des Wellenwiderstandes.

Verlauf des Wellenwiderstandes der *LC*-Filter im Durchlaßbereich s. Bild 2.190 (T-Schaltung) und Bild 2.191 (π-Schaltung). Durch Einsetzen der wirklichen Frequenzen anstelle der normierten kann der tatsächliche Verlauf des Wellenwiderstandes für den jeweiligen Filtertyp aufgetragen werden.

Tabelle 2.101: Grundschaltungen und Übertragungskurven der LC-Filter

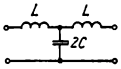
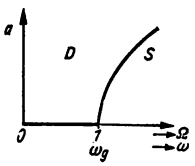
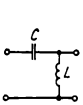
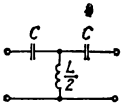
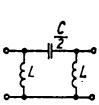
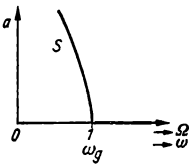
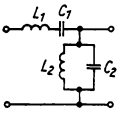
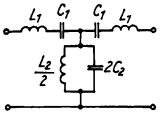
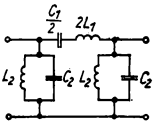
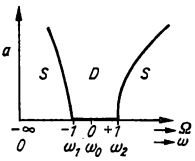
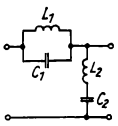
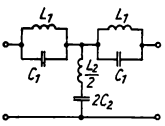
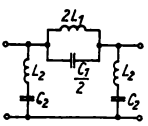
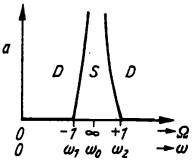
Filter	Grundschaltungen			Übertragungskurve (D Durchlaßbereich, S Sperrbereich)	Frequenzbereiche
	Halbglied	T-Schaltung (bezogen auf das Halbglied)	π-Schaltung		
Tiefpaß					D: $0 < \omega < \omega_g$ S: $\omega_g < \omega < \infty$
Hochpaß					D: $\omega_g < \omega < \infty$ S: $0 < \omega < \omega_g$
Bandpaß					D: $\omega_1 < \omega < \omega_2$ S: $0 < \omega < \omega_1$ $\omega_2 < \omega < \infty$
Bandsperre					D: $0 < \omega < \omega_1$ $\omega_2 < \omega < \infty$ S: $\omega_1 < \omega < \omega_2$

Tabelle 2.102: Berechnungsformeln für LC-Filter

	Tiefpaß	Hochpaß	Bandpaß	Bandsperre
Grenzwinkelfrequenz	$\omega_g = \frac{1}{\sqrt{LC}}$		$\omega_1 = \frac{\omega_0^2}{\omega_2}$; $\omega_2 = \frac{\omega_0^2}{\omega_1}$	
Bandmittenfrequenz	–		$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$	
Normierte Frequenz	$\Omega = \frac{\omega}{\omega_g}$	$\Omega = -\frac{\omega_g}{\omega}$	$\Omega = \frac{1}{B}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$	$\Omega = -B\frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$
Nennwert des Wellenwiderstandes	$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$		$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}} = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}}$	
Kapazität	$C = \frac{1}{\omega_g Z_0}$		$C_1 = \frac{1}{Z_0}\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0^2}$	$C_1 = \frac{1}{Z_0}\frac{1}{\omega_2 - \omega_1}$
			$C_2 = \frac{1}{Z_0}\frac{1}{\omega_2 - \omega_1}$	$C_2 = \frac{1}{Z_0}\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0^2}$
Induktivität	$L = \frac{Z_0}{\omega_g}$		$L_1 = \frac{Z_0}{\omega_2 - \omega_1}$	$L_1 = Z_0\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0^2}$
			$L_2 = Z_0\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0^2}$	$L_2 = Z_0\frac{1}{\omega_2 - \omega_1}$
Bandbreite absolut			$B = \omega_2 - \omega_1$	
relativ			$B = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$	

In der Praxis ist die Dämpfung im Durchlaßbereich $\neq 0$. Ursachen sind die Wirkverluste der Induktivitäten und Kapazitäten, die zu einer geringen, praktisch konstanten Grunddämpfung führen, und die Verluste durch Fehlanpassung infolge Frequenzabhängigkeit des Wellenwiderstandes. Das Filter kann immer nur mit einem einzigen festen Widerstand abgeschlossen werden. Im Durchlaßbereich muß demzufolge, vor allem in der Nähe der Grenzfrequenz, mit Reflexionen der Energie und deshalb mit Dämpfungsverzerrungen gerechnet werden. Die Größe des Abschlußwiderstandes R wird so gewählt, daß die Fehlanpassungen im Durchlaßbereich optimal sind. Eine optimale Anpassung erhält man mit $R = 0{,}8Z_0$ (T-Schaltung) und $R = 1{,}25Z_0$ (π-Schaltung) (entsprechend Bild 2.190 bzw. 2.191) bei $\Omega = 0{,}6$.

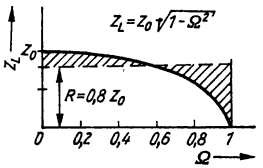


Bild 2.190. Verlauf des Wellenwiderstandes im Durchlaßbereich bei T-Schaltung

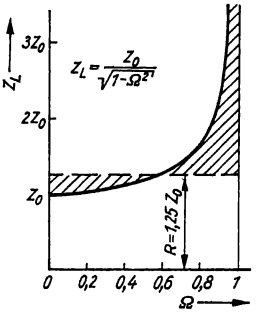


Bild 2.191. Verlauf des Wellenwiderstandes im Durchlaßbereich bei π-Schaltung

Berücksichtigt man, daß infolge der Fehlanpassung der Übertragungsbereich praktisch nicht bis an die errechnete Grenzfrequenz heranreicht, muß man diese etwas höher/tiefer als die höchste/tiefste noch einwandfrei zu übertragende Betriebsfrequenz wählen. Der Abstand zwischen den Grenzfrequenzen und der Betriebsfrequenz hängt von der als zulässig angesehenen Betriebsdämpfung ab. Soll diese zwischen 0,87 und 1,30 dB (0,1 und 0,15 Np) liegen, erstreckt sich der Übertragungsbereich nach Bild 2.192 bis $\Omega \approx 0{,}9$. Daraus folgt z. B. $\omega_h \approx 0{,}9\omega_g$ für den Tiefpaß und $\omega_t \approx \omega_g/0{,}9$ für den Hochpaß. Für Bandpaß und Bandsperre gilt die analoge Anwendung dieser Beziehungen bezüglich Grenzfrequenzen und Übertragungsbereich.

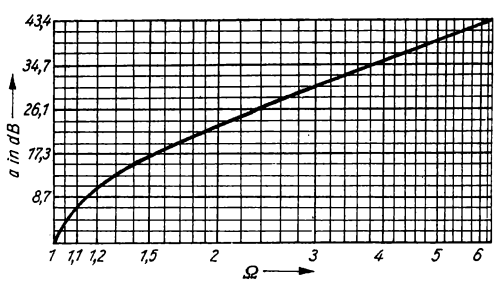


Bild 2.192. Sperrdämpfung in Abhängigkeit der normierten Frequenz Ω

Bild 2.192 zeigt die Dämpfung im Sperrbereich als Funktion der normierten Frequenz (vgl. Tabelle 2.102) für die LC-Filter.
Ist der Dämpfungsanstieg im Sperrbereich in der Nähe der Grenzfrequenz nicht steil genug, so kann man mehrere Glieder hintereinander schalten. Bei Verwendung zweier Glieder (Bilder 2.193 und 2.194) wird die Gesamtdämpfung doppelt so groß.

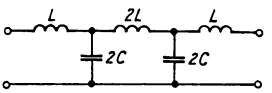


Bild 2.193. Kettenschaltung zweier T-Glieder beim Tiefpaß

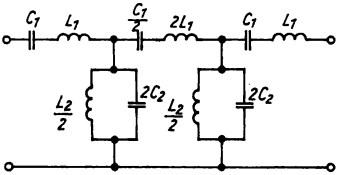


Bild 2.194. Kettenschaltung zweier T-Glieder beim Bandpaß

Beispiele zur Berechnung von Siebschaltungen:

1. Es ist ein Tiefpaß für eine Grenzfrequenz von 1,2 kHz und einem Nennwert des Wellenwiderstandes $Z_0 = 600\,\Omega$ zu entwerfen. Wie groß sind L und C (T-Schaltung), der Abschlußwiderstand R sowie die Grenze des ungefähren Übertragungsbereiches?

$$L = \frac{Z_0}{\omega_g} = \frac{600\,\Omega}{6{,}28 \cdot 1200\ \mathrm{s^{-1}}} = 79{,}5\ \mathrm{mH}$$

$$R = 0{,}8Z_0 = 480\,\Omega$$

$$= \frac{1}{\omega_g Z_0} = \frac{1}{600\,\Omega \cdot 1200\ \mathrm{s^{-1}} \cdot 6{,}28} = 0{,}222\ \mu\mathrm{F}$$

$$f_h = 0{,}9 f_g = 1080\ \mathrm{Hz}.$$

Die Querkapazität entsprechend der Schaltung in Tabelle 2.101 beträgt dann $2C = 0{,}444\ \mu\mathrm{F}$.

2. Ein Bandpaß (T-Schaltung) für ein Frequenzband (Übertragungsbereich) von 4,5···7,6 Hz ist zu dimensionieren. Er arbeitet zwischen den Widerständen $R = 600\,\Omega$. Der Dämpfungsverlauf ist in Abhängigkeit von der Frequenz darzustellen.

$$Z_0 = 1{,}25R = 1{,}25 \cdot 600\,\Omega = 750\,\Omega$$

$$f_0 = \sqrt{f_h f_t} = \sqrt{7{,}6 \cdot 4{,}5} = 5{,}85\ \mathrm{kHz} \quad \text{und damit} \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = 36740\ \mathrm{s^{-1}}.$$

Um die Kantenverzerrungen an den Übertragungsgrenzen gering zu halten, folgt

$$f_1 = 0{,}9 f_t = 0{,}9 \cdot 4{,}5\ \mathrm{kHz} = 4{,}05\ \mathrm{kHz}$$

$$f_2 = \frac{f_h}{0{,}9} = \frac{7{,}6\ \mathrm{kHz}}{0{,}9} = 8{,}44\ \mathrm{kHz}.$$

Bandbreite B des Bandpasses

$$B = f_2 - f_1 = 4{,}39\ \mathrm{kHz} \quad \text{oder} \quad B = 27570\ \mathrm{s^{-1}}.$$

Schaltelemente der Halbglieder

$$L_1 = \frac{Z_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{750\,\Omega}{27570\ \mathrm{s^{-1}}} = 27{,}2\ \mathrm{mH}$$

$$L_2 = Z_0 \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0^2} = 750\,\Omega\,\frac{27570\ \mathrm{s^{-1}}}{36740^2\ \mathrm{s^{-2}}} = 15{,}4\ \mathrm{mH}$$

$$C_1 = \frac{1}{Z_0}\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0^2} = \frac{1}{750\,\Omega}\,\frac{27570\ \mathrm{s^{-1}}}{36740^2\ \mathrm{s^{-1}}} = 27{,}3\ \mathrm{nF}$$

$$C_2 = \frac{1}{Z_0}\frac{1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{1}{750\,\Omega}\,\frac{1}{27570\ \mathrm{s^{-1}}} = 48{,}4\ \mathrm{nF}.$$

In die vollständige Schaltung sind im Querzweig die Werte für $L_s/2$ und $2C_s$ entsprechend T-Schaltung einzusetzen.
Durch Errechnung einiger Ω-Werte mit frei gewählten Frequenzen ober- und unterhalb der Grenzfrequenzen (Tabelle 2.103) und Ablesen der dazugehörigen Dämpfungswerte aus Bild 2.192 erhält man den Dämpfungsverlauf im Bild 2.195.

Tabelle 2.103: Parameter für den Dämpfungsverlauf im Bild 2.195

Kenngröße	Einheit	Kennwerte					
$f \geqq f_2$	kHz	8,44	9	10	11	12	15
$f \leqq f_1$	kHz	4,05	3,81	4,42	3,10	2,86	2,28
Ω		±1	±1,18	±1,50	±1,80	±2,08	±2,90
a	dB	0	10,4	16,5	20,8	23,9	30,4

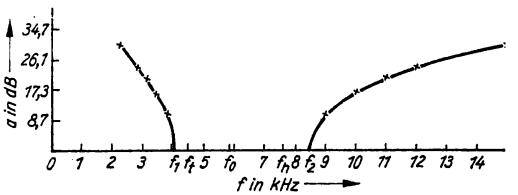
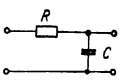
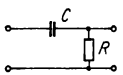
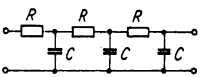
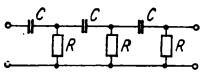
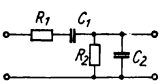
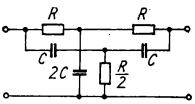


Bild 2.195. Dämpfungsverlauf eines Bandpasses in T-Schaltung

2.11.4. *RC*-Filter

Eigenschaften im Vergleich zu *LC*-Filtern: einfacherer Aufbau, geringerer Raumbedarf, unempfindlicher gegen fremde Spannungen und Anwendung auch bei sehr niedrigen Frequenzen, begrenzter Einsatz bei höheren Frequenzen infolge der Schaltkapazitäten und deren höherer Betriebsdämpfung. Bei der Dimensionierung gibt man zweckmäßigerweise die Kapazität vor, da sich mit dem Widerstand eine feinere Abstufung erreichen läßt.
Tabelle 2.104 gibt eine Übersicht über häufig verwendete *RC*-Filter.

Tabelle 2.104: Schaltungen wichtiger RC-Filter

Filter	Schaltung
Tiefpaß	
Hochpaß	
Phasenketten Tiefpaß	
Hochpaß	
WIEN-Brücke	
Doppel-T-Glied	

Anwendung

RC-Tiefpaß-Siebketten

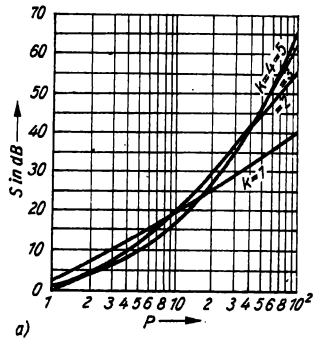
Siebfaktor S: $S = \frac{U_1}{U_2} \approx \omega C_{ges} R_{ges}$

(bei *RC*-Ketten) 1 Eingang, 2 Ausgang

Dimensionierung: Aufteilung der Kette in k gleiche Glieder ist am günstigsten. Mit Bild 2.196 kann der Siebfaktor für gleichgliedrige Siebketten vom Produkt $P = \omega C_{ges} R_{ges}$ sofort abgelesen werden. Tabelle 2.105 zeigt die optimalen Werte für k in Abhängigkeit von P, z. B. für $11 > P > 1$ folgt 1 Siebglied und $36 > P > 11$ folgen 2 Siebglieder usw.

Tabelle 2.105: Siebfaktor einer RC-Siebkette mit k gleichen Gliedern in Abhängigkeit von $P = \omega R_{ges} C_{ges}$

P	k					
	1	2	3	4	5	6
1	1,42	1,20	1,24	1,12	1,14	1,11
2	2,24	1,68	1,52	1,46	1,42	1,39
4	4,12	3,00	2,58	2,39	2,30	2,23
8	8,07	6,7	5,5	4,96	4,65	4,41
16	16,1	19,2	15,8	13,4	13,2	11,3
25	25	42	37,7	31,6	27,8	27,0
49	49	154	194	177	157	135
64	64	260	375	410	367	310
100	100	630	1450	1900	1880	1690
150	150	1070	4500	8650	10450	$11 \cdot 10^3$
400	400	10000	$85 \cdot 10^3$	$405 \cdot 10^3$	$1{,}1 \cdot 10^6$	$2{,}2 \cdot 10^6$



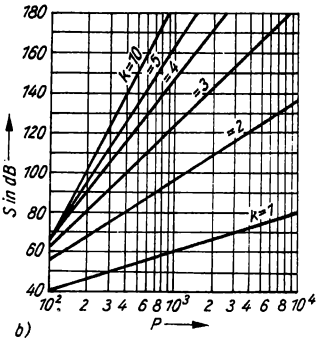


Bild 2.196. Abhängigkeit der Spannungsdämpfung einer *RC*-Siebkette mit k gleichen Gliedern vom Produkt $P = \omega R_{ges} C_{ges}$

Beispiel: Gesucht sei eine Siebung für einen Zweiweggleichrichter ($\omega = 628$ 1/s) mit einer Brummdämpfung von 80 dB bei $R_{ges} = 32$ kΩ.

Lösung: $P = \omega R_{ges} C_{ges}$. Mit $C_{ges} = \frac{P}{R_{ges}\omega}$ folgt $C_{ges} = \frac{P}{20}$ in µF.

Im Bild 2.196 b) findet man bei 80 dB eine erforderliche Gesamtkapazität für $k = 1$ von 500 µF, $k = 2$ von 20 µF, $k = 3$ von 10 µF und $k = 4$ von 7 µF. Wählt man $k = 4$, so benötigt man 4 Widerstände von je 8 kΩ und 4 Kondensatoren von je 1,75 µF.

RC-Phasenketten

Reihenschaltung einfacher *RC*-Phasenschieber, Summe der Phasenverschiebungen der Einzelglieder ergibt Phasenverschiebung der Phasenkette.
Die in der Praxis am häufigsten verwendeten Phasenketten sind die dreigliedrigen zur 180°-Phasenverschiebung, die allerdings nur für eine einzige Frequenz erreicht wird, welche von der Bemessung der *RC*-Kette abhängig ist.
Bei Verwendung als Rückkopplungsvierpol für *RC*-Generatoren ist zur Schwingungserregung eine Verstärkung von $v \geqq 29$ notwendig.

Resonanzwinkelfrequenz $\omega_0 = \frac{\sqrt{6}}{RC}$ beim dreigliedrigen Hochpaß;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6}\,RC}$ beim dreigliedrigen Tiefpaß.

RC-Generator mit Wien-Brücke

Der *RC*-Generator besteht aus der Zusammenschaltung eines steuerbaren elektronischen Bauelements (z. B. zweistufiger Verstärker mit Drehung der Phase um 360°) mit WIENschem Brückenzweig in Rückkopplungsschaltung. Das System kann schwingen, wenn der Verstärker eine Verstärkung von mindestens 3 hat. Der WIENsche Brückenzweig bewirkt keine Phasenverschiebung zwischen Ein- und Ausgangsspannung, am Ausgang des Brückenzweiges erscheint nur eine einzige Schwingung, die nach Passieren des Brückenzweiges eine Phasenverschiebung von Null und dabei die größte Amplitude aufweist. Es wird also eine einzige Schwingung aus einem Frequenzgemisch herausgehoben, verstärkt, weiter herausgehoben und wieder verstärkt, so daß es hierdurch zum Aufschaukeln der Schwingung und damit zum Arbeiten des Generators kommt.

Resonanzwinkelfrequenz $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$

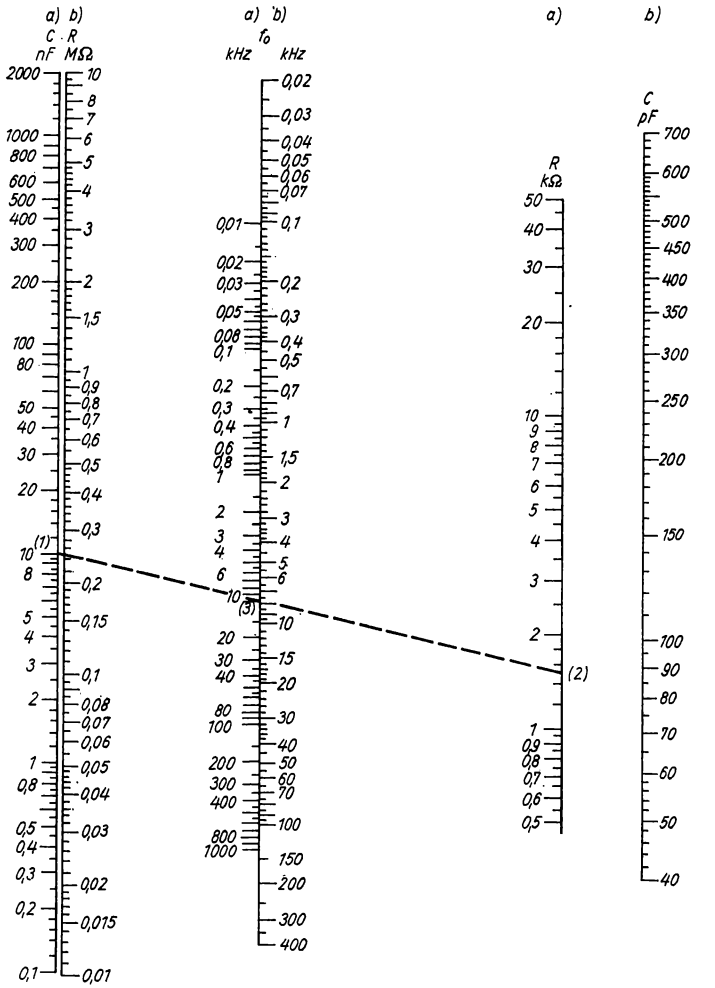


Bild 2.197. Doppel-T-Filter und *RC*-Generator mit WIEN-Brücke

Das Nomogramm im Bild 2.197 kann für die Berechnung der Oszillatorfrequenz von *RC*-Generatoren mit WIEN-Brücke, aber auch für die Berechnung der Resonanzfrequenz von Doppel-T-Filtern benutzt werden. Dabei gilt jedoch $R_1 = R_2 = R$ und $C_1 = C_2 = C$ mit der Näherungsformel $f_0 = \frac{1}{2\pi CR}$. Die Leitern a)/a) gelten für die Verwendung eines Doppel-Potentiometers für R_1 und R_2 und die Leitern b)/b) für die Verwendung eines Doppel-Drehkondensators bei der WIEN-Brücke bzw. für kleine *C*-Werte beim Doppel-T-Filter.

Beispiel: Gegeben sind $C = 10$ nF und $R = 1{,}5$ kΩ. Durch Verbinden von (1) und (2) im Bild 2.197 findet man die Resonanzfrequenz $f_0 = 10$ kHz (3).

RC-Doppel-T-Filter

Es wird vorwiegend zum Ausfiltern einer Störfrequenz benutzt oder in den Gegenkopplungszweig eines Verstärkers geschaltet. Die Anwendung ist besonders bei niedrigen Frequenzen vorteilhaft, da *LC*-Filter größere Induktivitäten benötigen, die unhandlich und teuer sind.
Mit Hilfe des Nomogramms im Bild 2.198 werden die Widerstände bei gegebenem *f* und *C* entsprechend Schaltung in Tabelle 2.104 dimensioniert.

Beispiel: Gesucht sei ein *RC*-Doppel-T-Filter mit einer Sperrfrequenz von 200 Hz. Der Kondensator *C* soll den Wert 1 µF annehmen. Der zugehörige Widerstand *R* folgt aus dem Nomogramm im Bild 2.198 zu $R = 760\ \Omega$.

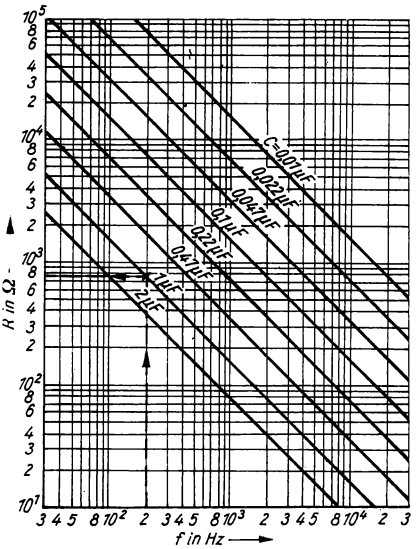


Bild 2.198. Ermittlung der Widerstände für Doppel-T-Filter Parameter: Kapazität

2.11.5. Mechanische Filter

Auf der Grundlage von Stoffen, die im elektrischen Feld je nach Richtung ihre Länge ändern (Elektrostriktion, s. 1.9.1.3.), und anderen, die im magnetischen Feld ihre Länge ändern (Magnetostriktion), können mechanische Filter aufgebaut werden. Diese Art von Filtern ist sehr selektiv und langzeitkonstant. Deshalb wird mechanischen Filtern oft der Vorzug vor *LC*-Filtern gegeben.

2.11.5.1. Elektromechanische Filter

Schwingquarze können in Oszillatorschaltungen als frequenzbestimmende Elemente wirken, indem sie entweder

a) als reiner Wirkwiderstand (Reihenresonanzschaltungen) oder

b) als frequenzabhängiger Scheinwiderstand (Parallelresonanzschaltungen)

geschaltet werden. Dies gilt hauptsächlich für Grundwellenquarze.

Zu a): Je kleiner der Quarzersatzwiderstand, um so größer ist die Wirksamkeit des Quarzes. Voraussetzungen: kleiner Dämpfungsfaktor und Nebenwellenfreiheit.

Zu b): Die üblichen Parallelresonanzschaltungen lassen sich aus der kapazitiven oder aus der induktiven Dreipunktschaltung ableiten [Bilder 2.199a) und b)].

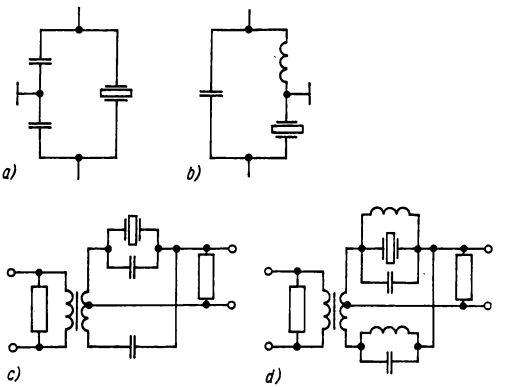


Bild 2.199. Schaltungen von Schwingquarzen [a) und b)] und Filterquarzen [c) und d)]

Da der Quarz wegen der Eindeutigkeit der Frequenz üblicherweise als induktiver Blindwiderstand betrieben wird, läßt sich dabei die Induktivität des Kreises oder ein Teil davon durch die scheinbare Induktivität des Quarzes ersetzen. In der Praxis werden Quarzgeneratoren meistens in Parallelresonanzschaltung ausgeführt. Ihr Vorteil liegt darin, daß im Fall der aperiodischen Schaltung keinerlei Abstimmittel benötigt werden.

Filterquarze benutzt man oft als Reihenresonanzkreis einer Art Brückenschaltung [Bild 2.199c)].
Wegen der geringen Quarzverluste weisen diese Kreise gegenüber vergleichbaren *LC*-Filtern eine um 2···3 Zehnerpotenzen geringere Dämpfung auf.
Einfache Quarzfilter (π- und T-Glieder) haben gegenüber den Brückenschaltungen den Nachteil der schwierig kompensierbaren Quarzhalterkapazität. Hier ergibt sich neben den steilen Flanken der Übertragungskurve eine unerwünschte Einsattelung (Antiresonanzpunkt). Bei dieser Frequenz bilden Quarz und Halterungskapazität einen unerwünschten Parallelresonanzkreis.
Bild 2.199d) zeigt ein Breitbandquarzfilter in Brückenschaltung. Der verbreiterte Frequenzbereich wird durch die Parallelinduktivitäten erzielt.
Die Durchlaßbreite eines Quarzfilters kann auch mit einem vor dem Quarz liegenden Resonanzkreis verändert werden.

2.11.5.2. Magnetomechanische Filter

Magnetomechanische Filter sind Bauelemente, die aus einem mechanischen Schwingungsgebilde und zwei Wandlern bestehen. Vom eingangsseitigen Wandler wird die elektrische in mechanische und vom ausgangsseitigen Wandler die mechanische in elektrische Energie umgewandelt.
Auf Grund der großen Schwinggüte mechanischer Resonatoren (5000···20000!) werden besonders günstige Selektionseigenschaften erreicht. Die mit magnetomechanischen Filtern erzielten Flankensteilheiten und Sperrdämpfungen lassen sich mit konventionellen *LC*-Siebschaltungen zum Teil überhaupt nicht, mit Quarzfiltern nur unter großem Aufwand erreichen.
Beim Einbau erübrigt sich die Abgleicharbeit. Die Wandler einiger Filter sind so ausgelegt, daß die Filter sowohl in Röhrenschaltungen als auch in Verbindung mit Transistoren eingesetzt werden können.

Der Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenz hat so kleine Werte, daß thermische Einflüsse auf die Filtercharakteristik praktisch ohne Bedeutung sind.
Eingang und Ausgang der mechanischen Filter sind vertauschbar. Die Anzahl der notwendigen Resonatoren richtet sich nach den technischen Anforderungen an das Selektionsverhalten des betreffenden mechanischen Filters.
Die Filter sind in oberflächenvergüteten und klimasicheren Metallgehäusen untergebracht, und die Anschlüsse werden über Glasdurchführungen in die Filter geleitet, so daß sie gegen Einflüsse der Luftfeuchte geschützt sind. Die Stoß- und Schüttelfestigkeit genügt hohen technischen Anforderungen.
Bild 2.200 zeigt z. B. das Anschlußbild und das Selektionsverhalten eines magnetomechanischen Bandfilters vom Typ MF 200-0050, welches mit 8 Kreisen arbeitet.

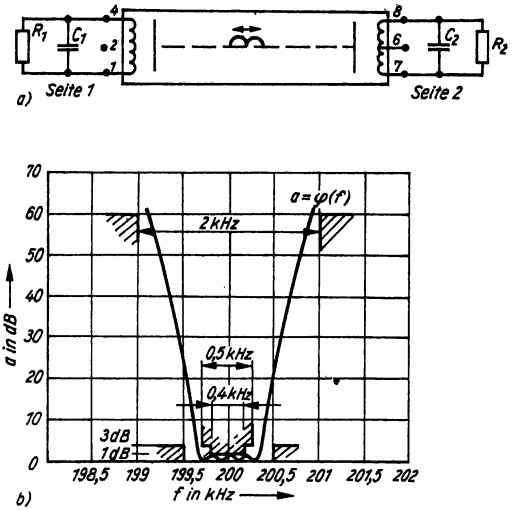


Bild 2.200. Magnetomechanische Bandfilter
a) Anschlußbild, b) Selektionsverhalten

Dieses Filter hat folgende Werte:

Kreiszahl	8
Bandmittenfrequenz f_M	195···205 kHz
Betriebstemperaturbereich	−10···+70 °C
Bandbreite bei 3 dB	500 Hz
Welligkeit im Durchlaßbereich	= 1 dB
Betriebsgrunddämpfung a	= 3 dB
Sperrdämpfung in den Bereichen $f_M \pm (1···50)$ kHz	= 60 dB
Abschlußwiderstände Seite 1	R_1 = 1,2 kΩ ± 3%
Seite 2	R_2 = 2,5 kΩ ± 3%
max. Eingangsspannung	6 V
max. Gleichspannung der Anschlüsse gegen Gehäuse	90 V

2.12. Gedruckte Schaltungen

2.12.1. Allgemeines, Begriffe, Arten

In den letzten Jahren haben gedruckte Schaltungen Eingang in alle Zweige der elektronischen und elektrischen Industrie gefunden und damit immer mehr die konventionelle Verdrahtung verdrängt. Größter Bedarfsträger ist die Rundfunk-, Fernseh- und Phonoindustrie. Wesentliche *Vorteile* der gedruckten Schaltung sind:

- Vereinigung der Funktion einer mechanischen Halterung von Bauelementen und/oder Bausteinen und Herstellen der elektrischen Verbindungen;
- Anwendung hochproduktiver Lötverfahren (Schwallöten) durch die in einer Ebene liegenden Lötstellen;
- Möglichkeit des Einsatzes automatischer Bestückungsverfahren;
- bessere Übersichtlichkeit und Prüfung der Schaltung und damit Erhöhung der Servicefreundlichkeit der Geräte;
- hohe Betriebssicherheit der Geräte bei mechanischer Belastung;
- Realisierung von Schaltungen auf kleinstem Raum.

Ihr *Nachteil* ist, daß sie nur für den Zweck eingesetzt werden können, für den sie konstruiert und gefertigt wurden.
Gedruckte Schaltungen bestehen aus einem Träger — der Leiterplatte — und den Bauelementen bzw. Bausteinen. Als *Trägermaterial* (Basismaterial) wird nach TGL 11651 ein- oder beidseitig kupferkaschiertes Hartpapier auf Phenol- und Kresolharzbasis und kupferkaschiertes Glashartgewebe auf Epoxidharzbasis für starre Leiterplatten und kupferkaschierte Polyesterfolie für flexible Leiterplatten verwendet. Flexible Leiterplatten werden vorwiegend dort eingesetzt, wo sich eine Schaltung den gegebenen Formen anpassen muß, z. B. in Relais, Bausteinen, Telefonapparaten, Armaturenbrettverdrahtungen bei Kraftfahrzeugen, Kameras, Meßinstrumenten, Rundfunk-, Phono- und Fernsehgeräten.
Dicke des Basismaterials für starre Leiterplatten 0,5; 0,8; 1,0; 1,5 (Vorzugswert); 2,0; 2,5; 3,0; 6,0 mm, Tafelformat 560 mm × 1060 mm, Dicke der Kupferfolie 25 µm (Vorzugswert), 35 und 70 µm. Reinheit der Folie mind. 99,5%, elektrischer Widerstand bei 20 °C und 25 µm Foliendicke max. 5,0 mΩ.
Weitere Kennwerte s. Tabellen 2.106···2.108.

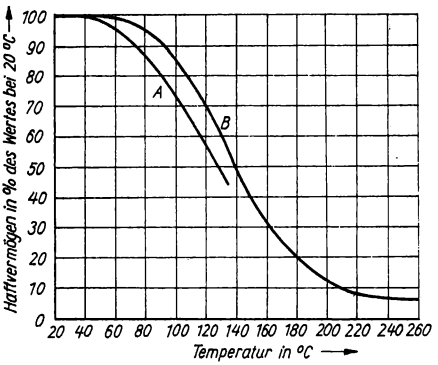


Bild 2.201. Haftvermögen der Kupferfolie bei erhöhter Temperatur
A: kupferkaschiertes Hartpapier, B: kupferkaschiertes Glashartgewebe

Allgemeine, mechanische und elektrische Kennwerte sowie Qualität der kupferkaschierten Oberfläche für flexibles Basismaterial s. TGL 11651/03···05.
Nach einem *Ätzverfahren* (*Subtraktivtechnik*) wird vom Basismaterial das überschüssige Kupfer weggeätzt, so daß nur das Leiterbild einschließlich der Anschlußflächen (Lötaugen) übrigbleibt. Zuvor müssen die Stellen der Kupferfolie, die erhalten bleiben sollen, mit einer ätzbeständigen Schicht resistent gemacht werden (Bild 2.202). Das geschieht in Abhängigkeit vom

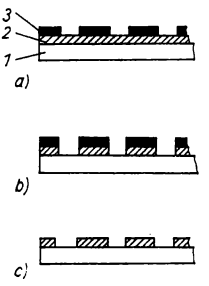


Bild 2.202.
Ätzen von Leiterplatten
a) Basismaterial mit aufgebrachter Ätzschutzschicht,
b) Basismaterial geätzt,
c) Ätzschutzschicht entfernt, fertige Leiterplatte;
1 Isolierstoffträger, 2 Kupferfolie, 3 Ätzschutzschicht

Tabelle 2.106: Allgemeine und mechanische Kennwerte für starres Basismaterial

Kenngröße		Einheit	Kennwerte	
			Hartpapier	Glashartgewebe
Biegefestigkeit σ_B		MPa mind.	80···100	300
Haftvermögen der Kupferfolie	im Anlieferungszustand	N/cm mind.	10	14
	bei erhöhter Temperatur		s. Bild 2.201	
Lötbeständigkeit bei 260 °C ± 2 K				
Einwirkdauer		s	5	20
Forderung		–	keine Blasenbildung, Ablösung oder Unterlötung der Kupferfolie, keine Delaminierungen am Basismaterial	
Lötbarkeit bei 230 °C ± 5 K				
Einwirkdauer		s	2	2,5
Forderung		–	vollständige Verzinnung der freien Kupferflächen	
Wasseraufnahme bei 1,5 mm Tafeldicke		mg max.	80 (warm stanzbar)	
			65 (kalt stanzbar)	16
Klimatische Forderungen		–	40/070/04	55/085/21
			Prüfklasse nach TGL 9200/02	

Tabelle 2.107: Elektrische Kennwerte für starres Basismaterial

Kenngröße	Einheit	Kennwerte	
		Hartpapier	Glashartgewebe
Oberflächenwiderstand R_0	Ω mind.	10^6 (warm stanzbar) 10^9 (kalt stanzbar)	$5 \cdot 10^{10}$
Spezifischer Volumenwiderstand ϱ_V	Ω · cm mind.	10^{11}	10^{13}
Dielektrischer Verlustfaktor tan δ bei 20 °C, 1 MHz	max.	0,05	0,035
Dielektrizitätskonstante ε_r	max.	5,5	5,5

Tabelle 2.108: Qualität der kupferkaschierten Oberfläche

Art des Fehlers	Fehlergröße mm	Fehleranzahl Stück (max.)	Meßfläche m^2
Nadellöcher	⌀ ≦ 0,15	20	0,5
Einschlüsse und/oder ätzresistente Stellen	⌀ ≦ 0,10	12	0,01
	⌀ > 0,10···1,0	7	0,01
	⌀ > 1,0···3,0	2	0,5
Kratzer	Tiefe 5···10 µm	Gesamtlänge 500 mm	0,5
Eindrücke	Qualität W		
	⌀ ≦ 0,5	zulässig	
	⌀ > 0,5···1,0	35	
	⌀ > 1,0···2,0	5	0,5
	Qualität X		
	⌀ ≦ 0,2	zulässig	
	⌀ > 0,2···1,0	35	
	⌀ > 1,0···2,0	5	
Falten und Blasen sowie Verunreinigungen durch Öle, Fette, Wachse, Silikone		nicht zulässig	

Schwierigkeitsgrad der Schaltung entweder mit dem Siebdruck- oder dem Fotokopierverfahren. Eine weitere Methode zur Herstellung des Leiterbildes ist mit dem *Vakuum-Galvanischen Schrittverfahren* (VGS) sowie dem *Chemisch-Galvanischen Schrittverfahren* (CGS) gegeben. Beides sind *Additivverfahren*, bei denen auf nichtkupferkaschiertes Basismaterial (Glashartgewebe) eine dünne Kupferschicht (2···3 µm) im Vakuum aufgedampft bzw. chemisch aufgebracht wird. Nach Abdecken der nicht zum Leiterbild gehörenden Flächen mit einem Lack wird die vorhandene Kupferschicht galvanisch bis zur gewünschten Leiterzugdicke verstärkt. Anschließend werden der Abdecklack und das darunter befindliche Kupfer entfernt.
Es werden *Ein- und Mehrlagenleiterplatten* (bis 20 Leiterebenen) unterschieden (Bild 2.203). Mehrlagenleiterplatten

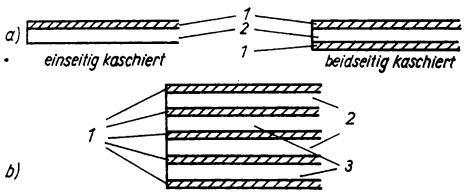


Bild 2.203. Aufbau von Einlagen- und Mehrlagenleiterplatten a) Einlagenleiterplatte, b) Mehrlagenleiterplatte; 1 Kupferfolie, 2 Isolierstoffträger, 3 Zwischenlage (Prepreg)

werden eingesetzt, wenn die Packungsdichte der Bauelemente und Anschlußflächen mit Einlagenleiterplatten nicht mehr beherrscht werden können. Mehrlagenleiterplatten bieten außerdem den Vorteil der Realisierung komplexer elektronischer Systeme, Freizügigkeit bei der Leiterführung, kurze Verbindungswege, Einbau von Abschirmungen und Wärmeleitflächen. Die elektrischen Verbindungen zwischen den Leiterebenen werden über durchkontaktierte Löcher hergestellt, die technologisch einfach mit der Additivtechnik gefertigt werden können. Mehrlagenleiterplatten werden vor allem in Rechenanlagen und in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt.
Gedruckte Schaltungen können außerdem vielfältige Kontaktaufgaben erfüllen, für die aber das verwendete Elektrolytkupfer wegen seiner chemischen Unbeständigkeit nicht geeignet ist. Dafür erhält das Leiterbild eine Oberflächenveredlung, z. B. aus Silber, Gold–Palladium–Gold, Rhodium, die meist galvanisch erfolgt. Veredlungen werden u. a. benötigt für Kammkonstruktionen direkter Steckverbinder, in die Leiterplatte einbezogene Dreh- und Schiebeschalter, Druckkontakte, Schleifringe.
Mit gedruckten Schaltungen lassen sich neben den genannten Funktionen neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen, z. B. durch direkte Einbeziehung von gedruckten Spulen, Kondensatoren, Filtern, Weichen, Wellenleitungen in das Leiterbild (Bilder 2.204 und 2.205 sowie Tabelle 2.109). Es können einfache, bifilare und doppelseitige Spulen beliebiger Form (rund, quadratisch, rechteckig, mäanderförmig) gefertigt werden. Bei Anwendung der Feinleitertechnik werden hohe Induktivitäts- und Kapazitätswerte erreicht.
Die bisher angewandte Herstellungstechnik für Leiterplatten gestattete die Anwendung eines Rasters von 2,5 mm. Dieses Raster bedingt Leiterplattenabmessungen, die nicht immer der Forderung nach Miniaturisierung der Geräte und damit der Entwicklung komplexer Schaltungen auf kleinstem Raum entsprechen. Mit Einführung der Feinleiter- bzw. Feinstleitertechnik können Leiterzugbreiten und -abstände in der Größenordnung von 0,1···0,2 mm gefertigt werden. Sie stellt an den Fertigungsprozeß größte Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Prüfung. Die Realisierung ist bei allen Leiterplattenarten möglich, größte Vorteile ergeben sich bei Mehrlagenleiterplatten. Die Fertigung erfolgt in Subtraktivtechnik, bei kleinsten Leiterzugbreiten und -abständen durch Anwendung der Additivtechnik.

Tabelle 2.109: Kapazität gedruckter Kondensatoren bei kammartiger Struktur (Basismaterial Phenolharzhartpapier 1,5 mm, Kupferfolie 35 µm)

Leiterzugbreite = Leiterabstand mm	spezifische Kapazität pF/cm²
0,2	6,3
0,3	4,7
0,4	3,6
0,5	2,8
0,7	1,9
1,0	1,3

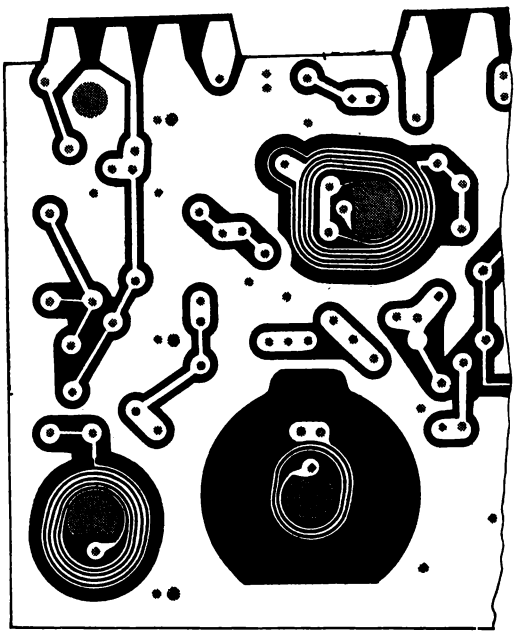


Bild 2.204. Unbestückte Leiterplatte mit gedruckten Induktivitäten (Ausschnitt, Blick auf die Lötseite)

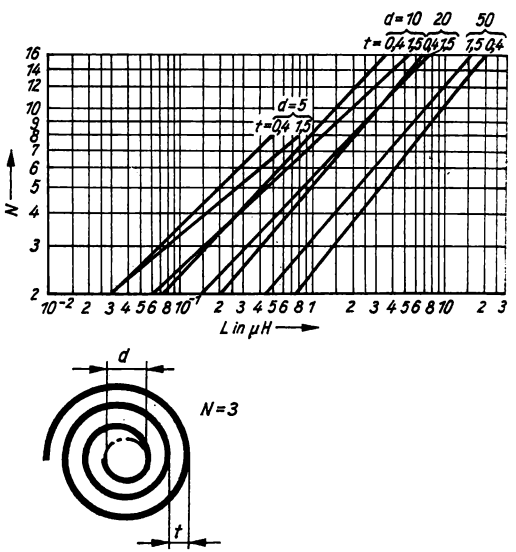


Bild 2.205. Bestimmung der Windungszahl einer geätzten Spule bei vorgegebener Induktivität

2.12.2. Konstruktion, Unterlagensatz

Konstruktion und Unterlagensatz für Ein- und Zweiebenenschaltungen nach TGL 25016, für Mehrebenenschaltungen nach TGL 25017, für flexible Leiterplatten nach TGL 28020.
Die Konstruktion einer in Anwendung und Fertigung optimalen gedruckten Schaltung erfordert viel Erfahrung und Kenntnis aller Detailprobleme. Da eine Vielzahl von Faktoren von der Auswahl des Basismaterials bis zum anzuwendenden Lötverfahren Einfluß hat, wird vor allem auf Standards und Dokumentationen der Hersteller verwiesen. Die folgenden *grundsätzlichen Forderungen* sind allgemein zu beachten:

- Auswahl des Basismaterials entsprechend den elektrischen und mechanischen Anforderungen (TGL 11651),
- Entscheidung über Art der Leiterplatte,
- Festlegung der Abmessungen (TGL 34636), dabei Rechteckform und gleiche Abmessungen aller Leiterplatten in einem Gerät anstreben, Durch- und Ausbrüche sowie Konturen vermeiden (Bild 2.206 und Tabellen 2.110 und 2.111),
- Auswahl der Bauteile (Bauelemente, Bausteine, Steckverbinder),
- Entwurf der Schaltung,

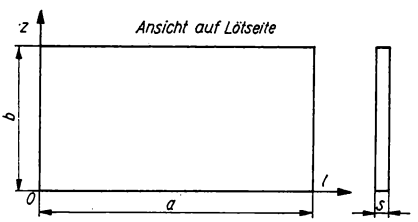


Bild 2.206. Lage des Koordinatenursprungspunktes
l Lötrichtung, *z* senkrecht zur Lötrichtung

Tabelle 2.110: Außenabmessungen für systemorientierte Einlagenleiterplatten

Größe $b \times a$ mm × mm	Leiterplattendicke s mm		
	1,0	1,5	
	nicht steckbar	steckbar	nicht steckbar
35 × 50	×	–	×
35 × 60	×	–	×
55 × 50	×	–	×
55 × 80	×	–	×
55 × 110	×	×	×
75 × 80	×	×	×
75 × 110	×	×	×
95 × 110	×	×	×
95 × 170	×	×[1])	×[1])
135 × 110	×	×	×
135 × 170	×	×[1])	×[1])
135 × 230	×	×	×
175 × 170	×	×	×
215 × 110	×	×	×
215 × 170	×	×[1])	×[1])
215 × 230	×	×	×
255 × 110	×	×	×
255 × 170	×	×	×
255 × 230	×	×	×
140 × 150	–	×	–
300 × 150	–	×	×
175 × 175	–	–	×
175 × 350	–	–	×
350 × 350	–	–	×

[1]) für Karteneinschübe, -einsätze nach TGL 25068/01···03 Einheitliches Gefäßsystem) nur diese Größe zugelassen

Tabelle 2.111: Außenabmessungen[1]) für nichtsystemorientierte Einlagenleiterplatten

b	a	b	a	b	a
10	10	80	80	140	140
	20		90		160
20	20		100		180
	30		120		200
	40		140		240
30	30		160		280
	40	90	90	160	160
	50		100		180
	60		120		200
40	40		140		240
	50		160		280
	60		180	180	180
	80	100	100		200
50	50		120		240
	60		140		280
	80		160	200	200
	90		180		240
	100		200		280
60	60	120	120		
	80		140		
	90		160		
	100		180		
	120		200		
			240		

[1]) Abmessungen stimmen mit GOST 10317-72 überein.

- Anfertigung des Unterlagensatzes für Leiterplatten wie Leiterbild und -zeichnung, Bearbeitungszeichnung und bei Bedarf für Beschriftungsaufdruck und -zeichnung, Lötmaskenaufdruck und -zeichnung, weiterhin für die gedruckte Schaltung Zusammenstellungszeichnung, Stückliste, Funktionsschaltplan oder Stromlaufplan, Belegungsplan, Prüfvorschrift, technisches Datenblatt, Einstellvorschrift;
  – bei der Anfertigung der Zeichnungen höchste Präzision einhalten, keine gedruckte Schaltung kann besser sein als ihre Zeichnungsvorlage!
- Entscheidung über Oberflächenveredlung, Schwierigkeitsgrad, Bestückungsloch- und Lötaugendurchmesser, Leiterbreite, Mindestabstände, Toleranzen,
- Beachtung der Einbauvorschriften für Bauelemente,
- Beachtung elektrischer Einflußgrößen, z. B. ohmscher Widerstand, Induktivität, Kapazität, Strombelastbarkeit der Leiterzüge (physikalischer Zusammenhang und Berechnung s. 1.9., Werte s. Bilder 2.205, 2.207 bis 2.209).

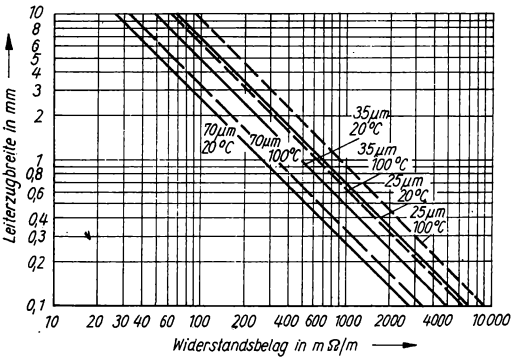


Bild 2.207. Ohmscher Widerstand geätzter Leiterzüge in Abhängigkeit von Kupferfolienstärke und Temperatur

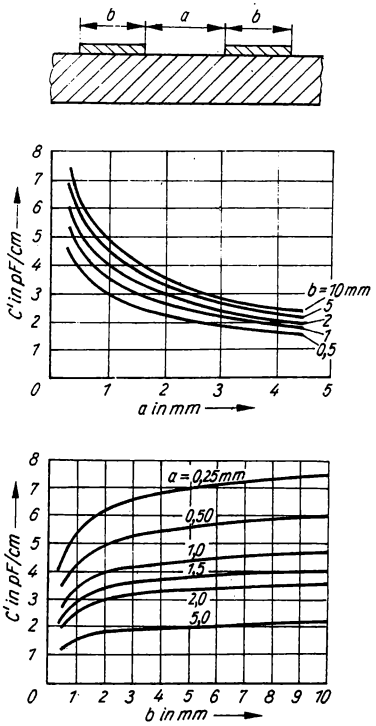


Bild 2.208. Kapazität zwischen zwei Leiterzügen bei Phenolharzhartpapier, 1,5 mm dick

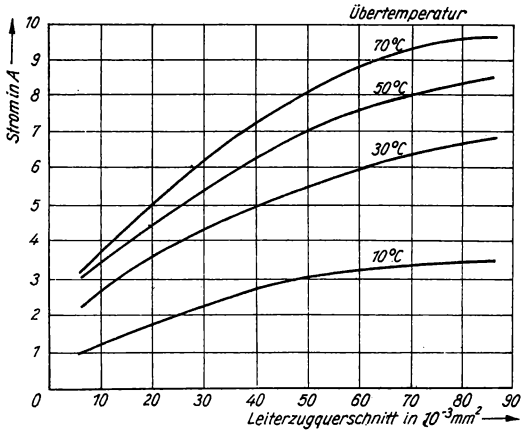


Bild 2.209. Strombelastbarkeit der Leiterzüge

2.12.3. Bestücken, Löten

Die geätzten Leiterplatten werden entweder nach dem Bauelementebelegungsplan oder einer Musterleiterplatte manuell, mechanisch oder automatisch (Stückzahlen > 500000/Jahr) bestückt und anschließend im Hand-, Tauch- oder Schwallötverfahren gelötet. *Handlötung* wird nur noch für Einzelleiterplatten, Kleinstserien, Reparaturlötungen und das Einlöten hochempfindlicher Bauelemente, z. B. Quarze für frequenzspezifizierte Baugruppen, angewandt.

Die *Tauchlötung* findet vorwiegend Anwendung bei Einlagenleiterplatten mit geringen Schwierigkeitsgraden. *Schwalllötung* — ein in einem Lötbad erzeugter Schwall berührt auf der gesamten Breite der Leiterplatte nacheinander alle Lötstellen und benetzt sie mit Lötzinn (LSn 60, LSn 63) — ist das am häufigsten angewandte Lötverfahren. Es ist für alle Leiterplattenarten einsetzbar und garantiert einen Lötfehler < 1%. Um funktionelle Beschädigungen der Leiterplatten wie Verbindungs- und Isolationsfehler, Abheben des Lötauges auf der Lötseite zu vermeiden, dürfen die Bauelemente nur dreimal ein- und zweimal ausgelötet werden. Dabei ist das erstmalige Einlöten nach dem Bestücken mit eingeschlossen. Ein- und Auslötbedingungen für Bauelemente auf Mehrlagenleiterplatten s. TGL 25017/02.

2.13. Einbauhinweise und Lötvorschriften für Bauteile der Elektronik

2.13.1. Allgemeines

Begriffe

Elektronische Bauteile sind die Gesamtheit der zur Herstellung bestimmter elektronischer Funktionen verwendeten Einzelteile mit vorbestimmter aktiver bzw. passiver oder bloßer Verbindungsfunktion (z. B. Kontaktteile, Widerstände, Leiterplatten, integrierte Festkörperschaltkreise).

Bauteilanschluß ist das konstruktive Element eines Bauteiles, das zur elektrischen und mechanischen Verbindung zwischen Bauteilkörper und Leiterplatte dient.

Lötbarkeit ist die Eigenschaft eines Bauteilanschlusses, unter gegebenen Bedingungen (Flußmittel, Temperatur, Zeit) über das Lot eine feste metallische Verbindung mit einem anderen Bauteilanschluß einzugehen.

Lötbarkeitsdauer ist der Zeitraum (vom Herstellungsdatum des Bauteiles an gerechnet), in dem die Lötbarkeit des Bauteilanschlusses bei Einhaltung vorgeschriebener Lagerbedingungen gewährleistet ist.

Lötbeständigkeit ist die maximal zulässige thermische Belastung, der ein Bauteil unterworfen werden kann, ohne bleibende Schäden bzw. Veränderungen der elektrischen, klimatischen und mechanischen Parameter zu erfahren.

Überzug ist eine auf dem Bauteilanschluß aufgebrachte metallische Schicht, die zur Gewährleistung der Lötbarkeit der Bauteilanschlüsse dient.

Einsatzbedingungen (nach TGL 32377/02)

Einsatzbedingungen für elektronische Bauteile sind nur bedingt ableitbar vom Einzelfall der Anlagen und Geräte, in denen sie eingesetzt werden, da Bauteile selten direkte Beziehungen zu den äußeren Einflüssen haben.
Bauteile, die an Front- bzw. Montageplatten befestigt sind und mittels Bedienteilen zur Bedienung einer Anlage oder eines Gerätes verwendet werden, unterscheidet man neben den elektrischen und mechanischen Funktionen nach den Befestigungsarten Zentral-, Zweiloch-, Dreiloch- und Vierlochbefestigung.
Die Lötbeständigkeit der Bauteile ist im Bild 2.210 angegeben. Die Bereiche umfassen den zulässigen Zeitraum des Einwirkens einer technologisch bedingten Temperatur auf die Anschlüsse elektronischer Bauteile in einer durch den Hersteller im Hauptkennwertestandard festgelegten Entfernung vom Bauteilkörper, bei dessen Einwirkung ein bleibender Schaden an der Funktionsfähigkeit weitgehend ausgeschlossen wird.
Die angegebenen Grenzen der Lötbeständigkeit bzw. der Lötbarkeit gelten, wenn im jeweiligen Hauptkennwertestandard keine erzeugnisspezifischen Grenzwerte angegeben werden. Die Arbeitsfelder entsprechen dem Durchschnitt der in der Praxis auftretenden Beanspruchungen im Lötprozeß. Die nicht schraffierten Felder geben den noch möglichen Arbeitsbereich an. Der angegebene Bereich berücksichtigt das Vorwärmen der Leiterplattenunterseite mit einer zulässigen Vorwärmtemperatur < 85 °C und einer zulässigen Vorwärmzeit von ≦ 3 min.

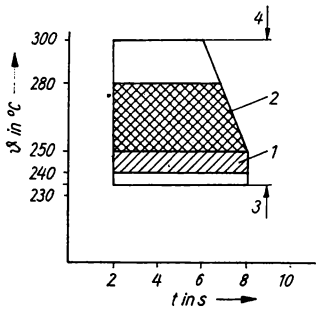


Bild 2.210. Temperatur-Zeit-Diagramm
1 Arbeitsfeld der Maschinenlötung, 2 Arbeitsfeld der manuellen Lötung, 3 Grenze der Lötbarkeit, 4 Grenze der Lötbeständigkeit

Einsatzklassen für elektronische Bauteile sind nach Einsatzgrenzwerten klassifiziert mit Ausnahme der Grenzwerte für das Verhalten bei Staub- und Spritzwasser, Luftverunreinigung, Schimmelpilzbewuchs und mechanischen Schwingungen und Stößen.
Werden diese Beanspruchungen für einen Anwendungsfall gefordert, so hat die zusätzliche Angabe nach TGL 9200/03 zu erfolgen.
Die den Einsatzklassen zugeordneten zulässigen Wertebereiche nach Tabelle 2.112 sind nach anwendungstechnischen und ökonomischen Gesichtspunkten festgelegt, innerhalb deren Grenzen elektronische Bauteile funktionssicher mit einem anwendungsbezogenen Langzeitverhalten betrieben werden können.

Tabelle 2.112: Einsatzklassen (EK)

EK	ϑ_{min} °C	ϑ_{max} °C	$\vartheta_{U\,max}$ °C	U_{max} %
1	+5	+40	+25	80
2	−10	+45	+30	80
3	−25	+45	+30	95
4	−40	+55	+30	95

Lötei genschaften der Anschlüsse (nach TGL 32377/02)

Die Anschlüsse müssen, wenn im jeweiligen Hauptkennwertestandard nichts anderes festgelegt ist, 18 Monate ab Herstellungsdatum, mindestens jedoch 9 Monate nach Auslieferungsdatum lötbar sein. Die Bauteile müssen in dieser Zeit entsprechend den für das Bauteil geltenden Lagerbedingungen gelagert werden. Schutzschichten zur Erhaltung der Lötbarkeit sind zulässig.
Die im jeweiligen Hauptkennwertestandard vorgegebenen Maße für die mit Lot zu benetzende Fläche (z. B. Mindestabstand vom Bauteilkörper) sind einzuhalten.
Die Anschlüsse müssen, wenn im jeweiligen Hauptkennwertestandard nicht anders festgelegt, bei einer Mindesttemperatur von 240 °C innerhalb 2,5 s lötbar sein.

Transport und Lagerung (nach TGL 32377/04)

Die Lager- und Transporträume müssen frei von aggressiven Medien sein, die qualitätsmindernde chemische Einwirkungen zur Folge haben. Die Bauteile sind vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen. Erfolgt im Hauptkennwertestandard keine Angabe der Transport- und Lagerungsklassen, so gelten folgende Bedingungen:
Umgebungstemperatur 15···35 °C, relative Luftfeuchte 35 bis 85%, höchste, damit koppelbare Umgebungstemperatur 25 °C, Druck max. 2 kPa (≙ 15 Torr) und Dauer der Beanspruchung 10 Tage.

Allgemeine Forderungen für Halbleiterdioden, Transistoren und Kondensatoren

Beim Einlöten ist für eine ausreichende Wärmeableitung (Kupferbacken) zu sorgen. Am zweckmäßigsten werden die Anschlußdrähte unmittelbar am Gehäuse mit einer Flachzange gefaßt. Schroffe Temperaturwechsel sind zu vermeiden. Um eine Zerstörung der Bauteile durch Fehlströme des Lötkolbens zu verhindern, ist der Lötkolben zu erden.
Die Anschlußdrähte müssen mit einem geeigneten Werkzeug unmittelbar am Gehäuse (z. B. Glaskörper) festgehalten werden, um das Bauteil vor Biege- und Zugbeanspruchung zu schützen.
Halbleiterdioden und Transistoren dürfen nicht in unmittelbarer Nähe von wärmeerzeugenden Bauelementen wie Röhren, Netztransformatoren, hochbelasteten Widerständen usw. eingebaut werden.

2.13.2. Halbleiterdioden

Tabelle 2.113 zeigt eine Übersicht über mechanische Einbaubedingungen sowie Löttemperaturen und Lötzeiten.
Die Anschlußdrähte bei *Halbleiterdioden in Allglasausführung* dürfen bis zu 6 mm vom Glasaustrittspunkt keiner Torsionsbeanspruchung ausgesetzt werden. Nicht zulässig ist eine permanente Zugbeanspruchung der Anschlußdrähte. Bei Tauchlötungen darf die Lötung nur auf der der Diode abgewandten Leiterplattenseite durchgeführt werden. Es sind dabei folgende Maße einzuhalten bzw. sinngemäß abzuwandeln: Abstand des Beginns einer Drahtbiegung von der Glasdurchführung $a \geqq 2$ mm, Abstand der Lötstelle von der Glasdurchführung bei Tauchlötungen ohne zusätzliche Wärmeableitung $b \geqq 5$ mm (gestreckte Drahtlänge). In den Bildern 2.211···2.214 wird die maximale Lötzeit t_L in Abhängigkeit von der Löttemperatur ϑ_L bei Tauchlötung für einige der gebräuchlichsten Einbaulagen von Halbleiterdioden angegeben.
Bei *plastverkappten Silizium-Planar-Dioden*, die bevorzugt in gedruckten Schaltungen eingebaut werden, darf eine Biegung der Anschlüsse nur zur Breitseite derselben mittels eines Spezialwerkzeuges erfolgen, wobei die Anschlüsse keiner Torsionsbeanspruchung ausgesetzt werden dürfen. Die Lötung ist nur auf der der Diode abgewandten Leiterplattenseite mit einem Mindestabstand Lötstelle—Gehäuseboden von 3 mm durchzuführen.

Halbleiter-Gleichrichterdioden sind auf Grund ihrer Empfindlichkeit gegenüber thermischen Überlastungen sowohl bei ihrer Verwendung in Schaltungen als auch bei ihrem Einbau besonders sorgfältig zu behandeln. Bei der Dimensionierung einer Schaltung kommt es darauf an, die Verlustleistung der Halbleiter-Gleichrichterdiode unter Beachtung der Umgebungs-

Tabelle 2.113: Übersicht über mechanische Einbaubedingungen sowie Löttemperaturen und Lötzeiten für Halbleiterdioden

Halbleiterdioden	Einbaubedingungen					Kolbenlötung		Tauchlötung	
	a mm	n	r mm	β °	ϑ °C	ϑ_{max} °C	t_{max} s	ϑ_{max} °C	t_{max} s
Allglasausführung	1,5	3	0,5	90	100	250	≦ 4	s. Bilder 2.211	
						350	≦ 2	bis 2.214	
Si-Planar-Diode	1,5	2	0,5	90		300	5	250	5
Gleichrichterdiode	3	2	1,5d	120	100	250	4	250	4
								350	2

Erläuterungen: a Mindestabstand einer Drahtbiegung von der Glas- bzw. Gehäusedurchführung, n zulässige Biegungen, r Biegeradius des Anschlußdrahts, β max. Biegewinkel, ϑ Temperatur an der Glasdurchführung, ϑ_{max} Löttemperatur, t Zeit, d Drahtdurchmesser.

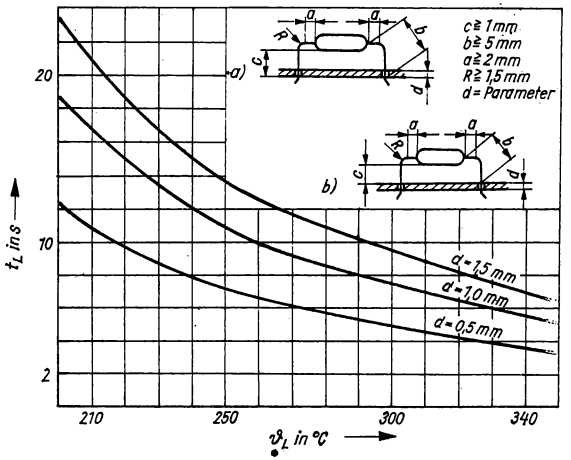


Bild 2.211. Diode parallel zur Leiterplatte bei einem Abstand von $c \geqq 1$ mm
a) Leiterplatte mit nichtmetallisierten Bohrungen,
b) Leiterplatte mit metallisierten Bohrungen

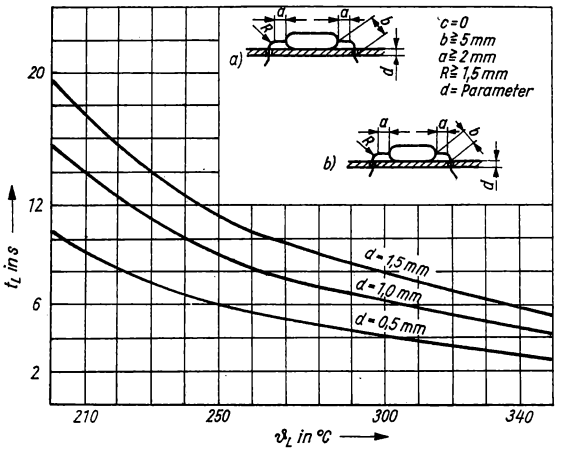


Bild 2.212. Diode parallel zur Leiterplatte bei einem Abstand $c = 0$ bzw. $c = d$
a) Leiterplatte mit nichtmetallisierten Bohrungen,
b) Leiterplatte mit metallisierten Bohrungen

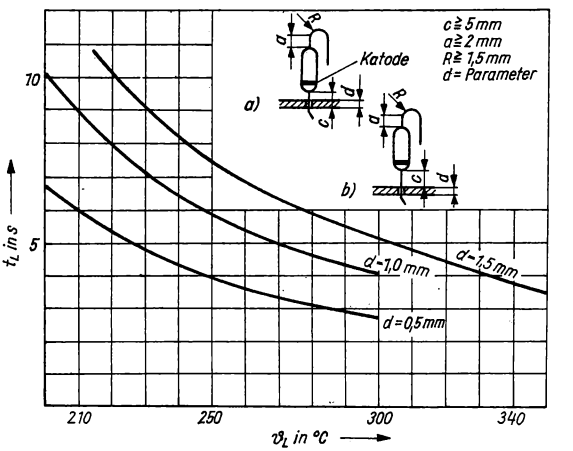


Bild 2.213. Diode senkrecht zur Leiterplatte, Katode unten
a) Leiterplatte mit nichtmetallisierten Bohrungen,
b) Leiterplatte mit metallisierten Bohrungen

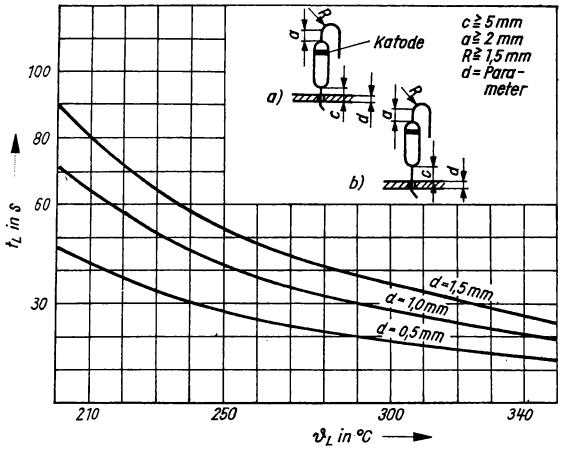


Bild 2.214. Diode senkrecht zur Leiterplatte, Katode oben
a) Leiterplatte mit nichtmetallisierten Bohrungen,
b) Leiterplatte mit metallisierten Bohrungen

temperaturen und der angegebenen Kühlungsbedingungen in den jeweils angegebenen Grenzen zu halten. Dadurch wird die maximale Sperrschichttemperatur nicht überschritten. Mechanische und äußere thermische Überbeanspruchungen können dazu führen, daß außer direkten mechanischen Unterbrechungen der zum Kristall führenden Zuleitungen auch die hermetisch abgeschlossenen Bauelemente undicht werden. Außer für Leistungsbauelemente werden für alle anderen Bauelemente Drahtlängen angegeben, die nur bei einwandfreier zusätzlicher Wärmeableitung bei Lötvorgängen noch weiter gekürzt werden dürfen, wobei lediglich bis zu diesen angegebenen minimalen Drahtlängen eine Verzinnung der Anschlußdrähte vom Hersteller gewährleistet wird.

2.13.3. Transistoren

Tabelle 2.114 zeigt eine Übersicht über mechanische Einbaubedingungen sowie Löttemperaturen und Lötzeiten für Transistoren.
Die Temperaturen und Zeiten gelten für Badlötung zur Bestückung von Leiterplatten mit nichtmetallisierten Bohrungen bzw. für Lötkolbenlötung.
Die Einbaulage der Transistoren mit den Bauformen A und B ist beliebig. Das Abbiegen der Anschlußdrähte ist nur über einen Dorn erlaubt. Zugbeanspruchung ist zu vermeiden.
Das Abwinkeln der Anschlußbänder bei der Bauform L ist nur über einen Dorn und über die Breitseite gestattet. Eine Zugbeanspruchung am Austritt der Anschlußbänder aus dem Gehäuse muß vermieden werden.

MOS-Transistoren werden mit kurzgeschlossenen Anschlüssen geliefert. Beim Umgang mit den Bauelementen ist darauf zu achten, daß sie nicht auf Tischen mit Kunststoff-, Glas- oder Holzauflage gelagert oder ausgeschüttet werden dürfen. Arbeitsplätze, an denen mit den genannten Bauelementen gearbeitet wird, müssen leitende geerdete Auflageflächen haben. Beim Transport und bei der Weiterverarbeitung müssen elektrostatische Aufladungen, die zur Zerstörung des Transistors führen, verhindert werden. Die Berührung der Bauelementeanschlüsse mit der Hand ist zu vermeiden. Sollte das unumgänglich sein, müssen die Personen, die die Bauelemente weiterverarbeiten, die Bauelemente selbst und die Verarbeitungseinrichtungen das gleiche Potential haben. Es sind deshalb besonders sich statisch aufladende Textilien (z. B. Dederonkittel) und Gegenstände aus hochisolierenden Materialien zu vermeiden. Beim Einlöten der MOS-Transistoren in die Schaltung sind die Anschlußbänder in jedem Fall kurzzuschließen.

2.13.4. Kondensatoren

Ist das Gehäuse bei *Funkentstörkondensatoren* nach TGL 200-8263 leitend mit einem Belag verbunden und für einen induktivitätsarmen, direkten Masseanschluß vorgesehen, so ist dafür Sorge zu tragen, daß die am Gerät aufliegende Montagefläche möglichst groß ist und eine dauerhafte Kontaktgabe ermöglicht. Durch Verwendung von Zahn- und Federscheiben ist das Lösen der die Kontaktgabe beeinflussenden Befestigungselemente (Schrauben, Gewindebolzen) zu erschweren.

Tabelle 2.114: Übersicht über mechanische Einbaubedingungen sowie Löttemperaturen und Lötzeiten für Transistoren

Transistoren	Einbaubedingungen					Max. Bad- bzw. Lötkolbentemperatur	Max. Lötzeit	Mindestabstand Lötstelle – Gehäuseboden
	a	*n*	*r*	*β*	*d*			
	mm		mm	°	mm	°C	s	mm
Bauformen A und B	1,5	1	0,4	120	< 0,5	250	4	1,5
						250	10	3,0
						400	4	5,0
Bauform L	1,5	1	0,4	90		250	3	1,5
						250	5	2,0
						250	10	5,0
Bauform D 2						250	4	7,0
						300	2	7,0

Erläuterungen s. Tabelle 2.113.

Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren nach TGL 200-8279 sind entsprechend ihrer Polaritätskennzeichnung zu betreiben. Lötzeiten über 3 s und Löttemperaturen über 300 °C sind unzulässig.
Bei *keramischen Kleinkondensatoren* nach TGL 31282/01 *mit Draht- oder Lötfahnenanschluß* dürfen die Lötzeit höchstens 5 s, die Löttemperatur bei Kondensatoren mit Drahtanschlußlängen ≦ 6 mm beim Löten 230 °C ± 10 K und bei allen anderen Kondensatoren 270 °C ± 10 K betragen. Bei den Kondensatoren *ohne Draht- oder Lötfahnenanschluß* sind die zum direkten Einlöten bestimmten Beläge, z. B. bei Scheibenkondensatoren ohne Drahtanschlüsse und Durchführungskondensatoren, mit Kadmiumzinn (17% Cd; Schmelzpunkt 142 °C) verzinnt. Beim Löten dieser Kondensatoren ist möglichst ein gleiches Lot zu verwenden und darauf zu achten, daß die Silberbeläge nicht beschädigt werden und die Lötkolbenspitze die lötbar verzinnten Beläge nicht direkt berührt. Die Lötzeit beträgt max. 5 s bei Kolbenlötung und 3 s bei Tauch- oder HF-Lötung. Die Löttemperatur darf 270 °C bei Kolbenlötung und 200 °C bei Tauchlötung nicht überschreiten.
Bei *metallisierten Polykarbonatfolie-Kondensatoren* für gedruckte Schaltungen sowie für freitragende Kondensatoren, deren Drahtanschlüsse bis auf einen Abstand von 6 mm vom Kondensatorkörper lötbar sein müssen, sind die in Tabelle 2.115 angegebenen Bedingungen einzuhalten.

Tabelle 2.115: Lötbarkeit von Polykarbonatfolie-Kondensatoren

Lötbarkeit	Gedruckte Schaltung	Freitragende Kondensatoren
Löttemperatur	230 °C ± 10 K	270 °C ± 10 K
Lötzeit	(2 ± 0,5) s	(2 ± 0,5) s

In Tabelle 2.116 sind Einbaubedingungen für einzelne Kondensatorarten angegeben.

Tabelle 2.116: Einbaubedingungen für Kondensatoren

Kondensatorart	*b* 1 mm	*b* 2 mm	*n*	τ_t Umdrehung
Papierkondensatoren	5	1,5	2	3
Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren	1,5		2	3
Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren				
nichthermetischer Verschluß			2	0,5
hermetischer Verschluß			2	2
Polykarbonatfolie-Kondensatoren	6	1,5	2	3
Lackkondensatoren	5		2	3

Erläuterungen: b 1 Mindestabstand der Lötstelle vom Kondensatorgehäuse, *b* 2 für gedruckte Schaltungen, *n* zulässige Biegungen, τ_t Torsionsfestigkeit der Drahtanschlüsse

2.13.5. Leiterplatten

Einlagenleiterplatte

Die Lötbeständigkeit muß bei 250 °C + 5 K bei Hartpapier = 5 s und bei Glashartgewebe ≧ 8 s sein, für Kolbenlötung bei 280 °C + 20 K ≧ 3 s. Nach der Prüfung auf Lötbeständigkeit darf die Platte keine Blasenbildung und kein Abheben der Leiterzüge erkennen lassen.
Der Lötprozeß muß bei maschineller Lötung bei Leiterplatten aus Hartpapier innerhalb von 2 s bei einer Löttemperatur von 240 °C ± 5 K und bei Leiterplatten aus Glashartgewebe innerhalb von 3 s bei einer Löttemperatur von 240 °C ± 5 K durchführbar sein, wobei die Leiterplatten mit metallisierten Bohrungen auf 60 °C vorzuwärmen sind.
Die Lötbarkeit muß während 9 Monaten bei Leiterplatten mit nichtmetallisierten Löchern und während 8 Monaten bei Leiterplatten mit metallisierten Löchern nach Auslieferung gewährleistet sein. Schutzschichten zur Erhaltung der Lötbarkeit dürfen diese nicht beeinträchtigen.

Mehrlagenleiterplatte (MLL)

Lötbeständigkeit: ≧ 8 s bei ≧ 250 °C. Nach der Prüfung auf Lötbeständigkeit darf die Platte keine Delaminierung erkennen lassen. Kolbenlötung als Erstlötung ist nicht zulässig. Galvanische Schichten auf dem Leiterbild dürfen die Zusammensetzung des Lötbades nicht so verändern, daß der Lötprozeß behindert wird.
Die Lötstelle muß allseitig glatt und geschlossen sein. Auf der Bestückungsseite B muß das Lot sichtbar sein bzw. einen Lötkegel bilden [Bild 2.215a)]. Auf der Lötseite muß sich ein Lötkegel ausbilden, der jedoch bis zur Leiterplattenoberfläche zurückweichen darf [Bild 2.215b)]. Geringfügige eingefallene Lötstellen sind zulässig, wenn auf der Bestückungsseite ein Lötkegel vorhanden ist [Bild 2.215c)].

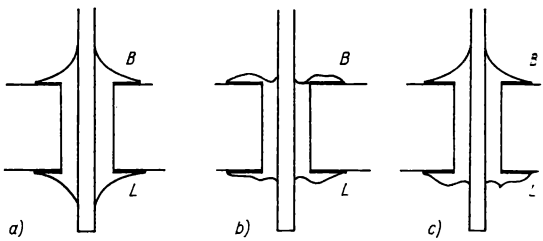


Bild 2.215. Lötstellen bei Mehrlagenleiterplatten
B Bestückungsseite, L Lötseite

Der Lötprozeß bei MLL ≦ 2 mm Nenndicke muß innerhalb 6 s bei einer Löttemperatur von 230 °C ± 5 K durchführbar sein.
Die Lötbarkeit muß während 6 Monaten nach Auslieferung gewährleistet sein. Schutzschichten zur Erhaltung der Lötbarkeit dürfen diese nicht beeinträchtigen.

2.14. Zuverlässigkeit

2.14.1. Allgemeines

Die Zuverlässigkeit ist ein Maß (die Wahrscheinlichkeit) für die Fähigkeit eines Systems oder Produkts (Gerät, Baugruppe oder Bauelement), seine Funktion ohne Überschreitung der Leistungsgrenzen bzw. Toleranzen für eine bestimmte Betriebsdauer unter bestimmten Einsatzbedingungen zu erfüllen. In Verbindung damit stehen die Begriffe Ausfall (Fehler), Ausfallrate, mittlerer Ausfallabstand.
Ein *Ausfall* ist ein Ereignis mit einem vollen oder teilweisen Verlust der Funktionsfähigkeit eines Systems oder Produkts (Unterbrechung, Kurzschluß, Toleranzüberschreitung). Unter der *Ausfallrate* versteht man den Anteil einer bestimmten Menge von Elementen (z. B. Bauelemente) des gleichen Typs, der in der Zeiteinheit ausfällt.
Der reziproke Wert der Ausfallrate wird *mittlerer Ausfallabstand* (mittlere Funktionszeit, Lebensdauer), häufig auch MTBF (engl. *M*ean *T*ime *B*etween *F*ailures) genannt und entspricht dem mittleren Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen.
Die einzelnen *Ausfallarten* können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten geordnet werden (Tabelle 2.117).

2.14.2. Bauelemente

Die Gesamtzuverlässigkeit komplexer elektrischer bzw. elektronischer Geräte und Anlagen wird letztlich durch die Zuverlässigkeit der verwendeten Bauelemente und ihrer Verbindung bestimmt.
Für den Zeitraum des technisch wichtigen Normalbetriebes (nach dem Ende der Frühausfälle und vor Beginn der Verschleißausfälle) ist die mit λ bezeichnete Ausfallrate näherungsweise konstant, und es gilt:

$$\lambda = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

λ Ausfallrate, n_1 Anzahl der betriebsfähigen Bauelemente am Anfang des Beobachtungszeitraumes t_1, n_2 Anzahl der betriebsfähigen Bauelemente am Ende des Beobachtungszeitraumes t_2

Tabelle 2.117: Überblick zu den Ausfallarten

Kriterium	Ausfallart	Kennzeichen
Ursache	Primärausfall	eigener Fehler eines Bauelementes
	Sekundärausfall	Folgeerscheinung des Ausfalls eines anderen Bauelementes
Ablauf (zeitlich)	Vollausfall	schlagartiges Ausfallen einer Funktion (Eigenschaft eines Bauelementes)
	Driftausfall	langsame Veränderung der Eigenschaften (Kenngrößen eines Bauelementes)
Zeitpunkt	Vorbetriebsausfall	Ausfall vor Inbetriebnahme (Fertigungsfehler)
	Betriebsausfall	Ausfall nach Inbetriebnahme (Regelfall)
	Frühausfall	Ausfall kurz nach Inbetriebnahme
	Normalausfall	statistische Verteilung der Ausfälle (zeitlich, örtlich), Bestimmung einer Ausfallrate mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung, wesentliches Kriterium für die Zuverlässigkeit
	Verschleißausfall	Ausfall nach Erreichen der mittleren Lebensdauer

Eine Übersicht von Ausfallraten einer Auswahl von Bauelementen ist in Tabelle 2.118 zusammengestellt.

Tabelle 2.118: Orientierungswerte für die Ausfallraten einiger Bauelemente

Bauelement	Ausfallrate $10^{-6}\ h^{-1}$	Bauelement	Ausfallrate $10^{-6}\ h^{-1}$
Widerstände		*Kontaktbauelemente*	
Kohleschicht-	0,5	Relais	0,5···10
Metallschicht-	0,1	Schalter	0,1···0,4
Draht-	0,1	Stecker	0,05···2
Dreh-	3		
Kondensatoren		*Lötstelle*	0,3
Papier-	1	*Wickelverbindung*	0,01
Plastikfolie-	0,1		
Keramik-	0,1	*Integrierte Schaltungen*	0,1···0,5
Elektrolyt-			
Alu-Folie	2		
Tantal-Folie	0,2		
Elektronenröhren	1···30		
Halbleiter			
Si-Dioden	0,01		
Ge-Dioden	0,8		
Si-Transistoren	0,02		
Ge-Transistoren	0,2		

Die Herstellerangaben über die Ausfallraten weichen stark voneinander ab und sind häufig noch nicht exakt ermittelt.

2.14.3. Baugruppen

Die Zuverlässigkeit von Baugruppen und deren Erhöhung ist eng mit der Entwicklung der Bauelementeintegration verbunden. Die erreichbare hohe Zuverlässigkeit ist einer der wesentlichen Gründe für die Entwicklung integrierter Schaltungen. Deren Zuverlässigkeit (große Lebensdauer, kleine Ausfallrate) resultiert aus der gleichzeitigen Realisierung der gesamten Schaltung und der Schaffung eines internen Verbindungssystems (Wegfall unzuverlässiger Montageprozesse und Lötverbindungen). Charakteristische Werte für die Fehlerrate bei den einzelnen Schaltungstechnologien sind:

klassische Technologie	0,35···0,1%/1000 h
integrierte Schaltungen in Dünnschichttechnik	0,05···0,01%/1000 h
integrierte Schaltungen in Festkörpertechnik	0,01···0,005%/1000 h

2.15. Elektrochemische Spannungsquellen

2.15.1. Allgemeines

Elektrochemische Spannungsquellen werden nach Primär- und Sekundärelementen (Akkumulatoren) unterschieden. *Primärelemente* unterscheiden sich von Sekundärelementen dadurch, daß sie nach der Lieferung *sofort gebrauchsfähig* sind (keine Ladung erforderlich) und daß sie nach der elektrochemischen Reaktion (Spannung bricht zusammen) nicht wieder geladen werden können. *Sekundärelemente* dienen zur *Speicherung* elektrischer Energie und sind, sofern aufgeladen, sofort nach Zuschaltung betriebsbereit. Weiterhin lassen sich Sekundärelemente (Akkumulatoren) nach ihren Anwendungsgebieten in *stationäre* und *transportable* Akkumulatoren unterscheiden. Transportable Akkumulatoren müssen besonders massearm sein.

Prinzipieller *Aufbau:* Sowohl bei Primär- als auch bei Sekundärelementen besteht eine Zelle aus positiven und negativen Elektroden, zwischen denen sich ein Elektrolyt befindet. Werden mehrere Zellen parallel geschaltet, kann ein höherer Strom entnommen werden. Werden dagegen mehrere Zellen in Reihe geschaltet, so erhöht sich die Spannung:

Gesamtspannung = Zellenspannung × Anzahl der Zellen.

2.15.2. Primärelemente

Primärelemente und -batterien sind in TGL 7487 festgelegt. Die Arten enthält Tabelle 2.119.

Tabelle 2.119: Arten der Primärelemente

Benennung	Kurzzeichen	Ausführung	Verwendung (Charakteristik)	Aufbau
Zelle	R 6	—	Transistorgeräte	Rundzelle LECLANCHÉ-Typ
	R 14	—		
	R 20	B	tragbare Leuchten	
	R 20	A	Transistorgeräte	
	R 20	C	Blitzlichtgeräte	
	S 4	—	Fernmeldeanlagen	Rechteckzelle LECLANCHÉ-Typ
	S 8	—		
Batterie	2 R 10	—	tragbare Leuchten	Batterie aus zwei in Serie geschalteten Rundzellen R 10
	3 R 12	B		
	3 R 12	A	Transistorgeräte	Batterie aus drei in Serie geschalteten Rundzellen R 12
	6 AS 6	—	Weidezaunbetrieb	Batterie aus sechs in Serie geschalteten Rechteckzellen S 6

Die Angabe der Verwendung basiert auf dem ursprünglichen oder hauptsächlichen Verwendungszweck, steht jedoch einem Einsatz für andere Zwecke nicht entgegen. Die *Nennspannung* einer Zelle beträgt 1,5 V. Bei Batterien beträgt sie 1,5 V mal Anzahl der Zellen. Die Abmessungen sind in TGL 7487 enthalten.

2.15.3. Sekundärelemente (Akkumulatoren)

Allgemeines

Den *Lade- und Entladevorgang* bei Akkumulatoren veranschaulicht Bild 2.216.

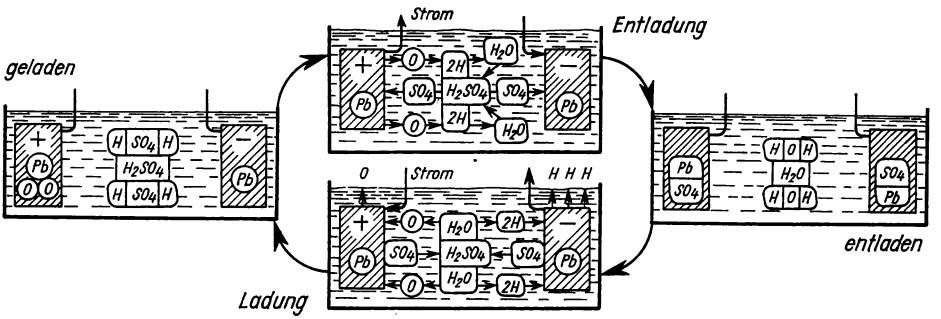


Bild 2.216. Elektrochemischer Prozeß im Akkumulator bei Ladung und Entladung

Bei der Aufladung wird elektrische Energie in chemische Energie umgesetzt, die sich bei der Entladung wieder in elektrische Energie verwandelt. Dieser Wechselprozeß spielt sich bei den Bleiakkumulatoren unter Mitwirkung der verdünnten, chemisch reinen Schwefelsäure zwischen den *braunen positiven* und *grauen negativen Platten* ab. Die Schwefelsäure dient als Elektrolyt gleichzeitig zur Stromleitung im Innern der Zelle.

Unterscheidung der Akkumulatoren

a) nach dem *Verwendungszweck:*

- ortsfeste Akkumulatoren,
- Fahrzeugakkumulatoren,
- tragbare Akkumulatoren;

b) nach dem *Aufbau:*

- Bleiakkumulatoren mit Schwefelsäure als Elektrolyt,
- alkalische Akkumulatoren mit Kalilauge als Elektrolyt.

Die *Klemmenspannung* schwankt bei Ladung und Entladung. Dabei unterscheidet man Entladungsschlußspannung, Ladeschlußspannung, mittlere Lade- (Entlade-) Spannung, Ruhespannung (nach Ausgleich des Elektrolyten an den offenen Polen).

Als *Nennspannung* wird gerechnet je Zelle

bei Bleiakkumulatoren 2 V, bei Stahlakkumulatoren 1,2 V.

Kapazität C in A · h (Entladestromstärke × Entladezeit) ist die abgebbare Ladungsmenge eines Akkumulators. Bei Angabe der Kapazität *C* muß jedesmal gesagt werden, für welche Entladestromstärke bzw. für welche Entladedauer sie sich versteht.

Wirkungsgrad: Verhältnis der A · h bei Ladung und bei Entladung (A · h-Wirkungsgrad) bzw. der W · h bei Ladung und bei Entladung (W · h-Wirkungsgrad). A · h-Wirkungsgrad 0,9 (konstant), W · h-Wirkungsgrad 0,75···0,7 (je nach Entladestromstärke).

Ladefaktor ist der umgekehrte Wert des Wirkungsgrades, also die Zahl, mit der die bei Entladung erhaltene Anzahl A · h (W · h) multipliziert werden muß, um die A · h (W · h) für die Ladung zu bestimmen.

Ruhespannung: Wert der Säuredichte +0,84 V, also bei einer vollgeladenen Zelle mit einer Säuredichte von 1,20 gleich 1,20 + 0,84 = 2,04 V je Zelle (Faustformel).

Ladung: Nennladestrom ≙ dem 3stündigen Entladestrom; wird zweckmäßig bei Eintritt der Gasentwicklung (2,4 V je Zelle) auf $^1/_3$ durchgehend oder fallend von $^1/_2$ auf $^1/_4$ bis zum Ladeschluß herabgesetzt. Beim Anstieg der Ladespannung auf 2,4 V/Zelle entweichen an der +-Platte Sauerstoff-, an der −-Platte Wasserstoffbläschen (*Explosionsgefahr*).

Ladeschlußspannung 2,75 V je Zelle.

Zellenzahl: Bei Bleiakkumulatorenanlagen ohne Regelung der Batteriespannung rechnet man i. allg. mit der Nennspannung 2 V, besonders bei Anlagen mit Spannungen unter 100 V:

12 V:	6 Zellen,	40 V:	20 Zellen,
24 V:	12 Zellen,	60 V:	30 Zellen.

In Licht- und Kraftanlagen, wo auf gleichbleibende Netzspannung gesehen wird, berechnet man die Zellenzahl nach der Entladeschlußspannung. Gebräuchlich sind für kleine und mittlere Anlagen unter Zugrundelegung einer Entladeschlußspannung von 1,83 V:

für 110 V: 60 Zellen, für 220 V: 120 Zellen.

Zur Regelung der Batteriespannung dient der *Zellenschalter.* Um bei Ladeschluß 110 V zu haben, sind 110 V:2,75 V/Zelle = 40 Zellen erforderlich; es sind also 60 − 40 = 20 Zellen abschaltbar einzurichten = $^1/_3$ der Batteriezellenzahl. Der Doppelzellenschalter hat deshalb 21 Kontakte, zwischen denen bei 110 V immer 1 Zelle, bei 220 V immer 2 Zellen liegen. Soll die Spannung nur bei der Entladung geregelt werden, so genügt ein Einfachzellenschalter. Hierbei rechnet man zu Beginn der Entladung zur Sicherheit mit 2,1 V Zellenspannung, für 110 V sind also 52 Zellen nötig, und es müssen 60 − 52 = 8 Zellen ≈ $^1/_8$ der Batteriezellenzahl abgeschaltet werden.

In Fernmeldeanlagen werden statt der Zellenschalter auch alkalische Gegenzellen verwendet, die eine Gegenspannung von 2···2,5 V haben.
Für Spannungsverlust im Netz sind entsprechend mehr Zellen aufzustellen.
Die Anschlüsse des Akkumulators zeigt Bild 2.217.

Anschlußvorschrift für Ladung: Verbinde den negativen Endpol der Elemente mit negativem Pol der Ladeleitung, die positiven

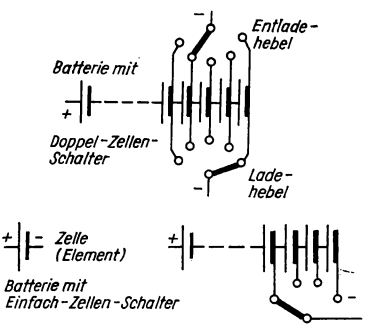


Bild 2.217. Zellenschalter zur Aufrechterhaltung konstanter Spannungsverhältnisse am Akkumulator

Pole miteinander! Prüfung durch angefeuchtetes Polreagenzpapier auf Holzunterlage (negativer Pol färbt rot). Die Spannungskurve des Akkumulators (Ladung und Entladung) zeigt Bild 2.218.

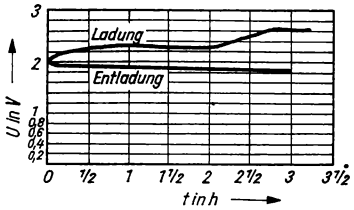


Bild 2.218. Spannungsverlauf an einer Akkuzelle bei Ladung und Entladung

Pufferbatterien: Stromaufnahme bei schwachem, Stromabgabe bei starkem Netzbedarf.
Die allgemeinen technischen Forderungen, Lieferungs-, Betriebs- und Wartungsvorschriften von Akkumulatoren sind in TGL 25331 festgelegt. Auf jeden Fall sind beim Arbeiten mit Akkumulatoren die einschlägigen Vorschriften des Herstellers zu beachten. Akkumulatoren sind geschützt, aber gut zugänglich aufzustellen. Sie sind vor zu hohen und zu niedrigen Temperaturen zu schützen, da sie sonst zu schnell innere Schäden erleiden. Bei ortsfesten Bleiakkumulatoren ist für ausreichende Belüftung zu sorgen (*Explosionsgefahr*). Akkumulatoren dürfen nur mit Gleichspannung geladen werden.
Beim Anschließen an die Ladevorrichtung ist darauf zu achten, daß immer nur gleichnamige Pole miteinander verbunden werden. Das Parallelschalten von Batterien ist zu vermeiden; ist es dennoch erforderlich, sollen nur Batterien gleicher Art, Bauart, gleichen Herstellungsdatums und gleicher Elektrolytdichte parallel geschaltet werden, da sonst die Gefahr der Sulfation besteht. Sie dürfen nicht unter Strom an- und abgeklemmt werden. Anschlußklemmen, Polschrauben und Zellenverbinder sind stets sauber und trocken zu halten und mit geeignetem Öl oder Fett (Polfett) vor Korrosion zu schützen. Der Elektrolytzustand ist in angemessenen, vom Hersteller vorgeschriebenen Zeitabständen zu kontrollieren. Zum Nachfüllen ist nur destilliertes Wasser zu verwenden.

Zellen für ortsfeste Bleiakkumulatoren

Bild 2.219 veranschaulicht den Aufbau von Zellen ortsfester Bleiakkumulatoren.

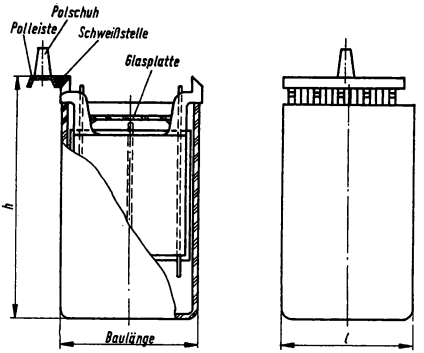


Bild 2.219. Schnitt und Ansicht einer Akkuzelle

Inbetriebsetzung:

Zellen mit Schwefelsäure der Dichte (1,20 ± 0,01) g/cm³, Bezugstemperatur 20 °C, mindestens 5 mm über Platten- bzw. Scheideroberkante füllen. Bei Temperaturabweichung ist Umrechnung der Dichte erforderlich. Nach 6···24 h Standzeit Elektrolytstand auf mindestens 5 mm über Platten- bzw. Scheideroberkante nachfüllen. Laden wie folgt:

10 h, danach 2 h Pause
14 h, danach 1 h Pause
3 h, danach 1 h Pause
2 h, danach 1 h Pause
1 h, danach 1 h Pause.

Tritt sofort nach Einschalten des Gleichrichters lebhafte, an allen Platten gleichmäßige Gasentwicklung auf, ist Laden beendet. Tritt das nicht ein, ist stündlich mit Pausen weiterzuladen, bis vorgenannter Zustand erreicht ist.

Tabelle 2.120: Elektrische Kennwerte der Zellen mit Platten OF 1 und OF 2

Zellentyp Kurzzeichen		Nenn-A · h-Kapazität K 10 mit zugehöriger Entladeschlußspannung I = 0,1		A · h-Kapazität mit zugehöriger Entladeschlußspannung 5-h-Entladen I = 0,172		3-h-Entladen I = 0,25		1-h-Entladen I = 0,53		$^1/_4$-h-Entladen I = 1,2	
		A · h	V	A · h	V	A · h	V	A · h	V	A · h	V
1 OF	36 A · h S	36		31		27		13		11	
2 OF	72 A · h S	72		62		54		38		22	
3 OF	108 A · h S	108		93		81		57		33	
4 OF	144 A · h S	144		124		108		76		44	
5 OF	180 A · h S	180		155		135		95	1,75	55	1,56
6 OF	216 A · h S	216		186		162		114		66	
4 OF	144 A · h S	144		124		108		76		44	
5 OF	180 A · h S	180		155		135		95		55	
6 OF	216 A · h M	216		186		162		114		66	
4 OF	288 A · h M	288		248		216		152		86	
5 OF	360 A · h M	360		310		270		190		108	
6 OF	432 A · h M	432		372		324		228		129	
7 OF	504 A · h M	504		433		378		266		151	
8 OF	576 A · h M	576	1,80	495	1,80	432	1,80	304		172	
9 OF	648 A · h M	648		557		486		342		194	
10 OF	720 A · h M	720		620		540		380		215	
11 OF	792 A · h ZW	792		680		594		418		236	
12 OF	864 A · h ZW	864		743		648		456	1,74	258	1,52
13 OF	936 A · h ZW	936		805		702		494		280	
14 OF	1008 A · h ZW	1008		867		756		532		301	
15 OF	1080 A · h ZW	1080		929		810		570		323	
16 OF	1152 A · h ZW	1152		991		864		608		344	
17 OF	1224 A · h ZW	1224		1053		918		646		366	
18 OF	1296 A · h ZW	1296		1115		972		684		387	
19 OF	1368 A · h ZW	1368		1176		1026		722		409	
20 OF	1440 A · h ZW	1440		1238		1080		760		430	

Achtung! Elektrolyttemperatur darf 50 °C nicht überschreiten, sonst Strom verringern.
Bezeichnung einer Eingefäßzelle mit 4 Großoberflächenplatten (OF) als positive Platten mit einer Nennamperestundenkapazität von 144 A · h und mit Seitenleiste (S):

Zelle 4 OF 144 A · h S TGL 4894

Kennbuchstabe M Zelle mit Mittelleiste
Kennbuchstaben ZW Zelle mit Zweigefäß-Mittelleiste

Tabelle 2.120 enthält Kennwerte.

Fahrzeug-Bleiakkumulatoren

Die Zellen der Fahrzeug-Bleiakkumulatoren haben als positive Platten *Gitterplatten* Gi, *Panzerplatten* Pz oder *Großoberflächenplatten* Gro. Daten dieser Platten sind in Tabelle 2.121 enthalten.

Tabelle 2.121: Daten von positiven Platten

Batterieart	Masse	Raumbedarf	Unterhaltungskosten	Lebensdauer Entladungen + Platten	Lebensdauer Entladungen − Platten	Norm Ladezeit h
Gi	gering	gering	höher	300···350	600···700	7½
Pz	mittel	mittel	mittel	1000	1000	9
Gro	hoch	hoch	gering	1000	2000	5

Anwendungsgebiete: Gi: Elektrofahrzeuge, Elektrokarren, Starter, Triebwagen. Pz, Gro: Verschiebelokomotiven, Wasserfahrzeuge, Notbeleuchtung, Notreserve, Elektrokarren mit kleinem Fahrbereich, Zugbeleuchtung.

Ladeschlußspannung: 2,75 V/Zelle.

Zellenzahl bei Aufladung aus 110-V-Netz:
110 V: 2,75 V/Zelle = 40 Zellen;
Zellenzahl bei Aufladung aus 220-V-Netz:
220 V: 2,75 V/Zelle = 80 Zellen.

Bleizellen (für gleislose Batterie-Fahrzeuge).

Kurzzeichen (Typ): Erste Zahl: Anzahl der positiven Platten. Gi Gitterplatten, Pz Panzerplatten, Gro Großoberflächenplatten; $C5$, $C3$, $C1$ Kapazität in A · h; $I5$, $I3$, $I1$ Entladestrom in A bei 5-, 3- und 1stündiger Entladung. $C5$ Nennkapazität bei +30 °C nach 80 Entladungen. Anfangskapazität = 65% der Nennkapazität.

Beispiel: 3 Gi 80 = Zelle mit 3 positiven Gitterplatten von Nennkapazität 80 A · h.
Abmessungen von positiven Platten (*a* Länge, *b* Breite, *c* Höhe in mm; *m* Masse, gefüllt, in kg; *C* Kapazität in A · h, *I* Stromstärke in A) sind in Tabelle 2.122 angegeben.

Tabelle 2.122: Abmessungen von positiven Platten

Typ	C_5	C_3	C_1 I_1	I_5	I_3	a	b	c	m
3 Gi	80	70	50	16	23	51	148	335	6
5 Gi	132	115	80	26	38	81	148	335	10
6 Gi	160	140	100	32	46	96	148	335	11,5
4 Gi	160	140	100	32	46	66	197	350	11,5
5 Gi	200	172	125	40	58	81	197	350	14
7 Gi	280	245	165	56	81	112	197	355	19,5
3 Gi	150	130	90	30	43	51	197	410	11
4 Gi	200	175	125	40	58	66	197	410	14
5 Gi	250	220	155	50	73	81	197	410	17
6 Gi	300	260	185	60	87	96	197	410	20
7 Gi	350	300	215	70	100	112	197	420	23,5
8 Gi	400	350	250	80	116	127	197	420	27
3 Pz	90	78	55	18	26	72	157	340	11,5
3 Pz	120	105	75	24	35	72	197	350	13
4 Pz	160	140	100	32	46	93	197	350	17
4 Pz	200	175	125	40	58	93	197	420	20,5
3 Gro	70	60	43	14	20	87	147	325	12
4 Gro	94	82	58	19	27	114	147	325	16

Bezeichnung eines mehrzelligen Akkumulators A mit 4 positiven Großoberflächenplatten (Gro) je Zelle, von Nennspannung 6 V und Nennkapazität 120 A · h:

Akkumulator A 4 Gro 6 V 120 TGL 8066.

Daten einiger Typen sind in Tabelle 2.123 enthalten.

Tabelle 2.123: Daten einiger Fahrzeug-Akkumulatoren

Ausführung	Typ	Nennspannung V	Nennkapazität C_5 A.h	Masse kg +5%
A mehrzellig	4 Gro 6 V 120	6	120	85,0
	6 Gro 4 V 180	4	180	
B einzellig	10 Gro 2 V 300	2	300	72,5
C mehrzellig	6 Pz 4 V 150	4	150	42,0
	11 Pz 4 V 300		300	71,0

Für *Zugbeleuchtung* werden Batterien aus mehreren in Reihe miteinander verbundenen Akkumulatoren nach Tabelle 2.124 zusammengestellt.

Tabelle 2.124: Daten von Batterien für Zugbeleuchtung

Nennspannung der Batterieanlage V	Anzahl der Akkumulatoren	Kurzzeichen der verwendeten Akkumulatoren	Verwendung
86	14	A 4 Gro 6 V 120	Schmalspurwagen
52*)	13	A 6 Gro 4 V 180	Kühlzüge (Export)
	26	B 10 Gro 2 V 300	Reisezugwagen (Export)
	12		Reisezugwagen
24	6	C 6 Pz 4 V 150	Bahnpostwagen (Notbatterie)
		C 11 Pz 4 V 300	Bahnpostwagen (Hauptbatterie) Reisezugwagen

*) Bei Batterieanlagen mit einer Nennspannung von 52 V, zusammengestellt aus Akkumulatoren B 10 Gro 2 V 300, sind die einzelnen Akkumulatoren mit Gruppen- und Seriennummer zu kennzeichnen.

Batterien für Kraftfahrzeuge (nach TGL 10241/01···04) (Blei-Batterien)
Daten von Kraftfahrzeug-Batterien sind in Tabelle 2.125 zusammengestellt. Darin bedeuten:

C_{20} Kapazität bei 20stündiger Entladung,

I_{20} Entladestrom bei 20stündiger Entladung.

Stahl- (Nickel-Kadmium- und Nickel-Eisen-) Akkumulatoren
(nach TGL 3355)

Stahl-Akkumulatoren unterscheiden sich von den Blei-Akkumulatoren durch ihre Baustoffe und den elektrochemischen Vorgang. Bezüglich der wirksamen Stoffe unterscheidet man *Nickel-Eisen-Akkumulatoren* und *Nickel-Kadmium-Akkumulatoren*. Bei beiden Arten bestehen die positiven Elektroden aus Nickel-Sauerstoff-Verbindungen. Die negativen Elektroden der Nickel-Eisen-Akkumulatoren haben als wirksame Stoffe Eisen-Sauerstoff-Verbindungen, die Nickel-Kadmium-Akkumulatoren Kadmium-Sauerstoff-Verbindungen oder ein Gemenge beider. Die Dichte von 1,2 kg/dm³ bei 20 °C und geladener Zelle der als Elektrolyt dienenden reinen Kalilauge KOH (auch mit Lithiumhydroxid-Zusatz) ändert sich bei Ladung und Entladung

Tabelle 2.125: Daten von Kraftjahrzeug-Batterien

Kurzzeichen	Nennspannung V	Kapazität C_{20} A · h	I_{20} A	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Masse kg
A für Krafträder (nicht zum Anlassen)							
6 V, 8 A · h	6	8	0,4	95	85	166	2,9
*) 6 V, 12 A · h	6	12	0,6	122	60	135	3,5
6 V, 16 A · h	6	16	0,8	131	85	166	4,2
B für Kraftwagen							
6 V, 56 A · h	6	56	2,8	171	177	195	12,7
6 V, 70 A · h	6	70	3,5	201	177	195	14,9
6 V, 84 A · h	6	84	4,2	250	177	195	17,0
6 V, 112 A · h	6	112	5,6	281	177	195	22,8
12 V, 56 A · h	12	56	2,8	311	182	195	25
12 V, 70 A · h	12	70	3,5	366	182	195	30
12 V, 84 A · h	12	84	4,2	422	182	195	34,5
12 V, 105 A · h	12	105	5,3	513	197	240	40,5
12 V, 135 A · h	12	135	6,7	513	232	240	57
12 V, 150 A · h	12	150	7,5	513	238	240	65
12 V, 180 A · h	12	180	9,0	523	295	250	75
12 V, 140 A · h	12	140	7,0	582	236	234	45

*) Langbau-Batterie.

nur unwesentlich, sie ist daher kein Maßstab für den Ladezustand. Bei der *Ladung* wird das Nickelhydroxid $Ni(OH)_2$ der positiven Elektrode in die höhere Oxydationsstufe $Ni(OH)_3$ übergeführt, während in den negativen Elektroden das Eisenhydroxid $Fe(OH)_2$ zu metallischem Eisen (Fe) bzw. das Kadmiumhydroxid, $Cd(OH)_2$, zu metallischem Kadmium (Cd) reduziert wird. Bei der *Entladung* ist der Vorgang umgekehrt.

Die Stoffe der positiven Platten sind eingebettet bei:
Röhrchenzellen in senkrecht nebeneinanderstehenden Röhrchen,
Faltbandzellen in senkrechten, gefalteten Bändern,
Taschenzellen in waagerecht übereinanderliegenden Taschen.
Nickel-Eisen-Zellen werden nur als Röhrchenzellen ausgeführt.
Die negativen Platten sind Taschenplatten.
Taschenzellen werden außer mit normalem mit kleinem und mit besonders kleinem Innenwiderstand gebaut. Der Zahlenwert im Kurzzeichen ist die Anzahl der A · h für 5stündige Entladung (C_5).
Stahlakkumulatoren sind nahezu stoßunempfindlich, sie erfordern jedoch etwa alle $1^1/_2 \cdots 2$ Jahre Laugenwechsel und haben großen Klemmspannungsunterschied zwischen geladenem und ungeladenem Zustand (ungünstige Kennlinie).

2.15.4. Akkumulatorenanlagen

Akkumulatorenanlagen sind nach TGL 200-0653 auszuführen. Dieser Standard regelt Beschaffenheit, Lage, Beleuchtung, Belüftung von Akkumulatorenräumen sowie die Aufstellung von Akkumulatoren und das Betreiben von Akkumulatorenanlagen für stationäre Anlagen.
Akkumulatorenräume sollten zu ebener Erde und ihre Fenster nicht auf der Sonnenseite liegen; sie müssen trocken, gut lüftbar, kühl, aber frostfrei sein.
Die Beleuchtung muß mindestens 250 lx betragen; Beleuchtungskörper müssen Überglocken besitzen und in Feuchtraumausführung installiert sein.
In Akkumulatorenräumen müssen Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Gruppen und mit der Schalttafel durch blanke oder isolierte elektrolytbeständige Leitungen oder Kabel hergestellt werden. Wanddurchführungen von Leitungen und Kabeln müssen einwandfrei abgedichtet werden.
Das Laden darf nicht unmittelbar aus Gleichstromnetzen erfolgen. Bei Gleichrichtergeräten muß die Gleichstromseite vom Wechselstromnetz galvanisch getrennt sein.

3. Automatisierungstechnik

3.1. Grundlagen

Aufgabe der Automatisierungstechnik: Ausführung der bewußten Tätigkeit des Menschen durch selbsttätige Einrichtungen. Dazu ist es notwendig, Signale zu speichern, zu messen, zu steuern, zu regeln und zu rechnen — Betriebsmeß-, Steuerungs-, Regelungs- und Rechentechnik.

Wirkungsweg: Weg, längs dessen in Steuerungen und Regelungen die bestimmenden Wirkungen übertragen werden.

Übertragungsglied: überträgt eine Eingangs- zu einer Ausgangsgröße.

Informationsparameter: Parameter des Signals, das die Informationen überträgt.

Strecke: Teil des Wirkungsweges, dem die aufgabenmäßig zu beeinflussenden Glieder einer Anlage angehören.

Glied: Abschnitt des Wirkungsweges einer Steuerung oder Regelung.

Beharrungszustand: Im Beharrungszustand eines Regelkreises sind alle Einschwingvorgänge abgeklungen; der Kreis befindet sich in Ruhe.

Steuerung

In Abhängigkeit von einem Eingangssignal (oder mehreren) wird mit Hilfe einer Steuereinrichtung das Stellglied (oder mehrere) nach einer vorgegebenen Gesetzmäßigkeit betätigt.

Prinzip der Steuerkette s. Bild 3.1.

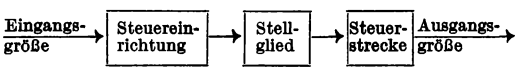


Bild 3.1. Prinzip einer Steuerkette

Der Einfluß von Störungen kann nur in begrenztem Maße berücksichtigt werden.

Arten der Steuerung s. Bild 3.2.

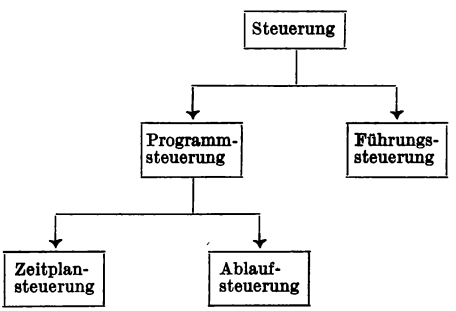


Bild 3.2. Arten der Steuerung

Zeitplansteuerung: Das Stellglied wird entsprechend einem programmierten Zeitplan betätigt (z. B. Straßenbeleuchtung).

Ablaufsteuerung: Die gesteuerte Größe ist nur von den Zuständen (Abläufen) bestimmter Größen und einem Programm abhängig (z. B. Anfahrvorrichtung der Straßenbahn).

Führungssteuerung (Folgesteuerung): Die gesteuerte Größe ist eindeutig von Führungsgrößen bestimmt (z. B. Dämmerungsschalter).

Regelung

Technischer Vorgang in einem abgegrenzten System, bei dem eine technische oder physikalische Größe — die zu regelnde Größe (*Regelgröße x*) — fortlaufend erfaßt und durch Vergleich ihres Signals mit dem Signal einer anderen Größe (*Führungsgröße w*) im Sinne einer Angleichung an deren Signal beeinflußt wird.

Prinzip des Regelkreises s. Bild 3.3.

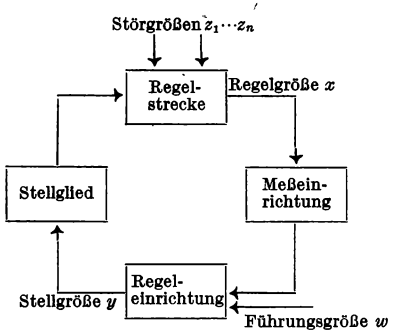


Bild 3.3. Prinzip einer Regelung

Arten der Regelung s. Bild 3.4.

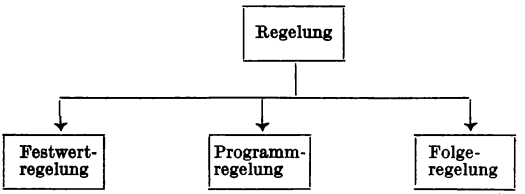


Bild 3.4. Arten der Regelung

Festwertregelung: Im Verlaufe der Regelung erfolgt keine Veränderung der Führungsgröße. Notwendige Veränderungen werden von Hand ausgeführt (z. B. Temperaturregelung).

Programm- (Zeitplan-) Regelung: Die Führungsgröße wird entsprechend einem programmierten Zeitplan automatisch verändert (z. B. Abkühlungsprozesse der Keramik/Optik).

Folgeregelung: Der Sollwert der Regelung folgt einem sich nach äußeren Bedingungen ändernden Wert einer Führungsgröße (z. B. Raumlichtautomatik bei Fernsehgeräten).

Signale

Signal: Zeitverlauf einer physikalischen Größe, wenn er das Abbild einer anderen Größe ist.

Einteilung der Signale s. Bild 3.5.

Analoges Signal: Der Informationsparameter I_p kann innerhalb gewisser Grenzen jeden beliebigen Wert annehmen.

Diskretes Signal: I_p kann nur endlich viele nicht zusammenhängende, voneinander getrennte Werte annehmen.

Kontinuierliches Signal: I_p kann sich in jedem beliebigen Zeitpunkt ändern.

Diskontinuierliches Signal: I_p kann sich nur in bestimmten Zeitintervallen ändern.

Stetiges Signal: Zeitlicher Verlauf von I_p ist eine stetige Funktion.

Unstetiges Signal: Zeitlicher Verlauf von I_p ist eine unstetige Funktion.

Digitales Signal: I_p besteht aus unterschiedlichen Größen von Signalwerten, von denen nur die Unterscheidbarkeit, nicht aber der Absolutwert wesentlich ist.

Mehrpunktsignale: I_p besteht aus mehreren diskreten, definierten Signalzuständen.

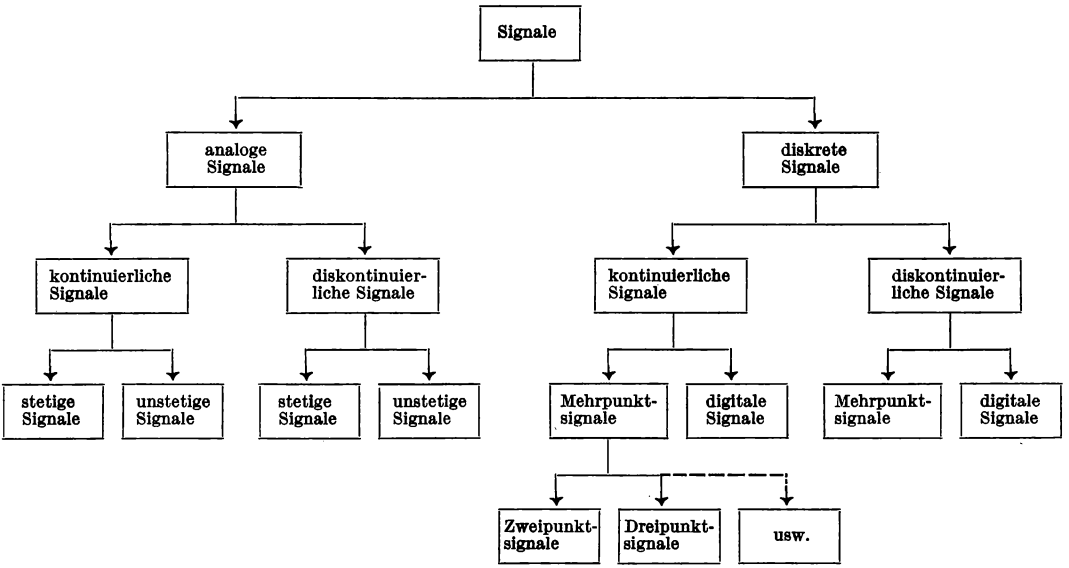


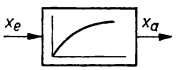
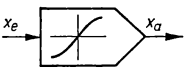
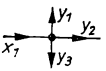
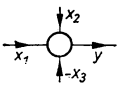
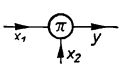
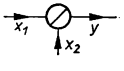
Bild 3.5. Einteilung der Signale

Signalflußplan

Der Signalflußplan ist eine symbolische Darstellung zum Verständnis der Wirkungsweise einer Steuerung oder Regelung durch Blöcke und Wirkungslinien.

Symbole in Signalflußplänen s. Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Symbole in Signalflußplänen (nach TGL 14091)

Symbol	Bedeutung	Mathematische Beziehung
	lineares Glied mit eingetragener Übergangsfunktion	
	nichtlineares Glied mit eingetragener statischer Kennlinie	
	Verzweigungsstelle für maximal 3 Signale	$x_1 = y_1 = y_2 = y_3$
	Mischstelle für maximal 3 Signale	$y = x_1 + x_2 - x_3$
	Multiplikationsstelle für maximal 3 Signale	$y = x_1 \cdot x_2$
	Divisionsstelle	$y = \frac{x_1}{x_2}$

3.2. Signalfluß der Steuerung, Regelung

3.2.1. Signalaufnahme

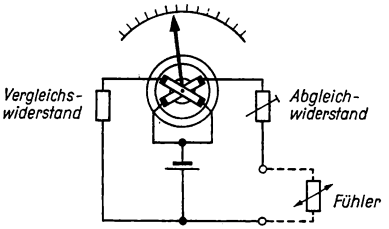


Bild 3.6. Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer und Kreuzspielinstrument

Tabelle 3.2: Temperaturmessung

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Thermoelement	
durch unterschiedliche Erwärmung der Verbindungsstellen zweier Metalle (geschweißt bzw. gelötet) Ausbildung einer Quellenspannung; analoges Ausgangssignal	Thermospannung bei ΔT = 500 K von 5 mV···30 mV; niederohmiger Ausgang; Beispiele s. Tabelle 4.5
Widerstandsthermometer	
Änderung des Widerstandes eines Leiters (meist Platin) mit der Temperatur; analoges Ausgangssignal (Bild 3.6)	für Platin: bei 0 °C R = 100 Ω $\Delta R \approx 0{,}4\ \Omega/K$ genormter Zuleitungswiderstand: 10 Ω kleinster Meßbereich 50 K (< 5 K schwer meßbar)

Tabelle 3.2 (Fortsetzung)

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Kontaktthermometer	
Ausdehnung des Quecksilbers mit der Temperatur; dabei wird ein eingebauter veränderbarer Kontakt geschlossen	kleiner Aufwand; Belastung bis zu 220 V~/30 mA; gute Langzeitkonstanz; geringe Schalthysterese (< 0,5 K); mechanisch empfindlich; voluminös
Kaltleiter	
sprunghafte Änderung des Widerstandes bei einer bestimmten Temperatur; binäres Signal	Änderung z. B. von 30 Ω auf 10 kΩ
Thermistoren	
keramische Halbleiterwiderstände mit großem Temperaturkoeffizienten	Innenwiderstand (Zimmertemperatur) 10 Ω···1 MΩ exponentielle Änderung; Änderung −5···2%/K
Dioden, Transistoren	
exponentielle Änderung des Sperrstromes mit der Temperatur (Bild 3.7)	Temperaturkoeffizient 6···10%/K; begrenzter Meßbereich; Fühler sind nicht austauschbar

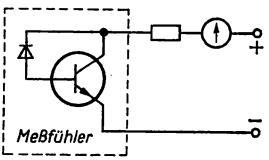


Bild 3.7. Temperaturfühler mit Halbleiterbauelementen

Tabelle 3.3: Binäre Längen-, Weg- und Winkelmessung

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Mikroschalter	
Auslösung eines Schaltvorganges bei Wegänderung	bei Wegänderungen > 1 mm; große Widerstandsänderung (Isolationswiderstand bis einige Milliohm) nicht kräftefrei
Lichtschranke	
unter Verwendung optoelektronischer Bauelemente wird bei Schwächung oder Unterbrechung des Lichtstrahls ein Schaltvorgang ausgelöst (Bild 3.8)	kräftefreie Messung; berührungslos, rückwirkungsfrei
Induktive Schwingschaltung	
Aussetzen der Schwingungen bei Annäherung eines metallischen Gegenstandes (Bild 3.9)	berührungslos, fast kräfte- und rückwirkungsfreie Messung

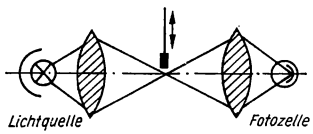


Bild 3.8. Lichtschranke zur binären Wegmessung

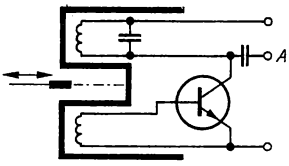


Bild 3.9. Induktive Schwingschaltung zur binären Wegmessung

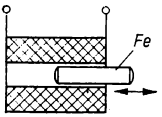


Bild 3.10. Induktiver Aufnehmer zur analogen Wegmessung

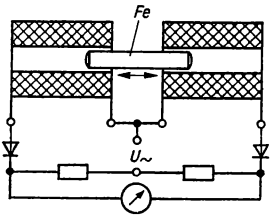


Bild 3.11. Wegmessung mit Differentialspule

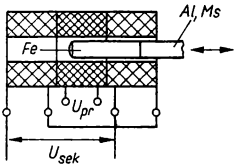


Bild 3.12. Wegmessung mit Differentialtransformator

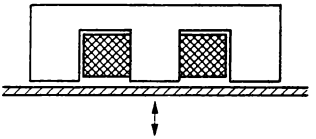


Bild 3.13. Messung von Dickentoleranzen mit Querankergeber

Tabelle 3.4: Analoge Längen-, Weg- und Winkelmessung

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Drahtpotentiometer	
Veränderung des Abgriffs durch Längs- oder Drehbewegung	Genauigkeit ±2%···±0,5% Messung nicht rückwirkungsfrei; durch Verschleiß Wartung notwendig
Induktivität	
Veränderung der Induktivität durch Lageänderung des Kerns (Bild 3.10)	stark nichtlineare Abhängigkeit; nicht kräftefrei
Differentialspule	
Änderung des induktiven Widerstands durch Lageänderung des Kerns (Bild 3.11)	lineare Abhängigkeit; sehr empfindlich; hohe Ausgangsleistungen möglich; geringer Aufwand
Differentialtransformator mit Queranker	
bei Änderung der Symmetrie im Transformator Änderung der Sekundärspannung und der Phasenlage (Bild 3.12)	Meßfehler ≪ 1%; große Ausgangsleistungen möglich; geringer Aufwand; nicht kräftefrei
Induktiver Querankergeber	
Änderung der Induktivität durch Veränderung des Luftspaltes (Bild 3.13)	Messung sehr kleiner Längsbewegungen bzw. Dicke nichtferromagnetischer Überzüge

Tabelle 3.4 (Fortsetzung)

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Kapazitiver Aufnehmer	
Veränderung der Kapazität durch Veränderung der geometrischen Abmessungen (Bild 3.14)	Grundkapazität 10···100 pF; Kapazitätsänderungen einige Prozente; vorzugsweise dynamische Messungen bei einigen zehntel bis hundertstel Millimeter Änderung
Lichtelektrischer Meßfühler	
Bewegung entsprechender Masken im Lichtstrahl führt an den durchsichtigen Stellen zur Abgabe von Impulsen, die gezählt werden (Bild 3.15)	Genauigkeit nur vom Raster der Masken abhängig; Fehler $< 10^{-4}$% möglich; Wegänderungen $< 1\ \mu m$ erfaßbar
Absorptionsmesser	
bei unterschiedlichen Dicken von Folien werden Strahlungen (Röntgenstrahlen, β-Strahlen, Ultraschall) unterschiedlich absorbiert	

Zur Wegmessung s. a. Tabelle 3.5.

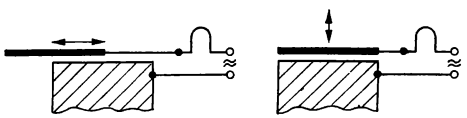


Bild 3.14. Kapazitiver Aufnehmer für kleine Wegänderungen a) Längsbewegung, b) Querbewegung

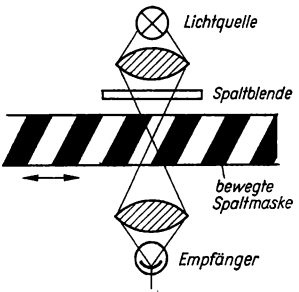


Bild 3.15. Lichtelektrischer Aufnehmer zur Wegmessung

Tabelle 3.5: Masse-, Kraft-, Dehnungsmessung

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Dehnungsmeßstreifen	
Änderung der geometrischen Abmessungen eines Drahtes (linear, mäanderförmig), verschiedene mit Widerstandsänderung (Bild 3.16)	Form a): Messungen von Dehnungen unter 1%; geringe Widerstandsänderungen Form b): Messung der Beanspruchung aus mehreren Richtungen; Änderung von 0,1‰ noch erfaßbar; nicht austauschbar (wird aufgeklebt), preisgünstig

Tabelle 3.5 (Fortsetzung)

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen	
Änderung des Halbleiterwiderstands durch Krafteinwirkung (Bild 3.17)	vorzugsweise Siliziumstäbchen; Empfindlichkeit 100fach größer als bei Folienmeßstreifen; sehr teuer; nur bei Serienmessung rentabel
Piezoelektrischer Geber	
bei Beanspruchung auf Druck oder Biegung werden vom Geber (z. B. Bariumtitanatscheibe) elektrische Spannungen abgegeben	vorzugsweise zur Schwingungsmessung; abgegebene Spannung einige zehntel Millivolt; hoher Innenwiderstand; Grenze der Schwingungsmessung $\approx$ 15 kHz
Magnetoelastische Geber	
durch Krafteinwirkung auf die massive oder geschichtete Eisenmasse von Drosseln oder Transformatoren („Preßduktoren") Veränderung der Permeabilität	Messung der Induktivitäts- oder Sekundärspannungsänderung

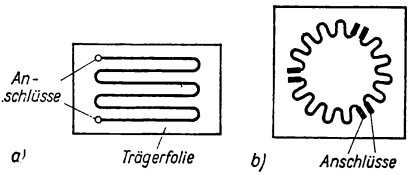


Bild 3.16. Dehnungsmeßstreifen
a) Einkoordinatenmessung, b) Zweikoordinatenmessung

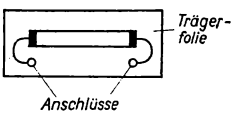


Bild 3.17. Dehnungsmeßstäbchen

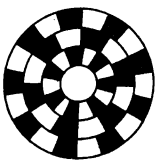


Bild 3.18. Stroboskopscheibe

Tabelle 3.6: Drehzahlmessung

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Tachometerdynamo	
mitlaufender Dynamo erzeugt in Abhängigkeit von der Drehzahl eine Spannung	Unsicherheit $\approx$ 2%; Belastung des Meßobjekts
Lichtblitzstroboskop	
Variation der Blitzfrequenz zur Beleuchtung des mit einer Rasterscheibe versehenen rotierenden Körpers (bzw. des Rasters) bis zum scheinbaren Stillstand der Scheibe (Bild 3.18)	bei scheinbarem Stillstand der Stroboskopscheibe ist die Drehzahl ein geradzahliges Vielfaches oder ein Bruchteil der Blitzfrequenz

Tabelle 3.6 (Fortsetzung)

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Induktiver Aufnehmer	
durch rotierende ferromagnetische Gegenstände Induktion einer Spannung (Bild 3.19a); bei nichtferromagnetischen Gegenständen Messung nach Bild 3.19b	
Lichtschranken	
(s. Tabelle 3.3)	langsame Bewegungen erfaßbar

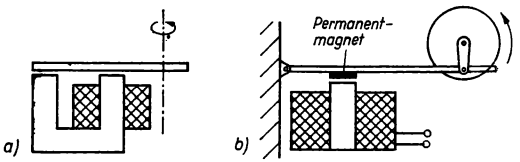


Bild 3.19. Induktiver Aufnehmer zur Drehzahlmessung
a) für ferromagnetische Gegenstände, b) für beliebige Materialien

Tabelle 3.7: Stückzählung

Meßfühler/Meßprinzip	Kennwerte, Eigenschaften
Mikroschalter	
Bei Berührung werden Schaltimpulse abgegeben	nur bei größeren Gegenständen sinnvoll; Rückwirkung vorhanden
Lichtschranken	s. Tabelle 3.3
Mikrofon	
Beim Auftreffen kleiner Gegenstände werden akustische Signale abgegeben, durch das Mikrofon in elektrische Impulse umgewandelt und gezählt	für kleine Gegenstände geeignet; Störung durch andere akustische Signale

3.2.2. Signalverarbeitung

Tabelle 3.8: Vergleich unstetiger Verstärker (Richtwerte)

Kenngröße	Polarisierte Relais	Relais	Schütze 6···400 A	Selbstschalter 100···1000 A
Steuerleistung in W	10^{-4}	10^{-3}···1	20···$4 \cdot 10^3$	500···$2 \cdot 10^3$
Ausgangsleistung in W	50	10···10^3	$4 \cdot 10^3$ bis $4 \cdot 10^5$	10^4···10^6
Leistungsverstärkung	bis $5 \cdot 10^5$	200···10^4	20···100	200···500
Zeitkonstante in s	0,002	0,02	0,015···0,045	0,2
Schalthäufigkeit in h	bis $7 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^3$	600···$2 \cdot 10^3$	1···10
Lebensdauer (Schaltspiele)	10^9	10^7	10^5···10^6	10^4

Vergleich stetiger Verstärker s. Tabelle 3.9.
Einteilung von Übertragungsgliedern s. Tabelle 3.10.

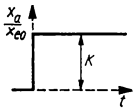
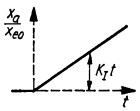
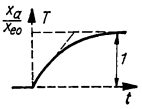
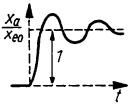
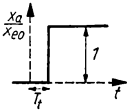
Tabelle 3.10: Übertragungsglieder

Bezeichnung	Kennzeichen
Analoge Glieder	zu analogen Eingangssignalen analoge Ausgangssignale
Diskrete Glieder	unabhängig vom Eingangssignal diskrete Ausgangssignale
Kontinuierliche Glieder	zu kontinuierlichen Eingangssignalen kontinuierliche Ausgangssignale
Diskontinuierliche Glieder	unabhängig vom Eingangssignal diskontinuierliche Ausgangssignale
Stetige Glieder	zu stetigen Eingangssignalen stetige Ausgangssignale
Unstetige Glieder	unabhängig von Eingangssignal unstetige Ausgangssignale
Lineare Glieder	Gültigkeit des Überlagerungsgesetzes; k-fache Eingangsänderungen ergeben f-fache Ausgangsänderungen
Nichtlineare Glieder	Überlagerungsgesetz gilt nicht
Mehrpunktglieder	unabhängig vom Eingangssignal Mehrpunktsignale am Ausgang
Digitale Glieder	unabhängig vom Eingangssignal digitale Ausgangssignale
Binäre Glieder	binäre Eingangssignale, binäre Ausgangssignale

Tabelle 3.9: Betriebsdaten und Eigenschaften von Verstärkern

Betriebsangaben	Elektronische Verstärker				Elektrische Verstärker	
	Hochvakuumröhren	Stromtore	Stromrichter	Transistoren	Transduktoren	Maschinenverstärker
Ausgangsleistung	1···10^5 W	60···$4 \cdot 10^4$ W	beliebig	10^{-2}···40 W	bis 50 kVA	beliebig
Leistungsverstärkung V	10^6···10^9	10^6···10^7	10^3···10^7	10^2···10^4	10^3···10^4	10^3···10^4
Zeitkonstante τ in s	10^{-2}···10^{-9}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}···10^{-7}	10^{-1}···1	10^{-1}···1
Quotient V/τ	10^8···10^{18}	10^9···10^{10}	10^5···10^{10}	10^4···10^{11}	10^4	10^4
Zweirichtungsbetrieb	nur mit größerem Aufwand möglich				möglich	möglich
Galvanisch getrennte Eingänge	nein	nein	nein	nein	ja	ja
Eingangswiderstand in Ω	10^5···10^7	10^4···10^6	10^3···10^5	10^2···10^5	10···10^4	10^{-1}···10^2
Fehler durch Hysterese	nein	nein	nein	nein	unmerklich	ja
Wartung	gering	gering	gering	gering	sehr gering	Bürsten, Lager
Betriebsbereitschaft	Anheizen	Anheizen	sofort	sofort	sofort	sofort
Lebensdauer	begrenzt	begrenzt	begrenzt	lange	unbegrenzt	lange
Überlastbarkeit	gering	gering	groß	keine	gering	gering
Erschütterungen	unzulässig	unzulässig	gering	unempfindlich	unempfindlich	begrenzt
Aufstellung	beliebig	bei Hg senkrecht	senkrecht	beliebig	beliebig	Grundrahmen
Masse	gering	gering	groß	sehr gering	beträchtlich	groß

Tabelle 3.11: Stetige lineare Grundglieder

Symbol	Übergangsfunktion grafisch	Differentialgleichung	Übertragungsfunktion	Begriffe, Kennwerte
P_0		$x_a = Kx_e$	$F(p) = K$	P_0 proportionales Glied ohne Verzögerung
I_0		$x_a = K_I \int x_e \, dt$	$F(p) = \frac{K_I}{p}$	I_0 integrales Glied
D_0		$x_a = K_D \dot{x}_e$	$F(p) = K_D p$	D_0 differenzierendes Glied ohne Verzögerung
T_1		$T\dot{x}_a + x_a = x_e$	$F(p) = \frac{1}{1 + Tp}$	T_1 Verzögerungsglied 1. Ordnung
T_{2S}		$T_2\ddot{x}_a + T_1\dot{x}_a + x_a = x_e$	$F(p) = \frac{1}{1 + T_1 p + (T_2 p)^2}$	T_{2S} Verzögerungsglied 2. Ordnung (schwingend)
T_t		$x_a(t) = x_e(t - T_t)$	$F(p) = e^{-T_t p}$	T_t Totzeitglied

K Übertragungsfaktor

Übergangsfunktion: Verlauf des Ausgangssignals x_a bei sprunghafter Änderung des Eingangssignals $x_e = x_{e0}$

Tabelle 3.12: Zusammenschalten stetiger Glieder

Kombination	Ersatzglied	Funktion
Reihenschaltung von P_0-Gliedern	P_0-Glied	$x_a = K_1 K_2 x_e$
Reihenschaltung von T_1-Gliedern	T_2-Glied	nach Abklingen der Verzögerung: $x_a = K_1 K_2 \, x_e$
Reihenschaltung von P_0- mit I_0-, D_0-Gliedern	I_0-, D_0-Glied	$x_a = K_I \int K_1 x_e \, dt$ bzw. $x_a = K_D K_1 \dot{x}_e$
Parallelschaltung stetiger Glieder	PD-, DI-, PI-, PID-Glied	s. Tabelle 3.13

Tabelle 3.13: Übergangsfunktionen bei Parallelschaltung stetiger Glieder

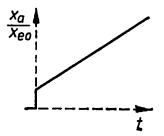
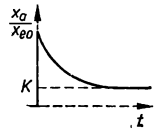
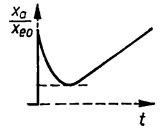
Symbol	Übergangsfunktion	Gleichung
PI		$x_a = K + K_I \int x_e \, dt$
PD		$x_a = K + K_D \dot{x}_e$
PID		$x_a = K + K_I \int x_e \, dt + K_D \dot{x}_e$

Tabelle 3.14: Kennwerte üblicher Strecken

Regelgröße	Art der Strecke	T_t	T_a
Temperatur	kleiner Laborofen	0,5···1 min	5···15 min
	großer Glühofen	1···3 min	10···20 min
	Destillationskolonne	1···7 min	40···60 min
	Dampfüberhitzer	bis 2 min	—
	Raumheizung	1···5 min	10···60 min
Durchfluß	Rohrleitung	0···5 s	0,2···10 s
Druck	Gasrohrleitung	0	0,1 s
	Trommelkessel mit Gas- und Ölfeuerung	—	150 s
	Trommelkessel mit Mühlenfeuerung	1···2 min	—
Drehzahl	kleiner elektrischer Antrieb	—	0,2···10 s
	großer elektrischer Antrieb	—	5···40 s
Elektrische Spannung	kleine Generatoren	0	1···5 s
	große Generatoren	0	5···10 s

Zur Definition der Zeiten s. Bild 3.27.

Tabelle 3.15: Vergleich verschiedener Bauglieder

	Bauglieder mit Kontakten	mit Halbleitern	mit pneumatischen Elementen
Vorteile	stark schwankende Betriebsspannung zulässig	höchste Schaltgeschwindigkeiten möglich	geringe Herstellungskosten
	galvanische Trennung zwischen Ein- und Ausgangskreis	hohe Ansprechempfindlichkeit	stark schwankende Betriebsspannung zulässig
	stark überlastbar	lageunabhängig, kein Verschleiß	Trennung von Ein- und Ausgangskreis
	zwei Stromrichtungen im Ein- und Ausgangskreis möglich	geringe Betriebsspannung, kleines Volumen, erschütterungsunempfindlich	stark überlastbar, lageunabhängig, explosionssicher
Nachteile	Prellen der Kontakte	Steuer- und Arbeitskreis galvanisch verbunden	Verschmutzungsgefahr
	Kontaktabnutzung, geringe Schaltgeschwindigkeiten	nur eine Stromrichtung im Ein- und Ausgangskreis	empfindlich gegen Ablagerung von Feuchtigkeit innerhalb der Glieder
	relativ große Ansprechleistung	endlicher Widerstand im ein- und ausgeschalteten Zustand	
	lageabhängig, erschütterungsempfindlich	keine hohen und tiefen Umgebungstemperaturen zulässig	
	Explosionsgefahr durch Kontaktfunken	überlastempfindlich	

Rückführung in Regelschaltungen

Prinzip der Rückführung s. Bild 3.20.

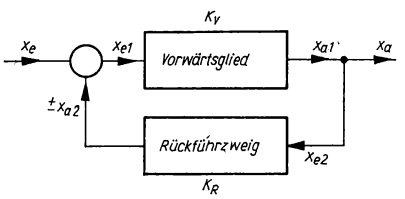


Bild 3.20. Prinzip der Rückführung

Dabei gilt: Gegenkopplung $x_{e1} = x_e - x_{a2}$

Mitkopplung $x_{e1} = x_e + x_{a2}$

Übergangsfunktionen bei verschiedenen Rückführgliedern s. Tabelle 3.16.

Prinzip der Mitkopplung s. Bild 3.21.

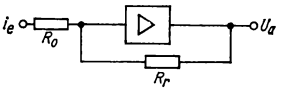


Bild 3.21. Prinzip der Mitkopplung

Tabelle 3.16: Übergangsfunktionen bei verschiedenen Rückführgliedern

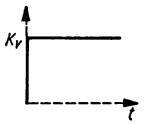
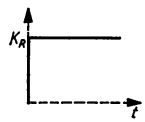
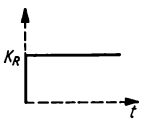
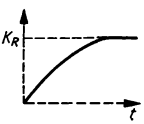
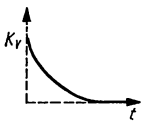
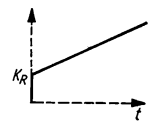
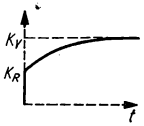
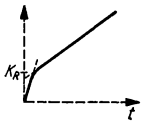
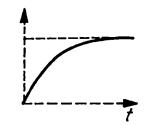
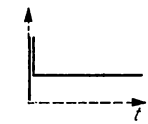
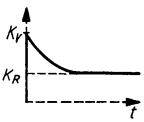
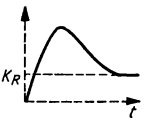
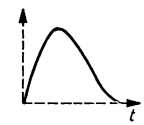
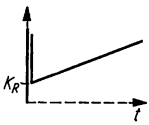
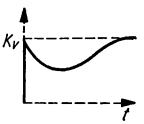
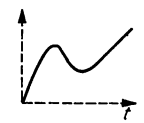
Rückführglied	Regeleinrichtung		
	P_0-Verstärker mit Verstärkungsfaktor	P_0-Verstärker mit endlicher Verstärkung	I_0-Verstärker
Starr			 
Nachgebend			 
Verzögernd			 
Verzögernd und nachgebend			 

Tabelle 3.17: Arten der Mitkopplung

Übertragungsfaktor	Bezeichnung	Kennzeichen
$K = \frac{\Delta u_a}{\Delta i_e}$ $R_r = \infty$	ohne Mitkopplung	stetiger Gleichstromverstärker
$K < R_r < \infty$	unterkritische Mitkopplung	Kennlinie $\frac{u_a}{i_e}$ steiler, Verstärkung wächst
$K = R_r$	kritische Mitkopplung	Verstärker im positiven oder negativen Sättigungszustand
$K > R_r$	überkritische Mitkopplung	Verstärker mit Kippcharakteristik

Statische Kennlinien der Mitkopplung s. Bild 3.22.

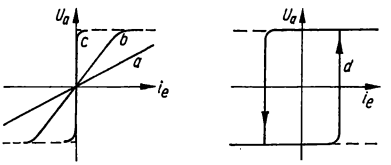


Bild 3.22. Statische Kennlinien der Mitkopplung nach Tabelle 3.17
a ohne, b unterkritische, c kritische, d überkritische Mitkopplung

Gegengekoppelte Verstärker werden eingesetzt, wenn Verstärkung, Ein- und Ausgangswiderstände, Frequenzgang und Stabilität den vorhandenen Meßproblemen angepaßt werden sollen. Arten der Gegenkopplung s. Bild 3.23, die Änderung der Betriebsparameter mit der Gegenkopplung s. Bild 3.24.

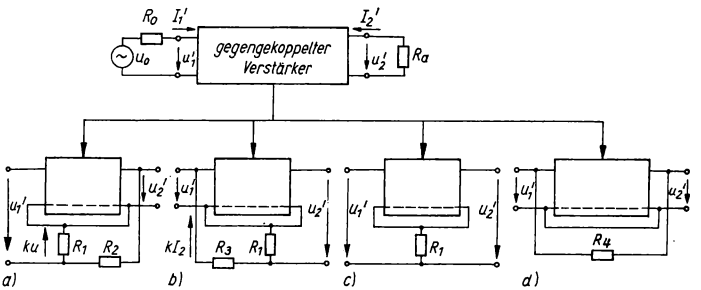


Bild 3.23. Gegenkopplung von Verstärkern
a) Serien-Parallel-Gegenkopplung, b) Parallel-Serien-Gegenkopplung, c) Serien-Serien-Gegenkopplung, d) Parallel-Parallel-Gegenkopplung

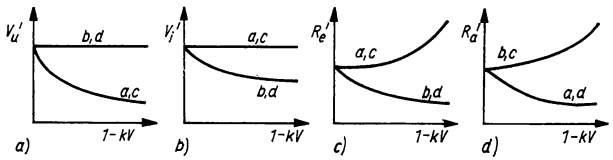


Bild 3.24. Änderungen von Verstärkerbetriebsgrößen mit der Gegenkopplung nach Bild 3.23
a) Spannungsverstärkung, b) Stromverstärkung, c) Eingangswiderstand, d) Ausgangswiderstand

Analogverstärker für bestimmte Anwendungsfälle s. a. 2.5.3. (analoge integrierte Schaltkreise).
Digitale Informationsverarbeitung s. 7.2.3.
Zum Rauschen von Verstärkern s. 6.1.2.2.

3.2.3. Signalausgabe

Tabelle 3.18: Unstetige Stelleinrichtungen mit Zweipunktverhalten

Elektrischer Ausgang	Mechanischer Ausgang	Hydraulischer, pneumatischer Ausgang
Schalter Schalttransistor Thyristor	Elektromagnet Magnetkupplung Magnetbremse	Magnetventil

Stetige Stelleinrichtungen verwenden meist Elektromotoren.

Tabelle 3.19: Elektromotoren als Stellmotoren

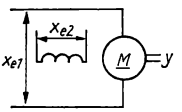
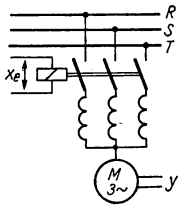
Motortyp	Schaltung	Drehzahlbeeinflussung
Gleichstrommotor		1. Änderung der Ankerspannung 2. Änderung der Erregerspannung
Kurzschlußläufer		1. Polumschaltung 2. Frequenzänderung 3. am häufigsten: Steuerung durch Schütz und Umkehrschütz

Tabelle 3.19 (Fortsetzung)

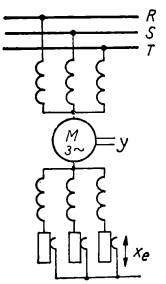
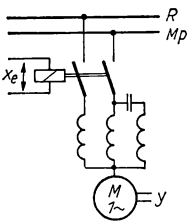
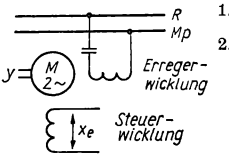
Motortyp	Schaltung	Drehzahlbeeinflussung
Schleifringläufer		Änderung des Schlupfes durch Widerstandsänderung im Läuferkreis
Einphasenkondensatormotor		s. Kurzschlußläufer
Ferrarismotor		1. Änderung der Steuerspannung (vorrangig) 2. Phasenverschiebung zwischen Erreger- und Steuerwicklung

Tabelle 3.20: Drehstromantriebe

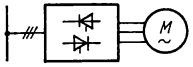
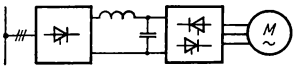
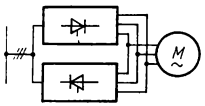
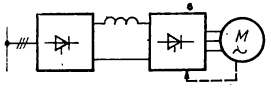
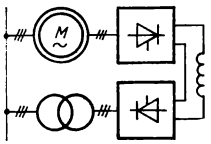
Stellglied	Stellgröße, bevorzugter Leistungsbereich	Bemerkungen
Drehstromsteller; amplitudengesteuerter Käfigläufermotor 	Ständerspannung; unterhalb 200 kW, da Stellung verlustbehaftet	vorzugsweise für Hebezeuge und Lüfter; Betrieb im 1. Quadranten; Umkehrbetrieb durch zusätzliche mechanische oder elektronische Schalter; Betrieb auch mit Schleifringläufermotor
Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis; fremdgesteuerter Synchron- oder Käfigläufermotor 	Ständerfrequenz, kombiniert mit -spannung (-strom); einige Kilowatt Einzelleistung bis zur Megawattgrenze	vorzugsweise für $n > 3000$; Gruppenantriebe, spezielle Einmotorenantriebe; Erweiterung auf Umkehrbetrieb möglich; Frequenz bis 400 Hz

Tabelle 3.20 (Fortsetzung)

Stellglied	Stellgröße, bevorzugter Leistungsbereich	Bemerkungen
Direkter Umrichter; fremdgesteuerter Synchron- oder Käfigläufermotor 	Ständerfrequenz, kombiniert mit -spannung; einige hundert Kilowatt bis zur Megawattgrenze	Anwendung für Sonderfälle; Erweiterung auf Umkehrbetrieb möglich; Frequenz bis 25 Hz
Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis 	Ständerspannung; Wechselrichtersteuerung; Drehwinkel abhängig von der Synchronmaschine; mittlere bis größte Leistungen	Maschinencharakteristik entspricht Gleichstrommaschine
Gleichrichter, Wechselrichter; untersynchrone Stromrichterkaskade 	Wechselrichterspannung; mittlere bis größte Leistungen	vorzugsweise für Pumpen und Lüfter

Melder: signalisieren Betriebszustände, übermitteln Informationen (Tabelle 3.21).

Tabelle 3.21: Melder

Optische Melder	Akustische Melder
Fallklappen Schauzeichen Signalleuchten	Summer Hupen, Tuten, Klingeln Wecker Sirenen

Tabelle 3.22: Signalfarben

Signalfarbe	Bedeutung	Beispiele
Rot[1])	unmittelbare Gefahr, Mittel zur Gefahrenbeseitigung	Schalter unter Spannung, gefährliche Störungen, Notausgänge
Grün	Gefahrlosigkeit, Sicherheit	Schalter ausgeschaltet, Gerät betriebsbereit, Anlauf, Inbetriebnahme
Weiß	Information über Schaltzustand	Spannung vorhanden, Gerät eingeschaltet, Maschine in Tätigkeit

[1]) Wirkung kann als Blinklicht verstärkt werden

3.3. Kenngrößen der Regelung

Regelabweichung x_B: bei eintretender Störung verbleibende Abweichung vom Sollwert (Bild 3.25)

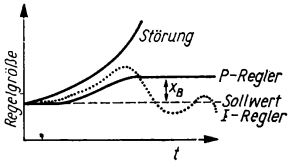


Bild 3.25. Zur Definition der Regelabweichung

Regelfaktor R: Verhältnis der Regelabweichung mit Regelung zur Abweichung ohne Regelung bei gleicher Störung

$$R = \frac{1}{1 + kvk_R}$$ (s. a. Bild 3.20)

kvk_R Schleifenverstärkung (Kreisverstärkung)

Regelgüte: Maß für den Verlauf der Regelung. In Abhängigkeit von den Anforderungen an die Regelung können als Kriterien Regelfläche, Überschwingweite, Einschwingzeit usw. gewählt werden (Bild 3.26).

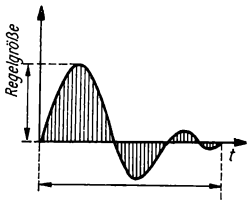


Bild 3.26. Kenngrößen der Regelgüte
Regelfläche schraffiert

Stabilität: Maß für die Neigung zu ungedämpften Schwingungen; abhängig von den verwendeten Strecken und Regeleinrichtungen sowie der Kreisverstärkung V_0.
Instabile Regelkreise (ungedämpfte Schwingungen) sind unwirksam und können zur Zerstörung von Geräten und Anlagen führen.
Zur Definition von Regelzeiten s. Bild 3.27.

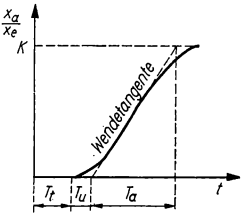


Bild 3.27. Zur Definition der Regelzeiten
T_t Totzeit; T_u Verzugszeit; T_a Ausgleichszeit

Optimierung von Regelkreisen

Forderungen:
- stabile Regelung
- Regelabweichung möglichst 0
- maximale Überschwingweite sehr klein
- Verzugs- und Ausgleichzeit sehr klein

Tabelle 3.23: Optimierung von Reglern

Regler	Regelstrecke mit Ausgleich	ohne Ausgleich
P	$k_R \approx \frac{\pi}{4} \frac{T_s}{(T_t + T_u)\,kv}$	$k_R \approx \frac{\pi}{4} \frac{1}{(T_t + T_u)\,kv}$
I	$k_R \approx \frac{1}{2kv(T_t + T_u)}$	instabil
PI	$k_R \approx \frac{\pi}{4} \frac{T_s}{(T_t + T_u)\,kv}$	$k_R \approx \frac{\pi}{4} \frac{1}{(T_t + T_u)\,kv}$
PID	$k_R \approx \frac{\pi}{4} \frac{T_s}{(T_t + T_u)\,kv}$	$k_R \approx \frac{\pi}{4} \frac{1}{(T_t + T_u)\,kv}$

Tabelle 3.24: Bestimmung der Stabilitätsgrenze

Regler/ Strecke	Stabilitätsgrenze		Kritische Schwingungsdauer T_k
P-Regler	$T_s \gg T_t$	$kvk_{Rk} \approx \frac{\pi}{2} \frac{T_s}{T_t} + 1$	$\approx 4\,T_t$
P_tT_t-Strecke	$T_s \ll T_t$		$\approx 2T_t$
P-Regler	$T_s \gg T_t$	$kvk_{Rk} \approx \frac{1}{T_t}$	$\approx 2\pi\sqrt{T_tT_s}$
I_tT_t-Strecke	$T_s \ll T_t$	$kvk_{Rk} \approx \frac{\pi}{2} \frac{1}{T_s + T_t}$	$\approx 4(T_s + T_t)$
I-Regler	$T_s \gg T_t$	$kvk_{Rk} \approx \frac{1}{T_t}$	$\approx 2\pi\sqrt{T_tT_s}$
P_tT_t-Strecke	$T_s \ll T_t$	$kvk_{Rk} \approx \frac{\pi}{2} \frac{1}{T_s + T_t}$	$\approx 4(T_s + T_t)$

Index k bei Einstellung des Reglers zwischen Stabilität und Instabilität

3.4. Automatisierungssysteme (URS)

Systeme zur Meßwertgewinnung, -erfassung, -verarbeitung und -auswertung sind im RGW im Rahmen des »Universellen internationalen Systems für die automatische Überwachung, Regelung und Steuerung« (URS) abgestimmt (TGL RGW 768). Eine Übersicht der vorhandenen Automatisierungssysteme zeigt Bild 3.28.

Informationsgewinnung		Informationsverarbeitung		Informationsnutzung	
ursakont		**ursatron (elektrisch)**		**ursawirk**	
ursapond	kraftkompensierende Meßeinrichtungen	ursalog	digitale Bausteine	ursamot	Wandlung in mechanische und elektrische Größen
ursatherm	elektrische Temperatur-meßeinrichtungen	ursadyn	analoge Bausteine	ursastell	unmittelbare Einwirkung auf Prozesse
ursabar	manometrische Druck-, Temperaturmessung	ursatrans	Fernmessung, Fernsteuerung		
ursaflux	Volumen-Durchfluß-meßeinrichtungen	ursadat	Meßwert-verarbeitung		
ursalot	Füllstands-meßeinrichtungen	ursamat	elektrisch-analoge Informations-verarbeitung		
ursalyt	Analysen-meßeinrichtungen	**ursastat (ohne Hilfsenergie)**		**ursapneu (pneumatisch)**	
ursaflop	Zählereinrichtungen				
ursazent	Weg-, Winkel-, Drehzahl-meßeinrichtungen	ursarel	Meßfühler mit Relaisausgang	ursabran	Einrichtungen zur pneumatisch-digitalen Steuerung
ursacord	sekundäre Anzeige-, Registrier-einrichtungen	ursadir	Regler ohne Hilfsenergie	ursabral	Einrichtungen zur pneumatisch-analogen Informationsverarbeitung

Bild 3.28. Universelles System zur Automatisierung (URS)

4. Elektrotechnische Geräte und Maschinen

4.1. Elektrische Meßgeräte

4.1.1. Allgemeines

Strom-, Spannungs- und Frequenzmessungen mit Meßinstrumenten nach Tabelle 4.1 lassen sich auf eine Kraft- oder Erwärmungsmessung zurückführen. Die Kraft oder Erwärmung wird vom elektrischen Strom erzeugt und gestattet somit Rückschlüsse auf die verursachende Größe. Im Falle der *Kraftmessung* wird die erzeugte Kraft mit der Kraft einer Spiralfeder, im Falle der *Erwärmungsmessung* mit der Dehnung eines Drahtes verglichen (Spiralfeder und Draht bilden die Rückstellkraft). Spannungsmessungen sind als Strommessungen bei bekanntem Widerstand ($U = IR$) möglich.

Die *Genauigkeit* eines Meßinstruments oder Meßgeräts wird durch Anzeigefehler und Einflußgrößen (Lage, Temperatur usw.) bestimmt. Die Genauigkeit wird durch Klassen angegeben (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.1: Sinnbilder für Meßwerke

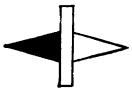
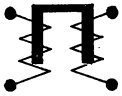
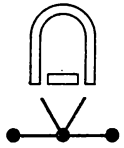
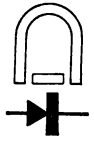
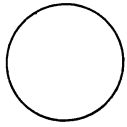
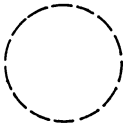
Nr.	Sinnbild, Zeichen	Benennung
1		Drehspulinstrument mit Dauermagnet, allgemein
		Drehspulinstrument mit Dauermagnet, Quotientenmesser
3		Eisennadelinstrument
		Drehmagnetinstrument
		Drehmagnet-Quotientenmesser
		Dreheiseninstrument
		Dreheisen-Quotientenmesser
		elektrodynamisches Instrument, eisenlos
9		elektrodynamisches Instrument, eisengeschlossen
10		elektrodynamischer Quotientenmesser, eisenlos
11		elektrodynamischer Quotientenmesser, eisengeschlossen
12		Induktionsinstrument
13		Induktions-Quotientenmesser
14		Hitzdrahtinstrument
15		Bimetallinstrument
16		elektrostatisches Instrument
17		Vibrationsinstrument
18		Thermoumformer, allgemein
19		isolierter Thermoumformer
20		Thermoumformer mit Drehspulinstrument
21		Gleichrichter
22		Drehspulinstrumen in Verbindung mit Gleichrichter
23		Instrument mit Eisenschirm (Sinnbild für den Schirm)
24		Instrument mit elektrostatischem Schirm (Sinnbild für den Schirm)

Tabelle 4.2: Klassen elektrischer Meßgeräte

Geräteart	Klassenzeichen	Fehler vom Meßbereichendwert in %
Feinmeßgerät	0,1	±0,1
	0,2	±0,2
	0,5	±0,5
Betriebsmeßgerät	1,0	±1,0
	1,5	±1,5
	2,5	±2,5
	5,0	±5,0

Da sich der Fehler (in %) auf den Endwert des Meßbereichs bezieht, ist der absolute Fehler am Anfang des Bereichs sehr groß. Daher Meßbereiche verwenden, die ein Messen im letzten Drittel erlauben!
Zu Beginn der Messung ist ein Beruhigen des Meßinstruments nötig. Diese Beruhigungszeit soll nicht größer als 4 s sein. Bild 4.1 gibt die möglichen *Einschwingvorgänge eines Meßgeräts* auf den Meßwert an. Als günstiges Einstellen darf der *aperiodische Fall* angesehen werden. Das wird durch geeignetes Bemessen der Dämpfungseinrichtung erreicht. Hierfür kommen Flügel-, Kolben- oder Wirbelstromdämpfung in Frage.
Elektromechanische Meßwerke sind hoch empfindlich zu lagern, da die wirkenden Kräfte sehr gering sind. Die Bilder 4.2 und 4.3 zeigen gebräuchliche Lagerformen. *Spitzenlagerung* ist für Präzisionsinstrumente geeignet; die beweglichen Organe des Meßinstruments sollen dabei massearm sein. Instrumente mit größeren beweglichen Massen, z. B. Schreiber, erhalten *Zapfenlagerung*.
Als Anzeigeeinrichtung konventioneller Meßgeräte werden *materielle Zeiger* oder *Lichtzeiger* verwendet. Die Zeigerform ist der Genauigkeitsklasse der Instrumente und der Instrumentenskale (Strichstärke) angepaßt. Materielle Zeiger führen bei nicht senkrechter Blickrichtung des Ablesenden zur Skale zu einem *Ablesefehler*, der *Parallaxe*. Bild 4.4 zeigt das Entstehen der Parallaxe. Zur Verminderung der Parallaxe erhalten Präzisionsinstrumente spiegelunterlegte Skalen. Decken sich der Zeiger und sein Spiegelbild, ist die Parallaxe nahe Null. Lichtzeiger vermeiden eine Parallaxe (*Präzisionsinstrumente*). Materielle Zeiger sind nicht geeignet, schnell veränderliche elektrische Größen anzuzeigen. Hierzu werden *Schleifen-* (bis etwa 1000 Hz) oder *Katodenstrahl-Oszillographen* (bis mehrere MHz) benutzt. Die *Gehäuseform* der Meßinstrumente wird durch ihre Anwendung bestimmt. Bild 4.5 zeigt Schalttafelinstrumente nach TGL 3004.
Skalen besitzen Aufschriften, die über Art des Meßwerks (vgl. Tabelle 4.1), Stromart, Gebrauchslage usw. Auskunft geben. Tabelle 4.3 zeigt solche Symbole.

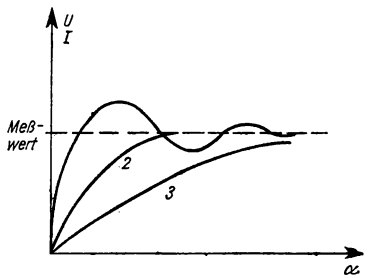


Bild 4.1. Mögliche Einschwingvorgänge des Zeigers eines Meßinstrumentes auf den Meßwert
1 periodisch, 2 aperiodischer Grenzfall, 3 überaperiodisch

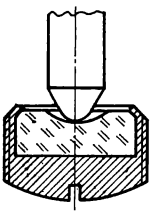


Bild 4.2. Spitzenlagerung eines Zeigers

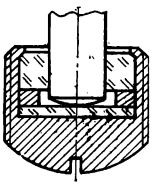


Bild 4.3. Zapfenlagerung eines Zeigers

Tabelle 4.3: Skalensymbole

Art	Symbol	Art	Symbol
Gleichstrom		senkrechte Gebrauchslage	
Wechselstrom		waagerechte Gebrauchslage	
Gleich- und Wechselstrom		schräge Gebrauchslage mit Angabe des Neigungswinkels	60°
Drehstrom-Instrument mit einem Meßwerk		Prüfspannungszeichen, Angabe der Prüfspannung in kV[1])	20
Drehstrom-Instrument mit zwei Meßwerken		Achtung (Gebrauchsanweisung beachten)	!
Drehstrom-Instrument mit drei Meßwerken		Klassenzeichen, Mittelschrift	0,2

[1])

Sternzeichen	Betriebsspannung U_b oder Stromkreis-Nennspannung	Prüfspannung U_p
ohne Ziffer	bis 40 V	500 V
mit Ziffer 2	über 40··· 650 V	2000 V
mit Ziffer 5	über 650··· 1500 V	5000 V
mit Ziffer 10	über 1500··· 3000 V	10000 V
mit Ziffer 20	über 3000··· 6000 V	20000 V
mit Ziffer 30	über 6000···10000 V	30000 V
mit Ziffer 50	über 10000···15000 V	50000 V
U_p in kV	über 15000 V	2,2 U_b +20000 V
mit Ziffer 2	Meßgeräte zum Anschluß an Stromwandler	2000 V

Beispiel für die Skalenaufschrift eines Leistungszeigers:



Senkrechte Lage; Betriebsmeßgerät Kl. 1,5; Drehstrom 50 Hz mit 2 Meßwerken; Prüfspannung 2000 V für Spannungswandler 6000/100 V und Stromwandler 10/5 A.

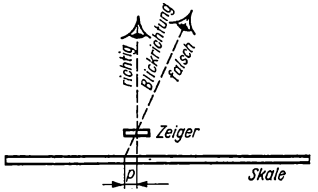


Bild 4.4.
Zur Entstehung der Parallaxe P

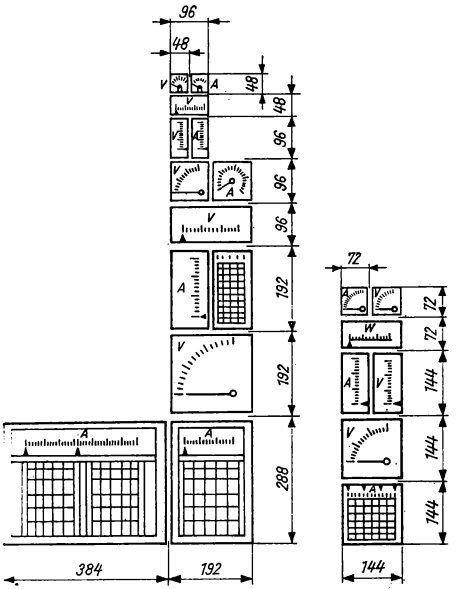


Bild 4.5. Gehäuse von Schalttafelinstrumenten (nach TGL 3004)

4.1.2. Wirkungsweise elektrischer Meßgeräte

4.1.2.1. Drehspul-Meßgerät

Die auf ein Aluminiumrähmchen gewickelte, drehbar gelagerte Spule Sp (Bild 4.6) ist mit einem Zeiger Z fest verbunden, Stromzuführung durch zwei Spiralfedern (nicht gezeichnet). Wird Spule Sp von Strom durchflossen, so dreht sie sich im Luftspalt L zwischen Dauermagnet M und feststehendem Weicheisenkern K. Die Stromzuführungsfedern erzeugen dabei eine Gegenkraft (Richtkraft). Der Zeigerausschlag ist verhältnisgleich der Stromstärke. Zeigerschwingungen, die bei plötzlichen Stromänderungen entstehen, werden durch Wirkung von Wirbelströmen gedämpft, die bei Drehung im Aluminiumrähmchen entstehen.
Bei neueren Drehspul-Meßgeräten ist der Kern K als Dauermagnet (Sonderlegierung) ausgeführt. Die magnetischen Feldlinien schließen sich über einem um die Drehspule gestülpten Zylinder aus Weicheisen. Vorteil: leichte, kleine Bauweise. Meßgenauigkeit bis Klasse 0,1.

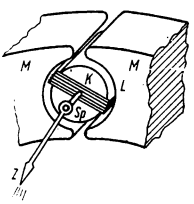


Bild 4.6. Drehspulmeßwerk

Anwendung nur bei Gleichstrom. Die Skale ist gleichmäßig unterteilt. Für Messung größerer Ströme wird parallel zur Drehspule ein Nebenwiderstand (Shunt) geschaltet, für Spannungsmessung ein Widerstand vorgeschaltet. Meßbereiche innerhalb 1 mA···1000 A und 45 mV···1500 V. Von Temperatur und Fremdfeld-Einfluß unabhängig.
Ausführung häufig als Präzisions-Instrument für genaue Messungen. Da der Zeigerausschlag bei Umkehr der Stromrichtung entgegengesetzt ist, kann man das Gerät auch als Stromrichtungszeiger verwenden (Nullage in Skalenmitte). Drehspul-Meßgeräte mit eingebauten Meßgleichrichtern dienen zu Wechselstrommessungen. Die Wechselstromskale ist ungleichmäßig geteilt.

4.1.2.2. Kreuzspul-Meßgerät

Aufbau des magnetischen Teils wie bei Drehspul-Meßgeräten. Länge des Luftspalts über Umfang ungleich. Zwei gekreuzte Drehspulen sind mit dem Zeiger fest verbunden. Praktisch ist keine Richtkraft vorhanden. An der Skale wird der Quotient der beiden Spulenströme (Strom- und Spannungspfad) angezeigt.
Anwendung: Widerstandsmessung, Fernmessung.

4.1.2.3. Dreheisen- (Weicheisen-) Meßgerät

In der Spule Sp (Bild 4.7) befinden sich ein festliegendes, trapezförmiges Weicheisenblech B_1 und ein drehbar gelagertes Weicheisenblech B_2, das mit dem Zeiger Z verbunden ist. Bei stromdurchflossener Spule Sp entstehen in B_1 und B_2 gleichnamige Magnetpole. Die Blechstücke stoßen einander ab. Als Gegenkraft (Richtkraft) wirkt eine stromlose (nicht gezeichnete) Spiralfeder. Zeigerschwingungen werden durch Luftdämpfung (Flügelkolben im Zylinder) verhindert.

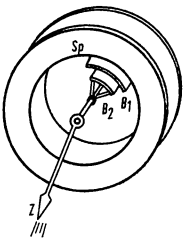


Bild 4.7. Dreheisenmeßwerk

Anwendung bei Gleich- oder Wechselstrom. Erweiterung des Meßbereichs bei Spannungsmessung durch Vorwiderstand. Verwendung eines Nebenwiderstands bei Strommessung führt zu Meßfehlern. Bei Wechselstrom Meßwandleranschluß. Etwa gleichmäßige Teilung beginnt i. allg. bei 20% des Skalenendwerts. Ausführung als billiges Betriebsmeßgerät.

4.1.2.4. Frequenzmesser

Vor den Polen eines Elektromagneten M (Bild 4.8) sind zwei Reihen von Stahlzungen Z angeordnet. Weiter rechts stehende Zungen haben eine etwas höhere Eigenschwingungszahl als die benachbarten linken Zungen. Werden die Windungen von M von Wechselstrom durchflossen, so kommt jene Stahlzunge in Schwingung, deren Eigenschwingungszahl der Frequenz des Wechselstroms entspricht. Das umgebogene freie Zungenende erscheint dadurch an der Skalenplatte S als kurzes Band.

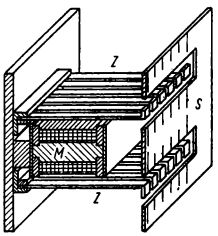


Bild 4.8. Frequenzmesser nach dem Resonanzprinzip

4.1.2.5. Thermoumformer-Meßgerät

Das Drehspul-Gerät DS erhält seinen Gleichstrom über einen Abgleichwiderstand R aus einem Thermoelement Th (Bild 4.9), das an seiner Lötstelle durch einen Heizdraht H erwärmt wird (Thermoumformer). Die Spannung (und damit der Strom im Gerätekreis) des Thermoelements steht in einem bestimmten Verhältnis zu der an seiner Lötstelle herrschenden Temperatur. Diese Temperatur ist von dem im Heizdraht fließenden Strom (und damit von der an den Heizdrahtenden herrschenden Spannung) abhängig. Meßgenauigkeit bis Klasse 0,5. Das Gerät ist frequenzunabhängig und in mäßigen Grenzen überlastbar. Der Thermoumformer kann auch als gesondertes Gerät ausgeführt werden.
Anwendung als Hochfrequenz-, Strom- oder Spannungsmesser.

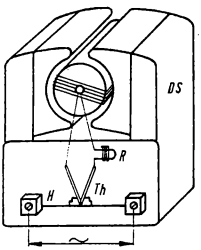


Bild 4.9. Thermoumformer mit Drehspulmeßwerk

4.1.2.6. Kompensatoren

Mit Kompensatoren ist es möglich, *leistungslos Spannungen zu messen*. Dadurch ist die hohe Genauigkeit von 10^{-4} zu erklären. Bild 4.10 zeigt das Prinzip eines Kompensators. Ein Teil einer Hilfsspannung U_H wird über einen Präzisionskurbelwiderstand mit der eines Normalelements verglichen. Sind beide Spannungen gleich groß, zeigt das Galvanometer keinen Strom an. Über das Verhältnis des Spannungsteilers ist die Spannung U_H oder jeder beliebige Teil davon genau bekannt. Wird nun statt der Normalspannung U_N eine unbekannte Spannung U_x einem Teil der Hilfsspannung entgegengeschaltet, daß wiederum kein Strom fließt (Nullindikator ist das Galvanometer), so sind diese Spannungen gleich. Es gibt Gleich- und Wechselstromkompensatoren. Mit Wechselstromkompensatoren sind Betrag und Phasenlage einer Wechselspannung bestimmbar.

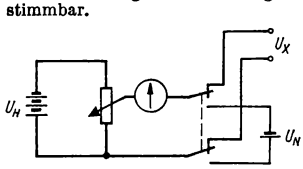


Bild 4.10. Prinzipschaltung eines Kompensators

4.1.2.7. Schreibende Meßgeräte

Linienschreiber: Der von der Spule Sp (Bild 4.11) des Meßgeräts bewegte Zeiger Z trägt einen Farbstift F, der die Zeigerstellungen auf einem Papierstreifen P laufend aufträgt. Die Rolle R, die den Papierstreifen an dem Farbstift vorbeibewegt, wird durch ein Uhrwerk (meist mit Selbstaufzug) angetrieben.
Punktschreiber: Die jeweilige Zeigerstellung wird durch einen Fallbügel etwa alle 20 s auf dem bewegten Papierstreifen punktförmig markiert.
Die Meßwerke können Amperemeter, Voltmeter oder Leistungsmesser sein.

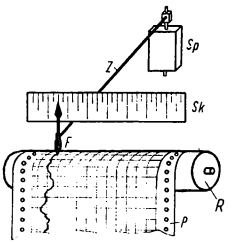


Bild 4.11. Prinzip eines schreibenden Meßwerkes

4.1.2.8. Gleichstromzähler

Motorzähler: Der Wattstundenzähler ist ein Wattmeter mit umlaufender Spannungsspule (Motoranker). Der Strompfad wird durch die Stromspulen St (Bild 4.12) gebildet. Der Spannungspfad besteht aus einem Motoranker Sp mit den Bürsten B, einem Vorwiderstand VW und einer Hilfsspule Hs, die die mechanischen Verluste des Motors ausgleicht und den Anlauf sichert. Die vom Motor geleistete mechanische Arbeit wird abgebremst durch Wirbelstrom in der zwischen den Polen des Dauermagneten DM umlaufenden Aluminiumscheibe As. Die Umlaufgeschwindigkeit des Ankers ist verhältnisgleich der dem Netz entnommenen Leistung. Die vom Zählwerk Z angezeigte Gesamtzahl der Umdrehungen in der Zeit t ist daher ein Maß für die in dieser Zeit aus dem Netz entnommene Arbeit.
Amperestundenzähler: An die Stelle der Stromspulen St tritt ein Dauermagnet. Der Spannungspfad fällt fort, und der Motoranker Sp wird als Strompfad ausgebildet.

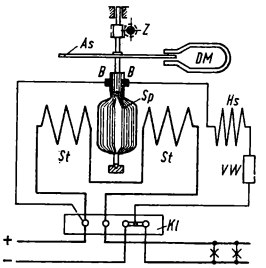


Bild 4.12. Prinzip eines Gleichstrommotorzählers

4.1.2.9. Wechselstromzähler

Die Wechselstrom-Motor-Zähler sind fast ganz durch die Induktionszähler verdrängt, die den Vorteil haben, daß Meßstrom und -spannung feststehenden Spulen auf Kernen aus lamellierten Blechen zugeführt werden, also nicht rotierenden Teilen. Durch die beiden Wechselfelder der gegeneinander versetzten Stromspule St (Bild 4.13) und Spannungsspule Sp entstehen in der Al-Scheibe As Wirbelströme, die ein Drehmoment verhältnisgleich $UI \cos\varphi$ erzeugen (Wirkleistung). Das Magnetfeld schließt sich außen über dem Rückschlußbügel Rs. Der Stromkern trägt noch eine Kurzschlußwicklung K, deren Induktivität durch die Schnalle S so abgeglichen wird, daß der Zähler bei dem Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0$ des Netzstroms stillsteht. Die Abbremsung (Gegenkraft) ist die gleiche wie bei den Motorzählern (Kl Klemmenbrett).

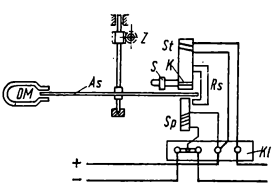


Bild 4.13. Prinzip eines Wechselstrominduktionszählers

Drehstromzähler. Sie stellen eine Kombination von 2 oder 3 Wechselstrom-Induktionszählern dar, die auf die gemeinsame Zählerwelle arbeiten und daher die Leistungen der 3 Phasen addieren. Durch Änderung des Anschlusses der Spannungsspulen lassen sie sich als Blindarbeits-Zähler schalten und messen dann $UI \cdot \sin\varphi$. Für Verrechnung der Grundgebühr ($^1/_4$-Std.-Maximum) erhalten die Wirkarbeits-Zähler einen Schleppzeiger, dessen Mitnehmer von der Zählerwelle über ein Rädervorgelege während jeder Viertelstunde auf einer Skale vorwärtsgeschoben, dann entkuppelt und auf Null zurückgestellt wird (Schaltuhr). Damit wird die mittlere entnommene Leistung erfaßt. Aus den Ablesungen des Wirk- und Blindarbeits-Zählers läßt sich der mittlere $\cos\varphi$ und hieraus die zu bezahlende kVA-Höchstbelastung berechnen:

$$\tan\varphi = \frac{\text{kvar}}{\text{kWh}}; \quad \text{hieraus} \quad \cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\varphi}};$$

$$\text{kVAh} = \frac{\text{kWh-Höchstlast}}{\cos\varphi}.$$

4.1.2.10. Katodenstrahl-Oszillograph

Die zu messende Größe wird auf einer Katodenstrahl-Röhre dargestellt. Messungen von *Gleich- und Wechselspannung (-strom)* durch Vergleich mit bekannter Größe oder mittels geeichten Oszillographen sind möglich. Beliebige zeitliche Spannungsverläufe können im Bereich von 10^{-6} V bis zu einigen Kilovolt dargestellt werden. Bei Wechselspannungsmessung mit Sinusform ist der 2fache Scheitelwert ablesbar; der Effektivwert ist daraus zu errechnen zu

$$\ddot{u} = \frac{U_{mm}}{2\sqrt{2}} = 0{,}354 U_{mm}.$$

Der zeitliche Verlauf beliebiger Größen, z. B. Lichtstrommessungen über Fotozelle, die in elektrische Größen umgewandelt werden können, ist darstellbar. Daneben können auch Zeitmessungen, z. B. Phasen- und Frequenzmessungen, mittels Vergleichs mit einer normalfrequenten Wechselspannung oder mit geeichter Zeitablenkung im Bereich von etwa 10^{-6} s bis zu einigen Sekunden durchgeführt werden.
Kleine Meßgrößen werden von Spezialverstärkern genügend verstärkt. Die Zeitablenkung wird von einem geeigneten Kippgerät erzeugt, dessen Kippfrequenz (Zeitauflösung) einstellbar ist. Wird statt der Zeitablenkung eine zweite elektrische Größe dargestellt, sind Kennlinien von z. B. Transistoren, Röhren, Durchlaßkurven von Filtern, Verstärkern aufzeichenbar.
Die universelle Anwendbarkeit dieser Oszillographenart hat diese vor allem in der Nachrichtentechnik zu dem Meßgerät werden lassen. Kleine handliche Oszillographen wurden für Servicezwecke (Rundfunk und Fernsehen u. a.), vielseitige große Universaloszillographen für Laborzwecke entwickelt.

4.1.2.11. Meßbereichserweiterung

Bei Meßbereichserweiterung mittels Widerstands ist dieser genau zu bemessen, damit die Klassengenauigkeit des verwendeten Meßinstruments nicht verändert wird. Unter Umständen ist der Temperaturgang des Widerstands zu berücksichtigen.

Strommesser

Wird parallel zum Meßwerk ein Widerstand R_p geschaltet, so tritt eine Stromverzweigung ein. Ist der Innenwiderstand des Meßinstruments bekannt, kann über die Knotenpunktregel die Größe des Parallelwiderstands (Shunt) ermittelt werden. Die Größe des *Shunts* errechnet sich zu

$$R_p = \frac{R_i}{V - 1}$$

V gewünschtes Vielfaches des zu erweiternden Meßbereichs

Beispiel: Ein Amperemeter mit 2 A Skalenendwert und einem Innenwiderstand von 0,5 Ω soll so geshuntet werden, daß ein Meßbereich von 12 A entsteht. Wie groß muß der Parallelwiderstand R_p sein?

$$R_p = \frac{0{,}5\ \Omega}{(12\ \text{A}/2\ \text{A}) - 1} = 0{,}1\ \Omega.$$

Spannungsmesser

Wird ein Widerstand R_v in Reihe zu einem Meßinstrument geschaltet, tritt eine Spannungsteilung entsprechend dem Widerstandsverhältnis R_v/R_i (R_i Innenwiderstand des Meßinstruments) ein. Bei einem gewünschten Vielfachen des Meßbereichs ergibt sich der Vorwiderstand zu

$$R_v = (V - 1)\, R_i.$$

Es ist zu beachten, daß der Vorwiderstand für die erweiterte Spannung zu isolieren ist.

Beispiel: Ein Spannungsmesser mit 2 kΩ Innenwiderstand und 22 V Skalenendwert soll auf 220 V erweitert werden.
Wie groß ist der Vorwiderstand R_v zu wählen?

$$R_v = \left(\frac{220\ \text{V}}{22\ \text{V}} - 1\right) 2\ \text{k}\Omega = 18\ \text{k}\Omega.$$

4.1.2.12. Impedanzmessungen

Die Größe von ohmschen Widerständen kann mittels *Ohmmeters* nach Bild 4.14 im Bereich von 0,05···50 Ω direkt durch Spannungsmessung über den unbekannten Widerstand bei bekanntem Strom (Einstellmöglichkeit mit R_s) gemessen werden. Die Skale dieses Instruments ist in Ohm geeicht. Für Widerstände zwischen 50 und 6000 Ω ist die Schaltung nach Bild 4.15 geeignet.

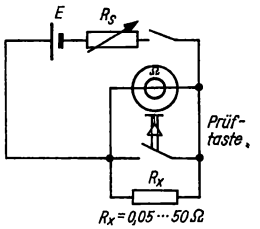


Bild 4.14. Prinzipschaltung eines Ohmmeters für Widerstände 0,05···50 Ω
R_x unbekannter Widerstand, R_s Schutzwiderstand

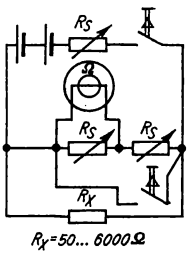


Bild 4.15. Prinzipschaltung eines Ohmmeters für Widerstände 50···6000 Ω

Weiterhin ist es möglich, *aus Strom- und Spannungsmessungen* die Größe des Widerstands über das OHMsche Gesetz zu berechnen. Bei Verwendung von Wechselspannung können auch die Blindwiderstände von Spule oder Kondensator oder von Kombinationsschaltungen bestimmt werden. Beim Kondensator oder bei der Spule kann der Kapazitäts- oder Induktivitätswert nach den Beziehungen

$$C_x = \frac{I}{U}\frac{1}{2\pi f}, \quad L_x = \frac{U}{I}\frac{1}{2\pi f}$$

errechnet werden (f Frequenz der verwendeten Wechselspannung).
Es ist zu beachten, daß bei Widerständen, die erheblich kleiner sind als der Innenwiderstand des Spannungsmessers, das Voltmeter direkt über den zu messenden Widerstand gelegt wird (Stromfehler gering) (s. Bild 4.16).

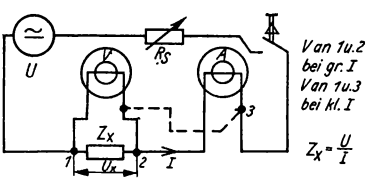


Bild 4.16. Schaltung zum Bestimmen von Widerständen mit Strom- und Spannungsmessung

Ist der Widerstand gleich dem Innenwiderstand des Spannungsmessers oder größer als er, ist das Voltmeter über den Widerstand und den Strommesser zu legen. Der Strommesserwiderstand soll dabei genügend klein sein (geringer Spannungsfehler). Dieser Fall ist im Bild 4.16 gestrichelt dargestellt. Diese Einschränkungen gelten auch beim Messen von Blind- und komplexen Widerständen.
Meßbrücken sind Vierpolschaltungen, bei denen im abgeglichenen Zustand (Meßinstrument, meist Galvanometer, zeigt keine Spannung) gilt

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N;$$

R_x unbekannter Widerstand, R_N Widerstandsnormal

Dabei kann R_1/R_2 als Längenverhältnis l_1/l_2 eines homogenen Schleifdrahts oder als Winkelverhältnis α_1/α_2 eines linearen Potentiometers dargestellt werden. Für Widerstände zwischen etwa 0,5 Ω und 10^6 Ω wird die WHEATSTONE-*Meßbrücke* nach Bild 4.17 verwendet. Bei Widerständen kleiner als etwa 0,5 Ω

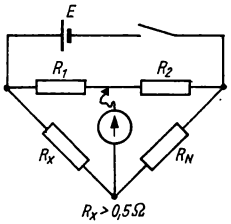


Bild 4.17. Prinzipschaltung einer WHEATSTONE-Brückenschaltung

wird durch Übergangswiderstände das Ergebnis erheblich verfälscht. Deshalb wird hier die THOMSON-*Brücke* nach Bild 4.18 verwendet. Werden statt der ohmschen Widerstände R_x und R_N Kapazitäten C_x und C_N oder Induktivitäten L_x und L_N in die Brücke geschaltet, kann Kapazität $C_x = (R_2/R_1)\,C_N$ oder Induktivität $L_x = (R_1/R_2)\,L_N$ gemessen werden. Hierbei ist die Brücke jedoch mit Wechselspannung (tonfrequent) zu speisen. Als Nullindikator wird dann ein Kopfhörer verwendet.

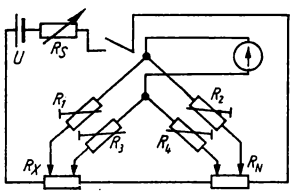


Bild 4.18. Prinzipschaltung einer THOMSON-Brückenschaltung

Bild 4.19 gibt übersichtsweise die gebräuchlichsten Widerstandsmeßverfahren und ihre Anwendungsbereiche an. Messungen des Isolationszustands elektrischer Anlagen und Kabel sind auf die *Messung des Isolationswiderstands* zurückzuführen. Hierzu sind alle genannten Widerstandsmeßverfahren anwendbar. Bei Messungen mittels Ohmmeters muß berücksichtigt werden, daß die Messungen mit gesondert erzeugter Gleichspannung durchgeführt werden, um nur den ohmschen Anteil dieses Widerstands zu erfassen. In Gleichstromanlagen kann hierzu die Betriebsspannung verwendet werden, wie es Bild 4.20 zeigt. In den in Betrieb befindlichen Wechsel- und Drehstromanlagen wird die Gleichspannung gesondert erzeugt und der Betriebsspannung überlagert, wie aus Bild 4.21 hervorgeht. Die Höhe der Spannung des Isolationsmeßgeräts ist Tabelle 4.4 zu entnehmen.

Tabelle 4.4: Spannungen für Isolationsmeßgeräte (in V)

Nennspannung der Anlage	Spannung des Isolationsmeßgeräts
≦ 60	500
> 60···1000	1000

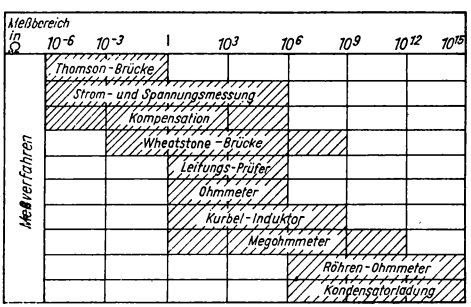


Bild 4.19. Übersicht zu Widerstandsmeßverfahren

Der Isolationswiderstand gilt als ausreichend, sofern 1 kΩ je V der Anlagennennspannung nicht überschritten wird. Bei Anlagen in nassen Räumen sind 50 Ω/V ausreichend. Bei Anlagenteilen mit unterschiedlicher Nennspannung ist bei der Isolationsprüfung dieser Teile gegeneinander die höhere Nennspannung zugrunde zu legen.

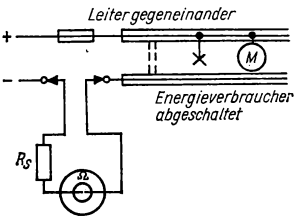


Bild 4.20. Messung des Isolationswiderstandes, Leiter gegen Leiter

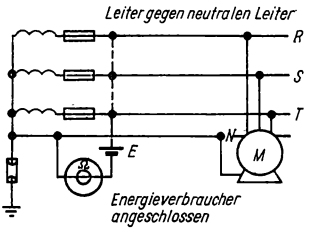


Bild 4.21. Messung des Isolationswiderstandes, Leiter gegen neutralen Leiter

Fehlerortbestimmungen von Kabeln können durch Widerstandsmessungen mit Brückenschaltungen recht genau ausgeführt werden. Aus der Größe des Widerstands kann auf die Entfernung des Fehlers vom Meßort geschlossen werden:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N = R'l; \quad l/2 = \frac{1}{2}\frac{R_1}{R_2}\frac{R_N}{R'}$$

R' Widerstand des Kabels je m Leitungslänge, l Länge für Hin- und Rückleitung bis zum Fehlerort

Bild 4.22 zeigt Brückenschaltungen für Kurzschluß-, Bild 4.23

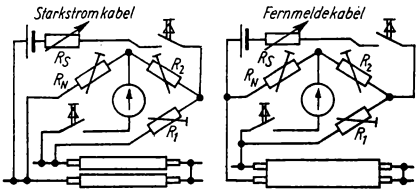


Bild 4.22. Brückenschaltung zur Kabelfehlerortung bei Kurzschluß

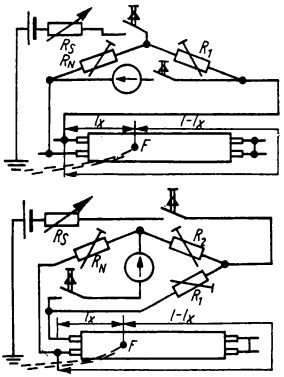


Bild 4.23. Brückenschaltung zur Kabelfehlerortung bei Erdschluß

solche für Erdschlußmessungen. Durch Kapazitäts- und Selbstinduktivitätsmessungen mittels Brückenschaltungen kann eine Kontrolle der Messungen über den ohmschen Widerstand vorgenommen werden:

$L_x = L'l$ bzw. $C_x = C'l$.

L' und C' sind spezifische Kabelwerte je 1 m Leitungslänge. Bild 4.24 gibt die Schaltung für Vergleichsmessungen bei Leiterbruch an.

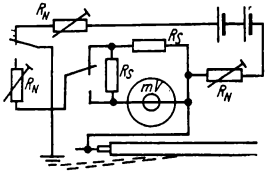


Bild 4.24. Fehlerortung bei Leiterbruch

Moderne Kabelfehler-Ortungsverfahren beruhen auf dem Prinzip der Reflexion elektrischer Impulse an der Fehlerstelle. Dem fehlerbehafteten Kabel wird ein elektrischer Impuls aufgeprägt, der zur Fehlerstelle läuft und dort reflektiert wird, zurückläuft und am Meßort als Signal eintrifft. Sende- und Empfangsimpuls werden am Katodenstrahloszillographen dargestellt. Aus der Laufzeit der Impulse kann auf die Entfernung zum Fehlerort geschlossen werden.
Bild 4.25a) zeigt das Oszillographenbild bei einem Leiterbruch (offener Leiter), Bild 4.25b) das bei Kurzschluß an der Fehlerstelle. Es ist

$$\frac{vt_v}{2} = l_x;$$

t_v Laufzeit für Hin- und Rückweg, v Ausbreitungsgeschwindigkeit, l_x Entfernung bis zum Fehlerort

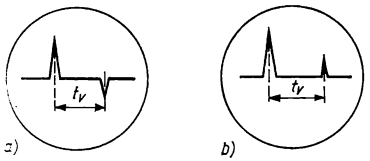


Bild 4.25. Oszillographenbild
a) bei Leiterbruch, b) bei Kurzschluß

4.1.3. Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen

Das elektrische Messen und elektrische Verarbeiten nichtelektrischer Größen hat große Bedeutung für die Automatisierungstechnik. Der Meßwertgeber nimmt die Meßgröße auf und gibt ein analoges Signal in Form einer Gleich- oder Wechselspannung, eines Gleich- oder Wechselstromes ab. Aktive Geber benötigen keine Hilfsenergie, passive Geber benötigen eine elektrische Hilfsenergie.

4.1.3.1. Aktive Geber

Tachometergeber

Dieser Geber arbeitet nach dem Generatorprinzip und erzeugt eine der Drehzahl proportionale Gleich- bzw. Wechselspannung U.

$U = k\Phi n$

k Proportionalitätsfaktor, Φ magnetischer Fluß des Erregersystems, n Drehzahl

Bei Wechselspannungs-Tachometergebern ist außer der Amplitude die Frequenz der Wechselspannung drehzahlabhängig.
Anwendung: Drehzahl- und Wegmessung, Beschleunigungsmessung.

Elektrodynamischer Geber

Den Aufbau zeigt Bild 4.26. Je nach der vom Magneten aufgenommenen Geschwindigkeit wird in der Spule ein Spannungsimpuls induziert. Die Wegänderung je Zeit (Geschwindigkeit) erzeugt eine zeitliche Magnetflußänderung $\Delta\Phi$, die zum Spannungsimpuls U in der Spule führt.

$$U = N\,\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Anwendung: Drehzahlmessung. In Verbindung mit einem Integrierglied ist Geschwindigkeitsmessung, in Verbindung mit einem Differenzierglied ist Beschleunigungsmessung möglich. Bei Zählung der Spannungsimpulse ist Stückzählung gegeben.

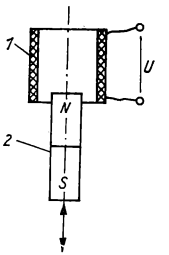


Bild 4.26. Prinzipaufbau eines elektrodynamischen Gebers
1 Spule, 2 Magnet

Elektrostatischer Geber

Bild 4.27 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Infolge Reibung an den Grenzschichten entsteht eine elektrostatische Aufladung, deren Größe am Metallstück gemessen werden kann. Die Ladung Q ist bei elektrisch nichtleitenden Flüssigkeiten abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit v dieser Flüssigkeit.

$Q \sim v$

Anwendung: Strömungsmessung

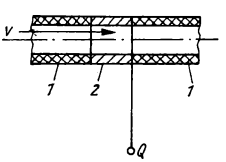


Bild 4.27. Prinzipaufbau eines elektrostatischen Gebers
1 Nichtleiter, 2 Metall

Thermoelement

Thermoelemente bestehen aus zwei Leitern unterschiedlicher Metalle, die durch zwei Löt- oder Schweißstellen miteinander verbunden sind (vgl. 1.9.1.2.). Bei unterschiedlicher Temperatur dieser Stellen entsteht eine Spannung E_{th}

$E_{th} = k(\vartheta_2 - \vartheta_1)$

k Materialpaarungskonstante (z. B. Wismut/Silizium mit 520 µV/°C am höchsten), $\vartheta_2 - \vartheta_1$ Temperaturdifferenz

Tabelle 4.5 enthält gebräuchliche Thermoelemente und deren Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperatur.

Tabelle 4.5: Gebräuchliche Thermoelemente (bezogen auf 0 °C)

Metallpaar	Temperatur der heißen Lötstelle in °C					
	−100	0	100	500	1000	1500
	Thermoelektrische Spannung in mV					
Eisen–Konstantan	−4,75	0	5,37	27,84		
Kupfer–Konstantan	−3,4	0	4,24	27,40		
Nickel–Nickelchrom		0	4,04	20,64	41,32	
Platin–Platinrhodium (10%)		0	0,64	4,22	9,60	15,58

Bild 4.28 zeigt die Kennlinien verschiedener Thermoelemente.

Thermoelemente aus Edelmetallen [s. Bild 4.28a)]
a Rhodium, Rhodiumrhenium (8% Rhenium),
b Iridium, Rhodiumiridium (40% Iridium),
c Platin, Platinrhodium (10% Rhodium),

d Platin, Legierung aus 90,5% Platin, 4,5% Rhenium und 5% Rhodium,
e Platin, Platinrhenium (8% Rhenium),
f Pallaplat (Goldpalladiumplatin), Platinrhodium.

Thermoelemente aus unedlen Metallen [s. Bild 4.28b)]

a Nickel, Kohle,
b Nickel, Chromnickel,
c Konstantan, Kupfer (oder Silber),
d Konstantan, Stahl,
e Konstantan, Chromnickel,
f Legierung aus 84% Nickel + 16% Molybdän,
Legierung aus 50% Nickel + 50% Kupfer.

Bis 3000°C nur im Vakuum oder in reduzierender Flamme; 5,8 mV bei 2570°C. Legierungen aus 75% Wolfram und 25% Molybdän.

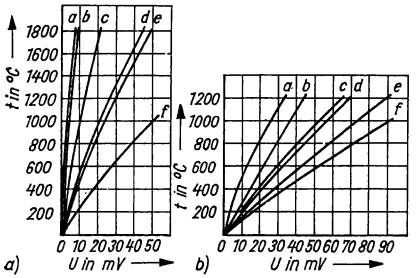


Bild 4.28. Kennlinien von Thermoelementen
a) Edelmetalle, b) unedle Metalle

Anwendung: Temperaturmessung. Infolge geringster Masse treten nur geringste Meßergebnisverfälschungen auf (kleiner als bei Quecksilberthermometer).

Achtung! An Kontaktstellen unterschiedlicher leitfähiger Materialien treten bei Erwärmung ungewollte Thermospannungen auf. Gleichartige Materialien in Meßstromkreisen verwenden!

Peltier-Effekt für Meßzwecke

Die Umkehrung des Thermoeffektes ist der *Peltier-Effekt*. Wird ein Strom durch die Verbindungsstelle zweier Metalle in entgegengesetzter Richtung zum Thermostrom geschickt, tritt eine Abkühlung der Verbindungsstelle ein.

Feldplatten (Hall-Generator)

Bild 4.29 zeigt das Prinzip der Feldplatten. Die HALL-Spannung U_H ist direkt abhängig von der Größe der magnetischen Induktion B (HALL-Effekt)

$$U_H = \frac{R_H}{d} i_1 B$$

R_H HALL-Konstante, d Plattendicke

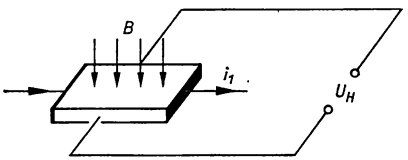


Bild 4.29. Wirkungsprinzip der Feldplatten (HALL-Generator)

Den stärksten positiven HALL-Effekt weist Tellur, den stärksten negativen weist Wismut auf. Zur technischen Anwendung gelangen wegen ihrer Temperaturstabilität Indiumarsenid oder Indiumarsenidphosphid.
Anwendung: Messung magnetischer Größen; Modulator.

Piezoelektrischer Geber

Entsprechend Bild 4.30 zeigen piezoelektrische Materialien (vgl. 1.9.1.3.) bei Druck an der Oberfläche elektrische Ladungen. Quarzgeber halten bei guter Isolation bei ruhender Last die elektrischen Ladungen bis zu mehreren Tagen (statische Geber). Geber aus Seignettesalz oder Bariumtitanat hingegen eignen sich infolge ihrer kleinen Zeitkonstanten besser für dynamische Messungen.
Anwendung: Kraft- und Druckmessung.

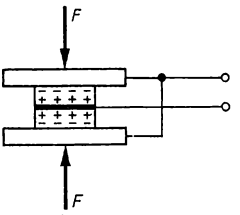


Bild 4.30. Prinzipaufbau eines piezoelektrischen Gebers

Fotoelement

Den Aufbau eines Fotoelementes zeigt Bild 4.31. Die entstehende Fotospannung U_F ist der einfallenden Lichtmenge proportional. Licht hat hierbei die Eigenschaft, aus alkalischen Metallen Elektronen freizusetzen, z. B. aus Kupferoxidul (Cu_2O), Selen, Silizium. Während Siliziumfotoelemente die

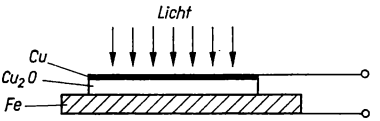


Bild 4.31. Aufbau eines Fotoelementes

größere Leistung abgeben, haben Kupferoxidulfotoelemente die geringste Trägheit (dynamische Messung). Die verschiedenen Materialien haben verschiedene spektrale Empfindlichkeiten; Selen kommt der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges am nächsten.
Anwendung: Lichtmessungen.

4.1.3.2. Passive Geber

Ohmsche Widerstandsgeber

Hierzu zählen *Schleifpotentiometer*, deren Schleiferstellung von einem bestimmten Füllzustand abhängig ist. Weiterhin gehören *Leitfähigkeitsaufnehmer* nach Bild 4.32 dazu. Hierbei kann die Flüssigkeitshöhe über den von der leitfähigen Flüssigkeit gebildeten Nebenschluß gemessen werden.

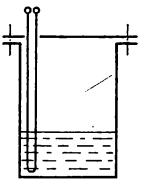


Bild 4.32. Schema eines ohmschen Leitfähigkeitsaufnehmers

Die Abhängigkeit des ohmschen Widerstandes von der Temperatur erlaubt Temperaturmessungen.

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

$$T_2 - T_1 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1}.$$

Die direkte Messung der Widerstandsänderung oder auch mit Hilfe von Brückenschaltungen ist möglich. Ungeheizte *Temperaturgeber* nutzen den Effekt der Widerstandserhöhung bei Erwärmung (Temperaturgeber bei Fernmessung), geheizte Temperaturgeber den der Widerstandsabnahme bei Abkühlung durch z. B. vorbeiströmende Gase oder Flüssigkeiten (Rückschlüsse auf Strömungsgeschwindigkeit oder Art des Mediums infolge unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit möglich). Als Material kommt Platin (−200···+600°C) oder Nickel in Frage.

Dehnungsmeßstreifen nutzen den Effekt der Widerstandsänderung von metallischen Leitern infolge Dehnung (vgl. Bild 4.33). Mit der Dehnung ändern sich Länge, Querschnitt und spezifischer Widerstand infolge von Gefügeverschiebungen. Die Widerstandsänderung ist im elastischen Bereich des metallischen Leiters zur wirkenden Beanspruchung proportional. Die Dehnung ε ist

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{kR} \qquad \Delta R = \varepsilon k R$$

ΔR Widerstandsänderung, k Materialkonstante

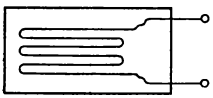


Bild 4.33.
Dehnungsmeßstreifen

Tabelle 4.6 gibt für verschiedene Widerstandsmaterialien die k-Faktoren an. Große k-Faktoren verursachen eine große Widerstandsänderung.

Tabelle 4.6: k-Faktoren für Widerstandsmaterialien

Material	k-Faktor	Material	k-Faktor
Platin	+6,10	Manganin	+0,50
Chromnickel	+2,63	Nickel	−12,10
Konstantan	+2,15		

Eine zuverlässige Messung setzt ein zuverlässiges Aufkleben des Dehnungsstreifens voraus. Kraft-, Dehnungs- und mechanische Spannungsmessungen, Schwingungs-, Druck- und Drehmomentenmessungen sind möglich. Als Meßschaltung eignet sich die Brückenschaltung. Dabei bildet die Verstimmung ein Maß für die zu messende mechanische Größe.

Thermistoren (vgl. 2.8.2.2.). sind Halbleiterwiderstände, deren Widerstandswert mit zunehmender Temperatur exponentiell nach

$$R = ae^{b/T}$$

kleiner wird.

a Materialkonstante, b Energiekonstante (große Werte ergeben eine starke Temperaturabhängigkeit), T absolute Temperatur.

Werte von gebräuchlichen Temperaturfühlern sind in Tabelle 4.7 angegeben.

Tabelle 4.7: Kenngrößen von Thermistor-Temperaturfühlern

Typ	R_{20} kΩ	Toleranz %	b K
TNF-M 1 k	1	20	2100
TNF-M 2,2 k	2,2	20	2200
TNF-M 3,3 k	3,3	20	2300
TNF-M 4,7 k	4,7	20	2400
TNF-M 6,8 k	6,8	20	2500
TNF-M 10 k	10,0	20	2600

Fotowiderstände sind Halbleiter aus Selen, Kupferoxidul, Germanium, Silizium, Zinksulfid oder Kadmiumsulfid, die bei völliger Dunkelheit einen Widerstand (Dunkelwiderstand) von einigen Kiloohm bis einige Megaohm aufweisen. Bei Lichteinfall verringert sich dieser Widerstand exponentiell. Bei dynamischen Messungen ist zu beachten, daß eine gewisse Trägheit bei der Widerstandsänderung (bis zu 60 µs) vorliegt. *Anwendung:* Sicherheitsanlagen, fotooptische Verstärker u. a. Dieser Fotoeffekt kann auch in Transistoren und Dioden festgestellt werden. Bei Dioden erhöht sich der Sperrstrom bei Lichteinfall auf die Sperrzone (Fotodiode). Fällt Licht auf die elektrisch nicht vorgespannte Basis eines Transistors, so ändert sich dessen Kollektorstrom (Fototransistor).
Bild 4.34 zeigt das Prinzip eines Kadmiumsulfid-Fotowiderstandes.

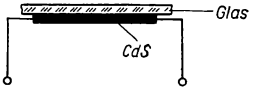


Bild 4.34.
Aufbau eines Kadmiumsulfid-Fotowiderstandes

Induktive Geber

Bei induktiven Widerstandsgebern wird der Effekt der Widerstandsänderung

$$X_L = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

mit der Induktivität L

$$L = N^2 \frac{\mu A}{l}$$

ausgenutzt. Die zuletzt genannte Gleichung läßt die 3 Möglichkeiten der Änderung erkennen:

1. Veränderung der vom Magnetfluß durchsetzten Fläche A (Bild 4.35),

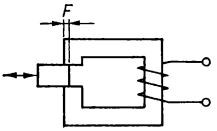


Bild 4.35. Schema eines induktiven Widerstandgebers mit Flächenänderung

2. Veränderung des Kraftlinienweges l (Bild 4.36),

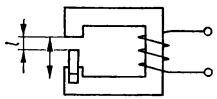


Bild 4.36. Schema eines induktiven Widerstandgebers mit Wegänderung

3. Veränderung der Permeabilität μ (Bild 4.37).

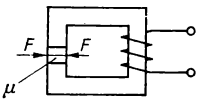


Bild 4.37. Schema eines induktiven Widerstandgebers mit Permeabilitätsänderung

Bei *induktiven Gebern mit Flächenänderung* lassen sich Wegänderungen im Zentimeter- und Millimetergebiet erfassen. Die Wegänderung wird auf einen begrenzt beweglichen Magnetkern übertragen, der in eine Spule eintaucht. Bild 4.38 zeigt hierzu den prinzipiellen Aufbau.

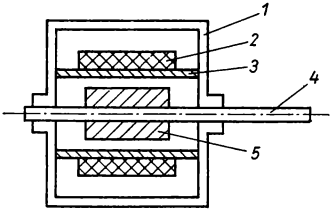


Bild 4.38. Aufbau eines induktiven Widerstandgebers mit Flächenänderung
1 Gehäuse, 2 Spule, 3 Cu-Zylinder, 4 verschiebbare Achse, 5 Magnetkern

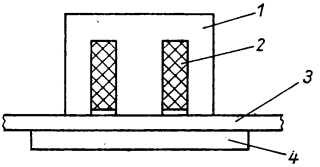


Bild 4.39. Aufbau eines induktiven Widerstandgebers mit Abstandsänderung
1 Magnetkern, 2 Spule, 3 Material mit zu messender Dicke, 4 Joch

Induktive Geber mit Abstandsänderung werden auf Grund ihrer großen Empfindlichkeit zur Schichtdicken-, Oberflächenrauheits- und Schwingungsmessung verwendet. Bild 4.39 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

Induktive Geber mit Permeabilitätsänaerung nutzen den Effekt der Änderung der Permeabilität bei mechanischer Beanspruchung aus (z. B. nickelhaltige Eisenlegierungen). Bild 4.40 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Die Permeabilitätsänderung infolge von Druck überträgt sich auf eine Induktivitätsänderung, die sich z. B. bei Speisung mit Wechselstrom in einer Stromänderung erkennen läßt.

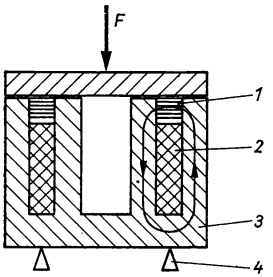


Bild 4.40. Aufbau eines induktiven Widerstandgebers mit Permeabilitätsänderung
1 nickelhaltige Eisenringe, 2 Wicklung, 3 Kern, 4 Widerlager

Kapazitive Geber

Bei kapazitiven Widerstandsgebern wird der Effekt der Widerstandsänderung

$$X_C \approx \frac{1}{\omega C}$$

mit

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

A Plattenfläche, d Plattenabstand

für den Plattenkondensator ausgenutzt. Die zuletzt genannte Gleichung läßt 3 Möglichkeiten der Änderung des kapazitiven Widerstandes erkennen:

1. Veränderung der Plattenfläche A,
2. Veränderung des Plattenabstandes d,
3. Veränderung des Dielektrikums.

Das Prinzip des *kapazitiven Gebers mit Flächenänderung* ist im Drehkondensator verwirklicht. Damit lassen sich Winkel- und Weggrößen aufnehmen. Bild 4.41 zeigt das Funktionsprinzip.

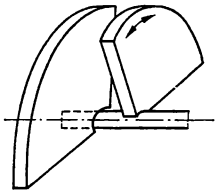


Bild 4.41. Ausbau eines kapazitiven Widerstandgebers mit Flächenänderung

Kapazitive Geber mit Abstandsänderung können kleinste Wegänderungen erfassen und sind daher für Druck-, Zug-, Drehmoment- und berührungslose Schwingungsmessung geeignet. Bild 4.42 zeigt das Funktionsprinzip.

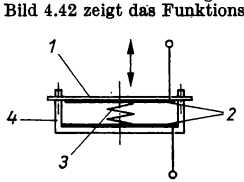


Bild 4.42. Aufbau eines kapazitiven Widerstandgebers mit Abstandsänderung
1 Membran, 2 Metallbelag, 3 Feder, 4 Gehäuse

Kapazitive Geber mit Dielektrikumsänderung arbeiten mit einem Dielektrikum, welches seine Dielektrizitätskonstante ε in Abhängigkeit von der Feuchte, vom Druck oder vom eingebrachten Material ändert. Bild 4.43 zeigt das Funktionsprinzip eines kapazitiven Füllstandmessers.

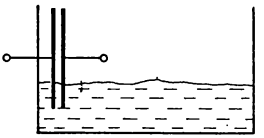


Bild 4.43. Schema eines kapazitiven Widerstandgebers mit Änderung des Dielektrikums

4.2. Relais und Schaltgeräte

4.2.1. Relais, Auslöser

Hierfür gelten folgende *Standards*:

TGL 21645 Relais und Auslöser, Begriffe,
TGL 21646/01 Relais und Auslöser, Techn. Forderungen,
TGL 21646/02 Relais und Auslöser, Prüfungen.

Bezeichnungen

Relais

Relais sind Einrichtungen, die durch Änderung der Wirkungsgröße im Treibsystem beeinflußt werden und Schaltglieder betätigen.

Nichtmessende Relais sind Relais, die ohne Überwachen der Wirkungsgröße Schaltglieder betätigen.

Messende Relais sind Relais, die eine oder mehrere Wirkungsgrößen überwachen und bei Über- oder Unterschreiten eines bestimmten Wertes Schaltglieder betätigen.

Neutrale Relais sind Relais, deren Schaltstellung von der Richtung der Wirkungsgröße unabhängig ist.

Gepolte Relais sind Relais, deren Schaltstellung von der Richtung der Wirkungsgröße abhängig ist.

Haftende Relais sind Relais, deren Schaltstellung von der Richtung der Wirkungsgröße unabhängig ist, die bei Verschwinden der Wirkungsgröße in der Wirkstellung bleiben und die Wirkstellung nur durch eine entgegengerichtete Wirkungsgröße oder mechanische Kräfte verlassen.

Verzögerungsrelais sind Relais mit beabsichtigter, fest eingestellter Verzögerung ohne Kennzeichnung der Einstellwerte.

Zeitrelais sind Relais mit beabsichtigter, einstellbarer Verzögerung mit Kennzeichnung der Einstellwerte.

Schutz- und Überwachungsrelais sind messende Relais, die eine bestimmte Schutz- oder Überwachungsaufgabe, wie Überstromschutz, Unterspannungsschutz, Differentialschutz, erfüllen.

Auslöser

Auslöser sind Einrichtungen, die durch Änderung der Wirkungsgröße im Treibsystem beeinflußt werden und mechanische Teile betätigen.

Nichtmessende Auslöser sind Auslöser, die ohne Überwachen der Wirkungsgröße mechanische Teile betätigen.

Messende Auslöser sind Auslöser, die eine oder mehrere Wirkungsgrößen überwachen und beim Über- oder Unterschreiten eines bestimmten Wertes mechanische Teile betätigen.

Arbeitsstromauslöser sind Auslöser, die beim Einschalten der Wirkungsgröße mechanische Teile betätigen.

Ruhestromauslöser sind Auslöser, die beim Ausschalten der Wirkungsgröße mechanische Teile betätigen.

Schutz- und Überwachungsauslöser sind messende Auslöser, die eine bestimmte Schutz- oder Überwachungsaufgabe, wie Überstromschutz, Unterspannungsschutz, Differentialschutz, erfüllen.

Nennspannungen und Nennströme

In den Tabellen 4.8 und 4.9 sind Nennspannungen und Nennströme angegeben.

Tabelle 4.8: Nennspannungen für Relais und Auslöser[1])

Gleichspannung V	Wechselspannung V	Bemerkungen	Gleichspannung V	Wechselspannung V	Bemerkungen
0,060		bei Anschluß an Nebenwiderstände	22,5		
0,150			24,0	24,0	
0,300			36,0	36,0	
1,2			40,0		
1,5			45,0	42,0	
2,0			48,0		
2,4			60,0	60,0	
3,0			72,0		
3,6			78,0		
4,0			80,0		
4,5			90,0		
4,8			96,0		
6,0	6,0			100:3	bei Anschluß an Spannungswandler
9,0			110	127	
12,0	12,0		220	220	
15,0			440	380	
20,0				500	

[1]) Die unterstrichenen Werte sind Vorzugsspannungen.

Tabelle 4.9: Nennströme in A *für Relais und Auslöser*

0,1	1	10	100	1000
0,12	1,25	—	125	1250
0,16	1,6	16	160	1600
0,2	2,0	—	200	2000
0,25	2,5	25	250	2500
0,3	—	31,5	—	3150
0,4	4	40	400	
0,5	5	—	—	
0,6	6,3	63	630	
0,8	—	80	—	

Nennströme für die Triebsysteme thermischer und elektromagnetischer Relais und Auslöser sind nicht Bestandteil der Tabelle 4.9. Sie sind gesondert festzulegen.
Bei thermischen Relais und Auslösern mit Einstellbereichen gilt der obere Einstellwert als Nennstrom. Bei elektromagnetischen Relais und Auslösern ist der Nennstrom der Bezugswert des Einstellbereiches.

Anwendung der Relais und Auslöser

Relais und Auslöser sind in allen Zweigen der Elektrotechnik, z. B. Fernmeldetechnik, Signal- und Sicherungstechnik, BMSR-Technik, Starkstromtechnik, sehr häufig verwendete Bauelemente. Sie werden hier für verschiedenartige Zwecke genutzt, z. B. als Schutzrelais, Hilfs- und Melderelais, Fortschaltrelais, als Primär- oder Sekundärauslöser.
In der Technik ist in den letzten Jahren ein starker Trend zum Einsatz von *Transistorschaltungen* anstelle der herkömmlichen mechanischen Relais zu verzeichnen. Die vor allem für kleinere Leistungen immer mehr verwendeten Transistoren haben gegenüber den Relais wesentliche Vorteile, z. B.:

das Schalten erfolgt kontaktlos,
die Transistoren sind sehr wartungsarm,
sie haben eine sehr geringe Ausfallquote,
sie sind unabhängig von atmosphärischen Einflüssen wie aggressive Luft u. ä.

Tabelle 4.10 enthält eine Übersicht über Schutz-, Melde-, Zwischen- und Zeitrelais.

Relais-Bausteinsystem RELOG

Immer häufiger kommt für Steuerungsanlagen und Geräte der Relaisschutztechnik das kontaktbehaftete Bausteinsystem »RELOG« zur Anwendung. Es ist eine sinnvolle Ergänzung vorhandener elektromechanischer und elektronischer Relais und wird ständig weiter komplettiert. RELOG-Bausteine entsprechen TGL 21646/01. Die Parameter des RELOG-Systems gestatten die Anpassung an das TRANSLOG-Bausteinsystem. Tabelle 4.11 enthält eine Übersicht von RELOG-Relais mit Hauptkennwerten. Weitere Einzelheiten sind dem Katalog des Herstellers (Kombinat EAW) zu entnehmen.

Abmessungen: Höhe max. 81 mm
Tiefe max. 80 mm (bei Bedienelementen zusätzlich 20 mm)
Breite $b = x \cdot 15$ mm

Tabelle 4.10: Schutz-, Melde-, Zwischen- und Zeitrelais

Lfd. Nr.	Relais	Typ	Ausführung	Nennstrom, Nennspannung	Einstellbereich, Ansprechwert	Polzahl	Verbrauch	Kontaktglieder
1	unabhängiges Überstromrelais	RSf 5	elektromagnetisch	1; 2,5; 5; 10 A	0,8···1,6 I_N 1,6···3,2 I_N	1	≦ 1 VA bei Ws ≦ 0,5 W bei Gs	1 Öffner oder 1 Schließer
2	Unterspannungsrelais	RUf 5	elektromagnetisch	100; 100/$\sqrt{3}$ V bis 380 V Ws	0,45 bis 0,85 U_N	1	7 VA	1 Öffner oder 1 Schließer
3	Überspannungsrelais	RUf 5	elektromagnetisch	100; 100/$\sqrt{3}$ V bis 220 V Ws	1,3···2,5 U_N	1	1 VA	1 Öffner oder 1 Schließer
4	thermisches Überstrom-Zeitrelais	RSZ 3t	thermisch und elektromagnetisch (Schnellausl.)	5; 3,2 A	4/5···8 A 2,5/3,2 bis 5 A 25···60 A 15···35 A	3	3···7 VA	1 Schließer
5	stabilisiertes Quotienten-Differentialrelais	RQS 4	elektromagnetisch	5 A	1,5···3 A	3	2,5 VA Haltewert 1···4 VA Auslösewert	3 Schließer
6	Turbinenrückleistungsrelais	RRZG	elektrodynamisch	5 A; 58···63 V	2,5···11,25 W 10···45 W 0,5···6 s	1	1 VA Strompfad 6 VA Spannungspfad	1 Schließer
7	Erdschlußrelais	RE 2	elektromagnetisch	100/110 V Ws	< 50% U_N	1	5···20 VA	2 Wechsler

Tabelle 4.10 (Fortsetzung)

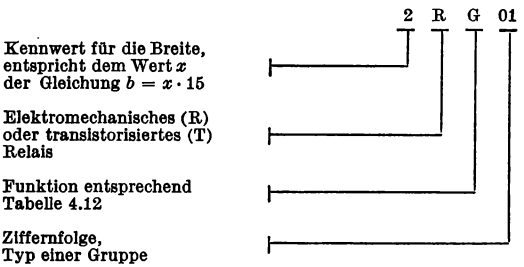
Lfd. Nr.	Relais	Typ	Ausführung	Nennstrom, Nennspannung	Einstellbereich, Ansprechwert	Polzahl	Verbrauch	Kontaktglieder
8	Rotor-Erdschlußrelais	REG 5	elektromagnetisch	100/110 V 220 V	≧ 600 Ω	1	12···17 VA	2 Wechsler
9	Stator-Erdschlußrelais	REG 4	polarisiertes Relais mit Gleichrichter	120 V	8···20 V	1	14 VA	1 Schließer
10	Rotor-Doppelerdschlußrelais	REG 6	polarisiertes Relais	—	6 mA	1	30 mW	1 Schließer
11	Zwischenrelais	RH 23	elektromagnetisch	bis 220 V Gs bis 380 V Ws	—	—	3 W 10 VA	2 Schließer 2 Öffner
12	Zwischenrelais	RH 53	elektromagnetisch	bis 220 V Gs bis 380 V Ws	—	—	1,9 W 3,5 VA	3 Wechsler
13	Zwischenrelais	RH 95	elektromagnetisch	bis 220 V Gs bis 380 V Ws	—	—	4 W 9 VA	3 Wechsler oder 4 Wechsler
14	Melderelais	RA 5 RA 6 RA 7	elektromagnetisch	bis 220 V Gs bis 380 V Ws	—	—	2 W 3,5···5,5 VA	2 Wechsler oder 1 Wechsler und 1 Wischer
15	Feinzeitrelais	RZf 2	elektromagnetisch mit Hemmwerk	bis 220 V Gs bis 380 V Ws	0,3···3 s 0,5···6 s 1···12 s	—	32 W 55 VA	1 Schließer
16	Kurzzeitrelais	RZk 3 (anzugsverzögert)	elektromagnetisch mit Hemmwerk	bis 220 V Gs bis 380 V Ws	0···3 s 0···6 s 0···20 s	—	22/7 W	1 Wechsler
		RZka 3 (abfallverzögert)					max. 75 VA	1 Wechsler
17	Langzeitrelais — anzugsverzögert — abfallverzögert	RZw RZwa	Synchronmotor	110 oder 220 V Ws	0···3 s gestaffelt bis 0,5···6 h	—	23/11 VA	2 oder 3 Wechsler, verzögert

Tabelle 4.11: RELOG-Relais

Lfd. Nr.	Relais	Typ	Ausführung	Nennspannung	Einstellbereich	Polzahl	Verbrauch	Kontaktglieder
1	neutrales Relais	2 RH 01[1]) 2 RH 05[2])	elektromagnetisch	bis 220 V Gs	—	—	3 W	4 Wechsler
2	neutrales Relais	2 RH 30[1]) 2 RH 35[2])	elektromagnetisch	bis 220 V Ws	—	—	12 VA	4 Wechsler
3	neutrales Relais[3])	4 RH 10 4 RH 40	elektromagnetisch	bis 220 V Gs bis 220 V Ws	— —	— —	6 W 20 VA	8 Wechsler
4	haftendes Relais[3])	2 RH 60	elektromagnetisch	bis 220 V Gs	—	—	3 W	4 Wechsler
5	neutrales Relais mit Schutzgaskontakten[3])	2 RG 01 2 RG 02	elektromagnetisch	bis 220 V Gs	—	—	3 W 2 W	10 Schließer 2 oder 4 Schließer
6	neutrales Relais mit Schutzgaskontakten[3])	2 RG 03 2 RG 04	elektromagnetisch	bis 220 V Gs	—	—	20 mW 1 W	1 Schließer 1 u. 2 Schließer
7	Unterspannungsrelais	2 RU 20	elektromagnetisch	bis 220 V Ws	1···2 U_N	1	0,5 W	1 Schließer
8	Zeitrelais[3]) — anzugsverzögert — abfallverzögert	 3 RZ 01 3 RZ 02	Laufwerk mit selbstanlaufender Unruhe	bis 220 V Gs	0,25···3 s gestaffelt bis 20···240 s	—	60 W anziehen 10 W halten	1 Wechsler, verzögert 1 Schließer, verzögert

[1]) Ausführung mit Gehäuse, steckbar; wahlweise mit oder ohne Fallklappe bzw. Schauzeichen
[2]) Ausführung mit Gehäuse, Lötanschluß
[3]) Ausführung mit Steckanschluß oder mit Lötanschluß

Zusammensetzung der Typenbezeichnung:



Systemparameter:

Schutzgrad:	IP 40 im gestreckten Zustand
Temperaturbereich:	−30···+50 °C
Lage:	lageunabhängig
Schüttelfestigkeit:	1 mm bei 20 Hz
relative Feuchte:	< 90% bei 20 °C

Tabelle 4.12: Relaisfunktionen der RELOG-Bausteine

Kennbuchstabe	Funktion	Farbkennzeichnung
A	Melderelais	Rot
G	neutrales Relais mit Schutzkontakten	Blau
H	neutrales Relais mit offenen Schaltgliedern	Schwarz
S	Meßglieder für Strom	Hellviolett
U	Meßglied für Spannung	Hellviolett
Z	Zeitrelais	Grün

Schutzrohrkontaktrelais

Schaltspannung: max. 60 V

Schaltstrom: max. 200 mA bei 60 V — (ohmsche Last),
max. 60 mA bei 60 V — (induktive Last),
max. 250 mA bei 24 V — (induktive Last);
höhere Schaltleistungen mit entsprechender Funkenlöschung.

Kontakte: 2 Schließer (Typ RGK 66/2),
4 Schließer (Typ RGK 66/4),

Abmessungen: 70 mm × 21,5 mm × 15 mm.

Sie besitzen eine vorteilhaft geringe Kapazität zwischen den Kontakten. Wegen ihrer geringen Abmessungen und ihrer hohen Leistungsfähigkeit haben diese Relais eine perspektivische Bedeutung, besonders für die Verwendung in der Datenverarbeitung, in der Prozeßsteuerung, in der chemischen Industrie, in numerischen Steuerungssystemen und ähnlichen modernen Steuerungseinrichtungen. Selbst nach jahrelanger Nichtbetätigung schalten die Bausteine einwandfrei. Bei hoher Lebensdauer und Schaltsicherheit sind sie völlig wartungsfrei.

Bauelemente mit geschütztem Kontakt (Geko-Kontakt)

Das Bauelement besteht aus 2 in einem Glasrohr eingeschmolzenen Kontaktzungen aus einer Eisen-Nickel-Chrom-Legierung (Bild 4.44). Die hartversilberten Enden dieser Zungen überlappen sich im Inneren des Glasrohrs mit einem geringen Kontaktabstand. Der Kontaktraum (Glasrohr) ist mit Gas (Argon) gefüllt. Fließt durch die das Glasrohr umgebende Spule Strom, so wirkt eine elektromagnetische Kraft auf den Kontakt. Ist diese Kraft größer als die Federkraft (Rückstellkraft) der Kontaktzungen, so berühren sich die Enden der Zungen und schließen damit den Kontakt. (Bemessung der Spule ist in Tabelle 4.13 angegeben.)

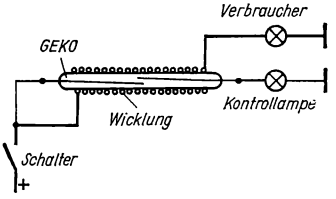


Bild 4.44. Prinzipschaltung des Geko-Kontaktes

Tabelle 4.13: Bemessung der Spule des Geko-Kontakts in Abhängigkeit von der Nennspannung und der Leistung der Verbraucher

Spannung	Leistung	Strom	Erforderliche Windungszahl		Erforderlicher Drahtdurchmesser Cu-L	
			für	für	bei	bei
	W	A	60 Aw	90 Aw	6 A/mm²	3 A/mm²
6 V Nennspannung	5	0,84	75	110	0,43	0,60
	10	1,67	36	54	0,60	0,85
	15	2,50	24	36	0,75	1,05
	20	3,33	18	27	0,85	1,20
	25	4,17	15	22	0,95	1,35
	30	5,00	12	18	1,05	1,50
	35	5,83	11	16	1,15	1,60
	40	6,67	9	14	1,20	1,70
	45	7,50	8	12	1,30	1,80
	50	8,33	7	11	1,35	1,90
12 V Nennspannung	5	0,42	143	215	0,30	0,43
	10	0,84	75	110	0,43	0,60
	15	1,25	48	72	0,55	0,75
	20	1,67	36	54	0,60	0,85
	25	2,08	30	44	0,65	0,95
	30	2,50	24	36	0,75	1,05
	35	2,91	21	31	0,80	1,15
	40	3,33	18	27	0,85	1,20
	45	3,75	16	24	0,90	1,30
	50	4,17	15	22	0,95	1,35

Diese stromabhängige Kontakteinrichtung eignet sich als Kontrollschaltung für viele Verwendungszwecke, z. B. für die Bremsleuchtenkontrolle bei Kraftfahrzeugen.
Ist der Verbraucherstromkreis geschlossen, so brennt die über den Geko-Kontakt geschaltete Kontrollampe. Ist der Verbraucherstromkreis, z. B. im Falle einer Störung, unterbrochen, so erlischt die Kontrollampe ebenfalls.
Die Geko-Kontakte sind wartungsfrei, haben eine lange Lebensdauer, große Schaltzuverlässigkeit und hohe Kontaktgüte und -sicherheit.

Kleinrelais

Speziell für die Belange der BMSR-Technik und der Fernmeldetechnik sind von der Industrie die sog. Kleinrelais entwickelt worden, die z. B. gekennzeichnet sind durch

geringe Abmessungen,
universelle Verwendbarkeit,
große Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit,
große Schalthäufigkeit ($\geqq 10^7$ Schaltungen),
beliebige Einbaulage,
ausreichende Kontaktzahl (bis zu 8 Umschalter).

Auf Grund der Vielzahl der Typen und ihrer Ausführungsvarianten wird es möglich, sie vielseitig einzusetzen. Die technischen Daten sind den Katalogen der Hersteller zu entnehmen.

4.2.2. Sicherungen, Leitungsschutzschalter

Kennwerte von Sicherungen enthalten die Tabellen 4.14 und 4.15.

Tabelle 4.14: Hochspannungs-Wechselstrom-Sicherungen (nach TGL 16426)

Typ	Nenn-spannung kV	Nennstrom in A 6	10	16	25	40	63	80	100	125	160	Nenn-ausschalt-strom kA
HWsF	3,6	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	40
	7,2	×	×	×	×	×	×	×	×	—	—	31,5
	12	×	×	×	×	×	×	×	×	—	—	25
	24	×	×	×	×	×	×	—	—	—	—	20
	36	×	×	×	×	×	—	—	—	—	—	16

Tabelle 4.15: NH-Schmelzeinsätze — Nennausschaltvermögen

Größe/ Kennlinie	Nenn-strom	220 V Ws		380 V Ws		500 V Ws		660 V Ws		cos φ
		I_s kA	I_k'' kA	I_s kA	I_k'' kA	I_s kA	I_k'' kA	I_s kA	I_k'' kA	
00 T	10 16 20 25 36 50 63	110	60	85	50	75	40			0,3···0,1
	80 100	105	60	80	45					
1 T	36 63 80 100 125	120	60	110	55	100	50			
	160 200	120	60	100	50	90	45			
2 T	160 200	120	60	120	55	110	50			
	224 250	120	60	80	40	70	35			
	300 355	120	60	75	40	70	35			
3 T	300 355	110	60	80	45	75	40			
	425 500 600	110	60	75	40	70	35			
3 FF	350	—	—	—	—	—	100			

Kurzschlußstrombegrenzungen s. Bilder 4.45 und 4.46.

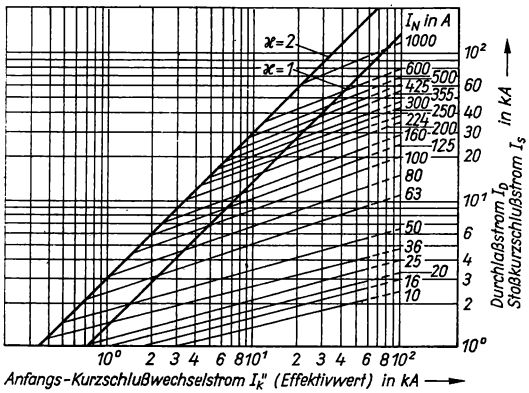


Bild 4.45. Kurzschlußstrombegrenzung durch träge NH-Schmelzeinsätze 10···1 000 A, 500 V Ws

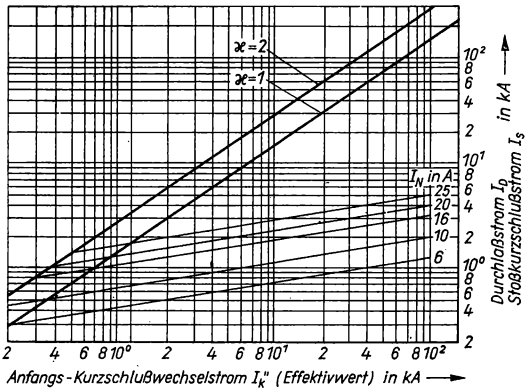


Bild 4.46. Kurzschlußstrombegrenzung durch träge D-Schmelzeinsätze 6···25 A, 500 V Ws

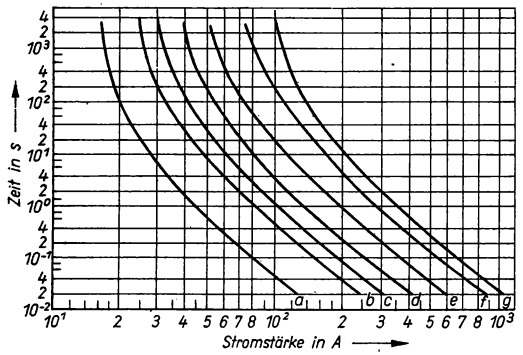


Bild 4.47. Strom-Zeit-Kennlinien der DL-Schmelzeinsätze
a Nenngröße 10 A, b Nenngröße 16 A, c Nenngröße 20 A, d Nenngröße 25 A, e Nenngröße 35 A, f Nenngröße 50 A, g Nenngröße 63 A

DL-Sicherung für 380 V

DL-Sicherungen bilden eine Neuentwicklung. Es sind kleinbauende Schraub-Schmelz-Sicherungen für 380 V, die Leitungen, elektrische Maschinen oder Geräte vor Überlastung und Kurzschlüssen schützen sollen. Sie unterscheiden sich durch 2 Nenngrößen

- Nenngröße 20 A, Elektrogewinde E 16, DL-Schmelzeinsätze, 10, 16, 20 A,
- Nenngröße 63 A, Elektrogewinde E 18, DL-Schmelzeinsätze, 25, 35, 50, 63 A.

Bild 4.47 zeigt die Strom-Zeit-Kennlinien der DL-Schmelzeinsätze.

Vorteile der DL-Sicherungen:

- Materialeinsparung beim Hersteller,
- Kleinbauweise gestattet, Verteilungen, Schaltschränke, Zählertafeln u. ä. kleiner und materialsparender zu gestalten,
- größere Bestückungsdichte bei Beibehaltung der Gerätegröße.

Tabelle 4.16 enthält die Kennfarben von D-Schmelzeinsätzen

Tabelle 4.16: Niederspannungssicherungen (Nennstromstärken und Kennfarben von D-Schmelzeinsätzen)[1])

Sockel	E 16 25 A		E 27 25 A		E 33 60 A		R 1¼" 100 A		R 2" 200 A	
Schmelzeinsätze	I_N A	Farbe	I_N A	Farbe	I_N A	Farbe	I_N A	Farbe	I_N A	Farbe
	(6)	grün	(4)	braun	35	schwarz	80	silber	125	gelb
	10	rot	(6)	grün	50	weiß	100	rot	160	kupfer
	16	grau	10	rot	63	kupfer	—	—	200	blau
	20	blau	16	grau	—	—	—	—	—	—
	25	gelb	20	blau	—	—	—	—	—	—
			25	gelb	—	—	—	—	—	—

[1]) Eingeklammerte Nennstromstufen möglichst vermeiden. D-Schmelzeinsätze mit erhöhter Verzögerung erhalten die Zusatzbezeichnung »träge« und entsprechende Kennzeichnung.

Tabelle 4.17 enthält Daten zu Leitungsschutzschaltern.

Tabelle 4.17: Leitungsschutzschalter

Typ	Polzahl	Ausführung	Nennstrom für alle Typen
Lsb I	1	ohne Nulleiter	6 A
Lsb I/0	1 + 0	mit Nulleiter durchgehend	10 A
Lsb I/h	1 + h	mit Hilfsschalter (Öffner bzw. Schließer)	16 A

4.2.3. Niederspannungsschaltgeräte

In Niederspannungsanlagen werden Leistungsschalter zum Schutz gegen Überströme und Kurzschlüsse eingesetzt. Als *Auslöser* dienen Kurzschlußschnellauslöser, Überstromauslöser, Arbeitsstromauslöser und Unterspannungsauslöser. Es sind verklinkte Luftschalter mit mechanischer Freiauslösung. Sie schützen Transformatoren, Generatoren, Kabel, Leitungen, Motoren und Anlagen (technische Daten s. Tabelle 4.18).

EBL-Schalter

Sie haben die Eigenschaft, durch Schnellabschaltung den Stromkreis bereits zu öffnen, bevor der Kurzschlußstrom seinen Höchstwert erreicht. Bei hohen Kurzschlußströmen wird dem entstehenden Lichtbogen sehr rasch eine hohe Brennspannung verliehen, wodurch eine strombegrenzende Wirkung hervor-

Tabelle 4.18: Technische Daten von NS-Leistungsschaltern

Schaltertyp	Nennstrom	Nenneinschaltvermögen (Scheitelwert) bei Nennspannung		Nennausschaltvermögen (Effektivwert) bei Nennspannung				Thermischer Grenzstrom (Effektivwert)	Ausschaltverzug	Antriebsart[1])
		500 V	660 V	500 V		660 V		1 s		
	A	kA	kA	kA	cos φ	kA	cos φ	kA	ms	
EBL	63	30		15	0,25	10	0,25			H
	160	52,5		25	0,25	20	0,25			H, F
	250	73,5	42	35	0,25	20	0,25			
	400	94,5	52,5	45	0,25	25	0,25			
	630	94,5	52,5	45	0,5	25	0,5			
	1000	220	100	100	0,2	50	0,2			
EL	250	30	24	15	0,4	12	0,3	12	16	H, F
	400	52,5	40	25	0,4	20	0,25	19	18	
	630	63	52,5	30	0,4	25	0,25	22	20	
	1000	73,5	52,5	35	0,25	25	0,25	18	25	
	2500	132	63	60	0,2	30	0,25	35	40	

[1]) H Handantrieb, F Fernantrieb

gerufen wird. Der Schalter wird dadurch von einem wesentlich geringeren Kurzschlußstrom durchflossen, als es bei den bisher üblichen Schaltern der Fall war.
Es ist dadurch möglich, Verbraucher mit kleineren Betriebsströmen unmittelbar an die Sammelschienen zentraler Energieverteilungen anzuschließen, weil auch Abzweig- und Verbraucherschalter kleiner Nennströme hohen Kurzschlußströmen ausgesetzt werden können. Das Mißverhältnis in der Bemessung der Schalter entweder nach dem Nennstrom oder nach dem Kurzschlußstrom wird weitgehend beseitigt, was sich wiederum sehr günstig auf die Dimensionen der Anlage auswirkt.

Tabelle 4.19: Einstellbereich der Auslöser

Typ	Wärme- (Einstellbereich-) Auslöser $I_{EU}\cdots I_{EO}$[1]) A	Schnellauslöser A
EBL 25	0,4···0,63	$10 \times I_{EO}$
	0,63···1	
	1···1,6	
	1,6···2,5	
	2,5···4	
	4···6,3	
	6,3···10	
	10···16	
	16···25	
EBL 63	16···25	
	25···40	
	40···63	
EBL 160	25···40	
	40···63	
	63···100	
	100···160	
EBL 1000	500···1000	1500···3000
		2000···4000
		3000···6000

[1]) I_{EU} unterer Einstellbereich, I_{EO} oberer Einstellbereich.

Bild 4.48 zeigt das Strombegrenzungsdiagramm des EBL 1000.

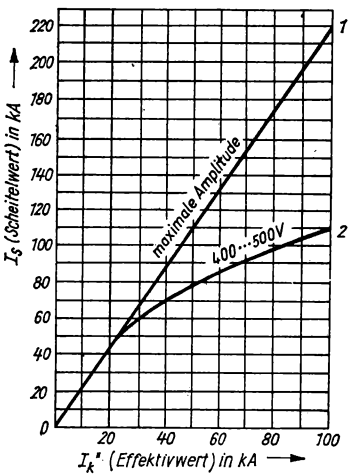


Bild 4.48. Strombegrenzungsdiagramm des EBL 1000
1 theoretisch möglicher, 2 wirklich auftretender Kurzschlußstrom I_k

Schütze

Ein Schütz ist ein elektromagnetisch betätigter, unverklinkter Fernschalter für Dauer- und Aussetzbetrieb. Die Schaltstrecke kann unter Öl (Ölschütz) oder in Luft (Luftschütz) liegen (technische Daten s. Tabelle 4.20).
Kombinationen von Schützen als Stern-Dreieck- oder Wendeschütz können gebildet werden.
Zum Zwecke des Überlastschutzes von Motoren können thermische Überstromrelais angebaut werden (s. Tabelle 4.21). Ihre Befestigung erfolgt mittels Anschlußlaschen an die Hauptkontakte der Luftschütze.

Tabelle 4.20: Technische Daten von Schützen

Kenngröße	Einheit	Typ ID 00	1	2	3	4	5	6	Typ ES 100	160	250	400	630[3])
Nennspannung	V		500 / 660[1])				660		500 / 660[2])				
Nennstrom	A	10	25	40	63	100	100	160	100	160	250	400	630
Einschaltvermögen[4])	A	80[5])	160	250	400	630	1000	1280	1200	1600	2500	4000	6300
Ausschaltvermögen[4])	A	80[5])	128	200	320	510	800	960	1000	1280	2000	3200	5000
Mechanische Lebensdauer Schaltsp. · 10^6		> 10	3				2		10				
Schaltstücklebensdauer bei Nennschaltvermögen Schaltsp. · 10^6		> 1	> 0,5				1						
Leistungsaufnahme der Magnetspulen Ws Anzug	VA		85	130	185	275	1000	1000	1200	1650	1850	3200	3800
Halten	VA		8,5	10	11	12,5	30	30	140	180	190	310	330
Gs Anzug	W		70	100	135	185	330	330	125	190	230	325	330
Halten	W		8	10	10	11	25	25	18	25	30	30	35
Nennstrom der Hilfsschalter	A		6[6])						25[7])				
Thermischer Grenzstrom (1-s-Strom)	A		260	300	580	1200			1000	2500	3500	5000	8000
Dynamischer Grenzstrom	A		1650	1850	2000	2000			2500	4000	5000	7000	11500
Maximale Kurzschlußsicherung NH-träge	A		35	50	100	125	225	300	je nach Einstellbereich des Überstromrelais ER 6				
Schaltverzug EIN	ms		20	30	35	40	25 bis		40	45	50	55	60
(Werte für Ws) AUS	ms		25	30	35	40	30		25	25	25	35	35

[1]) gilt für Typen K-ID und S-ID [2]) besondere Bestellung erforderlich [3]) in ISA 2000 nicht eingesetzt
[4]) bei 500 V cos φ = 0,35 [5]) bei 380 V cos φ = 0,65 [6]) bei 380 V [7]) bei 500 V

Tabelle 4.21: Einstellbereiche der thermischen Überstromrelais

Luftschütz Typ	Thermisches Überstromrelais Typ	Einstellbereich
ID 25	R 25	10 Einstellbereiche von 0,25···25 A
ID 40	R 40	5 Einstellbereiche von 4···10 A
ID 63	R 63	6 Einstellbereiche von 4···60 A

Lastschalter

Sie dienen als Leer- und Lastschalter zur Aus- und Umschaltung von Stromkreisen in Drehstromanlagen. Kurzschlußströme können nicht geschaltet werden.
Tabelle 4.22 enthält Daten von Lastschaltern.

Motorschutzschalter ist ein Schalter mit Wärmeauslösern und mit oder ohne Kurzschlußschnellauslöser (Magnetprinzip). Schalter ohne Schnellauslöser erhalten eine Vorsicherung (Daten s. Tabelle 4.23).

Tabelle 4.22: Technische Daten von Lastschaltern

Schaltertyp	Schalter-Nennstrom	Nenneinschaltvermögen	Nennausschaltvermögen	Grenzstrom dynamisch	Grenzstrom thermisch
	A	A	A	kA	kA
Nockenschalter	25	250[1])	200[1])	3,0	0,43
	63	630[1])	504[1])	3,0	1,5
FLTA	250	200 / 250[3])	200 / 250[3])	30	10
	400	400[2])	400[2])	42	16
	630	630[2])	630[2])	52	16
LTA	1000	1000	1000	130	50

[1]) bei cos φ = 0,35 und 726 V Ws
[2]) bei 500 V
[3]) bei cos φ = 0,7

Motorschutzschalter (mit Schnellauslöser und Bimetall) werden mit folgenden Einstellbereichen (Einstellwert ≙ Motorenstrom) gefertigt:

Motorenstrom	Motorenstrom	Motorenstrom
0,4···0,63 A	1,6···2,5 A	6,3···10,0 A
0,63···1,0 A	2,5···4,0 A	10,0···16,0 A
1,0···1,6 A	4,0···6,3 A	16,0···25,0 A

Wärmeauslöser ist ein Überlastschutz (Bimetallprinzip), der den Motor vor unzulässiger Erwärmung schützt. Auslösercharakteristik ist der Motorcharakteristik angepaßt.

Tabelle 4.23: Zuordnung von Stromsicherungen zu den Bimetallbereichen

Bimetall-einstellbereich	Vorsicherung	
	flink	träge
A	A	A
0,25···0,43	2	
0,4···0,6	2	
0,64···1,1	4	
1,0···1,7	6	
1,6···2,7		10
2,5···4,2		16
4,0···6,4		16
6,0···10		20
10···16		35
16···25		50
25···40		80
40···60		100

4.2.4. Hochspannungsschaltgeräte

Lasttrennschalter sind Schalter zum Ein- und Ausschalten von Betriebsströmen bis zum Schalternennstrom. Das Nennausschaltvermögen gilt für einen Leistungsfaktor cos $\varphi \geqq 0{,}7$. Lasttrennschalter bilden nach dem Ausschalten eine sichtbare Trennstrecke. Sie können keinen Kurzschlußstrom schalten. Grundtypen enthält Tabelle 4.24.

Grundausführung mit Federkraftspeicher und Schaltschloß. Wahlweise mit Arbeitsstromauslöser und vierpoligem Hilfsschalter, für Kurzschlußabschaltung angebaute HS-Patronen.

Leistungsschalter

Leistungsschalter dienen zum selbsttätigen und willkürlichen Ein- und Ausschalten beliebiger Ströme bis zu dem auf dem Leistungsschild angegebenen Schaltvermögen. Sie müssen den Nennausschaltstrom und jeden kleineren Ausschaltstrom bei einer wiederkehrenden Spannung gleich der Nennspannung bei einem Leistungsfaktor cos $\varphi \geqq 0{,}15$ beherrschen.
Typen und Kennwerte ölarmer Leistungsschalter enthält Tabelle 4.25.

Trenner

Trenner dienen zum annähernd stromlosen Schalten und müssen im ausgeschalteten Zustand eine sichtbare Trennstrecke bilden. Im geschlossenen Zustand müssen sie den Kraft- und Wärmewirkungen des größtmöglichen Kurzschlußstromes am Verwendungsort gewachsen sein. Trenner werden vorgesehen, um Leitungen, Sammelschienen, Maschinen, Transformatoren und Geräte von spannungführenden Teilen zu trennen. In Ausnahmefällen können kleinere Ströme geschaltet werden (Spannungswandler, kleine leerlaufende Trafos, leerlaufende Kabel). Daten von Trennern sind den Tabellen 4.26 und 4.27 zu entnehmen.

Hochspannungsverteiler (Isopontverteiler)

Der Hochspannungsverteiler zeichnet sich besonders durch seine raumsparende Bauweise aus. Durch seine vollständig isolierte Ausführung kann auf kleinstem Raum eine Hochspannungsverteilung bis zu 6 Schaltfeldern (z. B. Ringleitungsverteilung mit 4 Abgängen) aufgebaut oder eine Schaltanlage an die Stirnwand eines Transformators angebaut werden. In Verbindung mit Kompaktstationen können etwa 80% des umbauten Raumes eingespart werden. Durch den steigenden Energiebedarf wächst die Anzahl der Hochspannungsstationen ständig, da über Niederspannung eine wirtschaftliche Versorgung der Verbraucher nicht mehr gewährleistet ist. Mit Hilfe des Hochspannungsverteilers ist es möglich, Hochspannungsschaltanlagen in Räumen zu installieren, die ursprünglich nicht dafür vorgesehen waren. Das Hauptanwendungsgebiet liegt bei den Energieversorgungsbetrieben und Industrieanlagen in Netzen, in denen einpolig geschaltet werden kann.
Technische Daten enthält Tabelle 4.28. Bild 4.49 zeigt einen Hochspannungsverteiler Typ LHTCIG-12/400.

Tabelle 4.24: Grundtypen und Kennwerte (nach TGL 16801)

Typ			Schaltgeräte-nennspannung	Nennstrom	Nenneinschaltstrom	Nennstoßstrom	Nennkurzzeitstrom		Nennlastausschaltstrom
							1 s	3 s	
			kV	A	kA	kA	kA	kA	A
LHTCIG	12/400	HSS HSS/Ea HSS/Sa HSA/Sa	12	400	25 32[1])	40	25	16	400
	24/300	HSS HSS/Ea HSS/Sa HSA/Sa	24	300	25	25	20	10	300

[1]) Der höhere Nenneinschaltstrom gilt nur für besondere Betriebs- und Wartungsbedingungen, die vom Hersteller in der Betriebsanleitung anzugeben sind.

Tabelle 4.25: Typen und Kennwerte ölarmer Leistungsschalter (nach TGL 16800)

Typ		Antrieb[1])	Schaltgeräte-Nennspannung kV	Nennausschaltstrom ohne SW 3 kA	Nennausschaltstrom mit SW 3 kA	Nennstrom A	Nenneinschaltstrom kA	Kurzzeitstrom (3 s) kA
SCI4-	12/20/800[2])	-MAA	12	20	16	800	50	20
	12/25/800			25			63	25
	12/25/1250					1250		
	12/31,5/800			31,5	–	800	80	31,5
	12/31,5/1250					1250		
SCI3-	12/31,5/2500			31,5		2500		
SCI1-	24/8/630		24	8		630	20	8
	24/12,5/630			12,5			31,5	12,5
SCI4-	24/12,5/800[2])					800		
SCI1-	24/12,5/1250					1250		
SCI4-	24/20/800			20	16	800	50	20
	24/20/1250					1250		
SCI3-	36/20/800		36	20		800		
	36/20/1250					1250		

[1]) MAA Motorantrieb. Ein- und Ausschaltung mittelbar über Speicherantrieb
[2]) auch mit Handantrieb, Ein- und Ausschaltung mittelbar über Speicherantrieb (HAA)

Tabelle 4.26: Schaltvermögen mittels Trenner[1])

Anlagenteil	Abschaltbar mit Trenner einpolig	dreipolig
Freileitungsnetzteile:		
über 1···6 kV	10,0 km	15,0 km
über 6···20 kV	5,0 km	10,0 km
Kabel:		
über 1···6 kV	2,0 km	3,0 km
über 6···20 kV	0,5 km	0,75 km
Transformatoren:		
über 1···10 kV	160 kVA	200 kVA
über 10···20 kV	200 kVA	250 kVA

[1]) senkrecht montierte Trenner

Tabelle 4.27: Technische Daten von Trennern

Typ	Betriebsspannung kV	Schaltgeräte-Nennspannung kV	Nennstrom A	Nennkurzzeitstrom (1 s) kA	Nennstoßstrom kA
TCI 12/400	10	12	400	20	50
12/630			630	20	50
12/1250			1250	25	63
				50	125
12/2500			2500	50	125
12/4000			4000	50	125
TCI 24/400	20	24	400	20	50
24/630			630	20	50
24/1250			1250	25	63
				32	80

Tabelle 4.28: Technische Daten von Hochspannungsverteilern (nach TGL 27629)

Typ	Antrieb[1])	Nennspannung kV	Nennstrom A	Nenneinschaltstrom kA	Kurzzeitstrom (1 s) kA	Nennausschaltstrom A
LHTCIG-12/400	HSS	12	400	36	15	400
LHTCIG-24/400	HSA	24	400	25	10	300

[1]) HSS Hand-Sprung-Sprung-Antrieb, HSA Hand-Sprung-Speicher-Antrieb

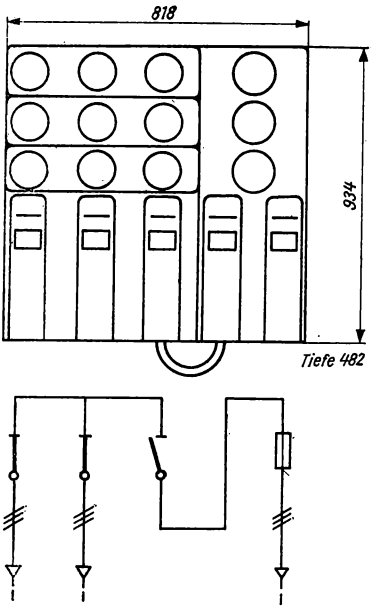


Bild 4.49. Hochspannungsverteiler, Typ LHTCIG-12/400, Abmessungen und Schaltung für 3 Schaltfelder und 1 Sicherungsfeld rechts

4.2.5. Einsatz der Geräte in elektrotechnischen Anlagen

Bei Einsatz der Geräte in elektrotechnischen Anlagen sind die Festlegungen der TGL 200-0611 einzuhalten.

Allgemeine technische Forderungen (nach TGL 200-0611/01)

Grundsätzliche Einsatzbedingungen

Geräte müssen den Standards der DDR entsprechen. Abweichungen sind nur auf gesetzlicher Grundlage zulässig.
Geräte dürfen nur zweckentsprechend eingesetzt werden. Dabei sind die in Standards, in Bedienungsanweisungen oder anderen Unterlagen enthaltenen *Einsatzbedingungen* einzuhalten, z. B.

Verwendungsbereich,
Klimaeignung, Temperaturbereich, Höhenlage,
Gebrauchsdauer, Betriebsart,
Einbau, Einbaulage, Rüttel- und Stoßfestigkeit,
anschließbare Leiterquerschnitte,
Transport, Inbetriebnahme.

Bei zugelassenen Änderungen sind die hierdurch bedingt veränderten Nenndaten, z. B. Leistungsminderungen, zu berücksichtigen.
Bei der Auswahl von Geräten ist zu beachten, daß in gebrauchsfertigem Zustand den *Bedingungen am Einsatzort* angepaßt sein müssen:

ihr Schutzgrad (nach TGL 15165/03),
ihre Schutzklasse (nach TGL 21366),
ihre Kriech- und Luftstrecken (nach TGL 16559 oder anderen Standards, in Verbindung mit den Festlegungen in TGL 200-0601/02),
ihr Grenzwert der Funkstörspannung für funkstörende Erzeugnisse (nach TGL 20885).

Wärmesicherheit

Die Geräte sind so einzusetzen, daß keine die Anlage und die Umgebung gefährdende Temperatur auftreten kann. Die Funktionssicherheit der Geräte und der Anlage muß gewahrt bleiben.

Der Wärmeaustausch muß ungehindert möglich sein. Die jeweils zulässige Grenztemperatur des Gerätes darf nicht überschritten werden.

Elektrotechnische Forderungen

Die Geräte dürfen nur mit der *Stromart, Spannung* und *Frequenz* betrieben werden, für die sie nach den Angaben auf dem Leistungsschild, in der Dokumentation oder in sonstigen Kennzeichnungen am Gerät bemessen sind.
Beim Einsatz von Geräten in Drei- und Vierleiternetzen ist *gleichmäßige Lastverteilung* anzustreben. Beeinflussungen auf elektrotechnische Anlagen (z. B. Informationsanlagen), die von Geräten ausgehen und einen für die Funktion unzulässigen Wert erreichen, sind durch geeignete Maßnahmen zu verhindern.
Es sind Geräte einzusetzen, die den durch den Kurzschlußstrom hervorgerufenen mechanischen und thermischen *Beanspruchungen am Einbauort* standhalten.
Bei Anwendung kurzschlußstrombegrenzender Einrichtungen genügt für die nachgeschalteten Geräte Bemessung für den Durchlaßstrom.

Bedienung und Wartung

Die Geräte sind so anzuordnen, daß sie *ungehindert und gefahrlos* bedient und gewartet werden können. Informationswerte an Kontrollgeräten, z. B. für Überwachung, Messung, Schutz, Kühlung, müssen vom üblichen Standort des Bedienenden oder vom Kontrollgang aus auch während des Betriebs ungehindert und gefahrlos erkennbar sein.

Technische Forderungen bei Nennspannungen bis 1000 V Ws und 1500 V Gs (nach TGL 200-0611/02)

Schalter

Schalter sind so auszuwählen, daß sie den Bedingungen am Einbauort z. B. hinsichtlich

Nennspannung,
Nennstrom,
thermischer und mechanischer Kurzschlußfestigkeit,
Nenneinschaltvermögen,
Nennausschaltvermögen,
Schalthäufigkeit,
mechanischer und Schaltstücklebensdauer

je nach dem Verwendungszweck genügen.

Installationsschalter zum Schalten von Entladungslampen, z. B. Leuchtstofflampen, Hochdrucklampen, müssen mindestens für einen Nennstrom von 10 A bemessen sein. Bei unkompensiertem Betrieb oder bei Anordnung der Kompensationseinrichtungen vor dem Schalter — in Energierichtung — dürfen diese Schalter nur mit 60% ihres Nennstroms belastet werden.
An *einpolige Wechselschalter*, Schaltung 6, und *Kreuzschalter*, Schaltung 7 nach TGL 0-49290 »Schalterbezeichnungen«, dürfen 2 Leiter mit unterschiedlicher Polarität nicht angeschlossen werden.
Für Einbaustellen mit Betriebstemperaturen über 60 °C müssen *Warmschalter* nach TGL 20457/02 »Kontaktgebende Niederspannungsgeräte, Schalter, technische Forderungen« verwendet werden.
Schalter sind so auszuwählen, daß sie *alle Leiter*, die unter Spannung gegen Erde stehen, *gleichzeitig schalten*. Das gilt nicht für Leerschalter nach TGL 20457/01.

Einpoliges Schalten ist zulässig

a) in Zweileiterstromkreisen mit Überstromschutzeinrichtungen bis 16 A und Nennspannungen bis 250 V,
b) in Beleuchtungsstromkreisen, die ausschließlich Fassungen E 40 enthalten und bis 25 A gesichert sind.

Der *neutrale Leiter* ohne Schutzfunktion darf nur zusammen mit den Außenleitern geschaltet werden. Für das Schalten des *Schutz- oder Nulleiters* gelten die Festlegungen in TGL 200-0602/03 »Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannungen infolge Isolationsfehler«.
Einpolige Schalter dürfen in Stromkreisen mit einem betriebsmäßig geerdeten Leiter bei fest verlegten Leitern nicht im geerdeten Leiter angeordnet werden.
Der Raum, der außerhalb der Schaltgeräte beim Abschalten von Kurzschlüssen isolationsmindernden Einflüssen unterliegt, ist frei zu halten.
Innerhalb jeder Anlage muß die Zuordnung zwischen der *Bewegungsrichtung der Betätigungsglieder* nach TGL 19482 oder der Anordnung der Befehlsgeräte nach TGL 13097 und der Richtung der ausgelösten Bewegungen oder Wirkungen einheitlich sein.

Steckverbinder

Stecker und Steckdose müssen so angebracht sein, daß die Stecker im nicht gesteckten Zustand nicht unter Spannung stehen.
Ausnahmen sind nach TGL 200-0632 und für Steckverbindungen zwischen Ladegerät und Batterie zulässig. Ausnahmen sind weiterhin bei mehrpoligen Steckverbindern für Steuerstromkreise in abgeschlossenen elektrotechnischen Betriebsräumen, z. B. im Innern von Schränken oder Pulten, zulässig.
Steckverbinder dürfen bei Nennspannungen bis 250 V (bei Drehstrom bis 380 V) auch zum *Aus- und Einschalten* dienen, wenn der Nennstrom des angeschlossenen Geräts bei Gleichstrom 10 A und bei Wechselstrom 16 A nicht überschreitet. Das gilt nicht für Vielfach- und andere Spezialsteckverbinder, die nach ihren Standards nur zum leistungslosen Verbinden und Trennen von Stromkreisen bestimmt sind.
Zur *Versorgung mehrerer Geräte* sind vorzugsweise *ortsfeste Mehrfachsteckdosen mit Schutzkontakt* zu verwenden.
Das Verwenden von Steckverbindern mit Fassungen oder mit Lampensockeln zum Einschrauben in Fassungen und von losen Abzweigsteckern, auch mit Berührungsschutz, ist unzulässig!
Stecker dürfen *nicht* in Steckdosen eingeführt werden können, die in der gleichen Anlage oder im gleichen Betrieb für höhere Spannungen oder andere Stromarten verwendet werden. Steckverbinder in Schutzkleinspannungs-Stromkreisen dürfen keine Schutzkontakte haben.

Überstromschutzeinrichtungen

Sind Überstromschutzeinrichtungen erforderlich, so sind sie in allen nicht betriebsmäßig geerdeten Außenleitern anzuordnen. Für ihre Anpassung an die Leiterquerschnitte (unter Berücksichtigung des Kurzschluß- und Überlastschutzes) sind folgende Standards zu beachten:

TGL 200-0613/02,
TGL 200-0612/02 in Verbindung mit TGL 200-1750/02.

Überstromschutzeinrichtungen in Schutzleitern sind unzulässig.
Bei dem *Bemessen von Überstromschutzeinrichtungen* sind etwaige Einschaltstromstöße zu berücksichtigen. Bei thermischen Auslösern ist auf den Einfluß der Umgebungstemperaturen am Einsatzort zu achten.
Offene Schmelzeinsätze sind unzulässig; Ausnahmen gelten für batteriegespeiste Flurfördergeräte.
Schmelzeinsätze dürfen nicht repariert, geflickt oder überbrückt werden!
In D-Sicherungssockeln bis 63 A nach TGL 4230 sind *Paßeinsätze* entsprechend den vorgesehenen Schmelzeinsätzen einzusetzen. Für Schmelzeinsätze und Schraubleitungsschutzschalter mit Nennströmen unter 10 A sind Paßeinsätze 10 A zulässig.
Die Verwendung von *Gerätesicherungen* (G-Sicherungen) nach TGL 6105 ist in Hilfsstromkreisen unter Beachtung der technischen Daten, insbesondere des geringen Nennabschaltvermögens, zulässig. In Hauptstromkreisen dürfen G-Schmelzeinsätze nach TGL 6111 in Schraubsockeln nach TGL 6113 bis TGL 6115 nur in Schalt- und Verteilungsanlagen verwendet werden, die von Fachleuten oder unterwiesenen Personen betrieben werden.
Bei *Sicherungssockeln mit Fußkontakt* und einseitiger Einspeisung muß die Zuleitung an den Fußkontakt oder an die Fußkontaktschiene angeschlossen werden.
Die *leitende Verbindung mehrerer Sicherungssockel* oder Leitungsschutzschalter muß für den höchsten zu erwartenden Betriebsstrom der angeschlossenen Stromkreise bemessen sein.
Vor *Leitungsschutzschaltern* ist eine Schmelzsicherung vorzuschalten. Sie kann entfallen, wenn die Kurzschlußströme am Einsatzort das Schaltvermögen der Leitungsschutzschalter nicht überschreiten.
NH-Sicherungssockel, bei denen der lichte Abstand zwischen den Schmelzeinsätzen weniger als 40 mm beträgt, sind durch *Trennwände* so abzuschotten, daß beim Einsetzen von Schmelzeinsätzen Leiter unterschiedlichen Potentials nicht überbrückt werden können.

Sonstige Geräte

Elektrowärmegeräte für den Haushalt sind nur in Anlagen mit Spannungen bis 250 V gegen Erde zulässig. Für elektromechanisch angetriebene Geräte gilt:

Zulässige Nennspannung bis 380 V oder
Spannung gegen Erde 250 V.

Das gilt grundsätzlich auch für *Elektrowerkzeuge*.
Für Elektrowerkzeuge unter besonderen Einsatzbedingungen, z. B. in Kesseln oder Rohrleitungen, sind bestimmte Schutzmaßnahmen einzuhalten (Einzelheiten s. TGL 200-0611/02, Abschn. 9).
Für den Anschluß von *Leuchten* an das Netz gilt TGL 20 805/02. Aufhängevorrichtungen für Leuchten, z. B. Deckenhaken, müssen die 5fache Masse der daran aufzuhängenden Last, jedoch mindestens 10 kg, ohne Formänderung tragen und gegen unbeabsichtigtes Lösen zuverlässig gesichert sein.

Technische Forderungen bei Nennspannungen über 1 kV Ws und über 1,5 kV Gs (nach TGL 200-0611/03)

Schaltgeräte

Schaltgeräte sind so auszuwählen, daß sie den Beanspruchungen am Einsatzort z. B. hinsichtlich

Nennspannung,
Nennstrom,
thermischer und mechanischer Kurzschlußfestigkeit,
Nenneinschaltstrom,
Nennausschaltstrom,
Schalthäufigkeit

je nach dem Verwendungszweck genügen.
Abweichend von diesen Festlegungen dürfen *Leistungs- und Lastschalter* mit geringerem Nennausschaltstrom eingebaut werden, wenn verhindert ist, daß sie einen höheren als ihren Nennausschaltstrom selbsttätig ausschalten.
Schütze bis 10 kV Wechselspannung sind zulässig, wenn sie den genannten Bedingungen genügen oder wenn ihnen Schaltgeräte oder Überstromschutzeinrichtungen zum Freischalten und Kurzschlußausschalten vorgeschaltet sind.
Schaltgeräte in Abzweigen vor Strombegrenzungs-Drosseln dürfen bei kurzen und sicheren Verbindungen zwischen Sammelschienen und Drosseln für die verminderte Kurzschlußbeanspruchung bemessen werden.
Schalter zum Schalten von Kondensatoren und einzeln kompensierten Betriebsmitteln müssen den besonderen Bedingungen genügen. Die Schaltgeschwindigkeit darf vom Bedienenden nicht beeinflußbar sein. Kondensatoren sind allpolig zu schalten.
Der Raum, der außerhalb der Schaltgeräte beim Abschalten von Kurzschlüssen isolationsmindernden Einflüssen unterliegt, ist frei zu halten.
Beim Schalten entstehende *Gase und Dämpfe* müssen ohne Gefährdung des Bedienungspersonals und der Anlage abziehen können.
Trenner und Erdungstrenner müssen mit ihren Antrieben so angeordnet werden, daß sie durch Druck oder Zug von Hand am Gestänge, durch Winddruck, Erschütterungen oder Eigenmasse nicht unbeabsichtigt öffnen oder schließen.
Innerhalb jeder Anlage muß die Zuordnung zwischen der *Bewegungsrichtung der Betätigungsglieder* nach TGL 19482 oder der Anordnung der Befehlsgeräte nach TGL 13097 und der Richtung der ausgelösten Bewegungen oder Wirkungen einheitlich sein.
Die *Schaltstellung* der Schaltgeräte muß am Bedienungsort und am Einbauort erkennbar sein.
Die elektrische *Steuerung von Trennern* ist zweipolig auszuführen.
Das *Betätigen von Kraftantrieben* von Geräten, die zum Freischalten oder Erden dienen, muß gesperrt werden können.

4.3. Rotierende elektrische Maschinen, Linearmotoren

4.3.1. Allgemeines über rotierende elektrische Maschinen

Eine *rotierende elektrische Maschine* ist ein Energiewandler, der umlaufende Bauteile enthält und bei dem die elektrische Energie entscheidend an der Energieumwandlung beteiligt ist.
Die grundlegenden Begriffe, technischen Forderungen, Prüfung, Kennzeichnung, Lieferung und Lagerung rotierender elektrischer Maschinen sind im Standard TGL 20 675/01···04 festgelegt.
Die Punkte 4.3.1.1.···4.3.1.17. treffen zu rotierenden elektrischen Maschinen Aussagen, die für alle Arten, Bauformen und Typen anwendbar sind.

4.3.1.1. Einteilung nach der Arbeitsweise

Motor: Maschine zur Umwandlung elektrischer in mechanische Energie.

Generator: Maschine zur Umwandlung mechanischer in elektrische Energie.

Umformer: Maschine oder Maschinensatz zur Umwandlung elektrischer Energie in elektrische Energie anderer Parameter (z. B. Spannung, Frequenz, Phasenzahl) oder zur Umwandlung mechanischer Energie in mechanische Energie anderer Parameter (z. B. Drehzahl, Moment) unter Verwendung eines elektrischen Zwischenkreises.

Blindleistungsmaschine (Phasenschieber): Maschine, die nur zur Abgabe oder Aufnahme von Blindleistung dient. Wirkleistung wird nur zur Deckung der Verluste aufgenommen.

4.3.1.2. Einteilung nach Maschinengattungen

Gleichstrommaschine

Die Gleichstrommaschine ist eine rotierende elektrische Maschine, die mit Gleichstrom oder Mischstrom betrieben wird (Motor) oder Gleichstrom abgibt (Generator).
Gleichstrommaschinen haben ausgeprägte Pole im Ständer und vorwiegend einen Trommelläufer, dessen Wicklung an einem Kommutator angeschlossen ist und über Bürsten mit den Anschlußklemmen in Verbindung steht.

Asynchronmaschinen

Asynchronmaschinen sind Wechselstrommaschinen, deren Drehzahlen von der zur Polzahl gehörenden synchronen Drehzahl durch Schlupf abweichen und die sich bei Belastung wenig ändern.

Die Asynchronmaschinen werden weiter unterschieden in

Asynchronmotor: Asynchronmaschine, deren Läuferdrehzahl sich von der Drehfelddrehzahl durch einen positiven Schlupf unterscheidet.

Asynchrongenerator: Asynchronmaschine, deren Läuferdrehzahl sich von der Drehfelddrehzahl durch einen negativen Schlupf unterscheidet.

Käfigläufermaschine: Asynchronmaschine mit einer oder mehreren unlösbar kurzgeschlossenen Läuferwicklungen.

Schleifringläufermaschine: Asynchronmaschine mit einer oder mehreren an Schleifringen angeschlossenen Läuferwicklungen.

Synchronmaschinen

Synchronmaschinen sind Ein- oder Mehrphasen-Wechselstrommaschinen, bei denen keine Relativdrehzahl zwischen der Drehzahl des Läufers und der des Drehfeldes auftritt, wenn die Maschine durch ein Gleichfeld erregt wird.

Sie unterscheiden sich in

Vollpolmaschine: Synchronmaschine mit Trommelläufer und praktisch gleichem magnetischem Widerstand in Längs- und Querachse.

Schenkelpolmaschine: Synchronmaschine mit ausgeprägten Magnetpolen und unterschiedlichem magnetischem Widerstand in Längs- und Querachse.

Außenpolmaschine: Synchronmaschine, bei der der Ständer das Polsystem enthält. Die elektrische Leistung wird dem Läufer zugeführt oder abgenommen.

Innenpolmaschine: Synchronmaschine, deren Läufer ein Polsystem enthält. Die Erregerleistung wird dem Läufer zugeführt.

Konstantspannungs-Synchrongenerator für Ein- und Mehrphasenwechselstrom: selbsterregter und kompoundierter Synchrongenerator, der bei Belastungsänderungen die Klemmenspannung innerhalb einer bestimmten Toleranz konstant hält. Die Kompoundierungseinrichtungen sind entweder in den Generator ein- bzw. an den Generator angebaut oder werden getrennt zur Aufstellung außerhalb des Generators mitgeliefert.

Drehstrom-Nebenschluß-Kommutatormotoren

Drehstrom-Nebenschluß-Kommutatormotoren sind Drehstrom-Mehrphasen-Induktionsmotoren, die entweder *läufer-* oder *ständergespeist* ausgeführt sein können.

Läufergespeiste: mit einer über Schleifringe gespeisten Primärwicklung und einer Kommutatorwicklung im Läufer, einer Sekundärwicklung im Ständer sowie zwei in Umfangrichtung verstellbaren Bürstenträgerringen, vorzugsweise zum Zwecke der Drehzahlverstellung, ausgerüstet.

Ständergespeiste: mit einer mit dem Netz verbundenen Wicklung und gegebenenfalls einer Zusatzwicklung im Ständer und einer Kommutatorwicklung im Läufer, die über Bürsten von einer Sekundärwicklung gespeist wird, ausgerüstet.

4.3.1.3. Grundsätzliches zum Betrieb

Der Betrieb rotierender elektrischer Maschinen ist durch eine Folge nach Art und Zeit unterschiedlicher Betriebszustände gekennzeichnet.

Betriebsbedingungen: Gesamtheit der äußeren Faktoren (z. B. Höhe des Aufstellungsorts, Umgebungstemperatur, Spannungsschwankungen), die den Betrieb einer Maschine unmittelbar beeinflussen.

Betriebszustand: Zustand einer elektrischen Maschine in einem gegebenen Augenblick, der durch die elektrischen, mechanischen und thermischen Größen gekennzeichnet ist, die ihren Betrieb unmittelbar beeinflussen.

Betriebsart: zeitliche Folge und Dauer der Betriebszustände, denen eine elektrische Maschine unterliegt.

Nennbetriebsart: Betriebsart, für die eine Maschine entsprechend den Nenndaten bestimmt ist. Nennbetriebsart kann eine der in 4.3.1.4. definierten 8 Betriebsarten sein, die nach thermischen Gesichtspunkten ausgewählt wurden. Sie enthält somit keine Aussage über mechanische Beanspruchungen, z. B. bei Schalt- und Anlaufvorgängen, denen eine Maschine unterliegt.

Nennbetrieb: Betrieb einer Maschine mit Nenndaten. Er enthält i. allg. eine Aussage über mehrere Betriebszustände, auch hinsichtlich ihrer Dauer und zeitlichen Folge.

Nenndaten: der Maschine zugeordnete Daten, die die notwendigen Bedingungen für ihr ordnungsgemäßes Funktionieren (bei Motoren z. B. Nennspannung, Nennfrequenz), ihre Leistungsfähigkeit (bei Motoren z. B. Nennleistung, Nennbetriebsart mit Nenneinschaltdauer) sowie charakteristische Richtwerte (bei Motoren z. B. Nennstrom, Nennleistungsfaktor) festlegen.

Belastung (Last):

Bei *Motoren* sind es die mechanischen Größen am Wellenende (Abtrieb), vorzugsweise das Drehmoment,

bei *Generatoren* und Blindleistungsmaschinen die elektrischen Größen an den Klemmen, vorzugsweise der Strom,

bei *Umformern* die Belastung des energieabgebenden Teils.
Vorsilben, z. B. Teil-, Voll-, Über-, kennzeichnen den Grad der Belastung relativ zur Nennbelastung.

Wirkungsgrad: Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Wirkleistung. Er kann direkt durch Messung von Leistungsaufnahme und -abgabe oder indirekt durch Ermittlung der Verluste der Maschine festgestellt werden.

4.3.1.4. Nennbetriebsarten

Eine Übersicht über die Nennbetriebsarten gibt Bild 4.50.

Betriebsart S 1 Dauerbetrieb

Betrieb mit konstanter Belastung von so langer Dauer, daß das thermische Gleichgewicht erreicht wird.

Betriebsart S 2 Kurzzeitbetrieb

Betrieb mit konstanter Belastung von so kurzer Dauer, daß das thermische Gleichgewicht nicht erreicht wird, gefolgt von einer Pause von so langer Dauer, daß die Maschine den kalten Zustand wieder erreicht.
Es ist zulässig, den Kurzzeitbetrieb mit einer Belastungszeit von 60 min als Stundenbetrieb zu bezeichnen.

Betriebsart S 3 Aussetzbetrieb ohne Einfluß des Anlaufs und der Bremsung auf die Temperatur

Periodischer Betrieb mit einer dauernden Folge gleicher Spiele. Jedes dieser Spiele umfaßt die folgenden Betriebszustände mit Einfluß auf die Temperatur der Maschine: Betrieb mit konstanter Belastung und Pause. Die Dauer dieser Betriebszustände ist so kurz, daß das thermische Gleichgewicht innerhalb eines Spiels nicht erreicht wird.

Betriebsart S 4 Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufs auf die Temperatur

Periodischer Betrieb mit einer dauernden Folge gleicher Spiele. Jedes dieser Spiele umfaßt die folgenden Betriebszustände mit

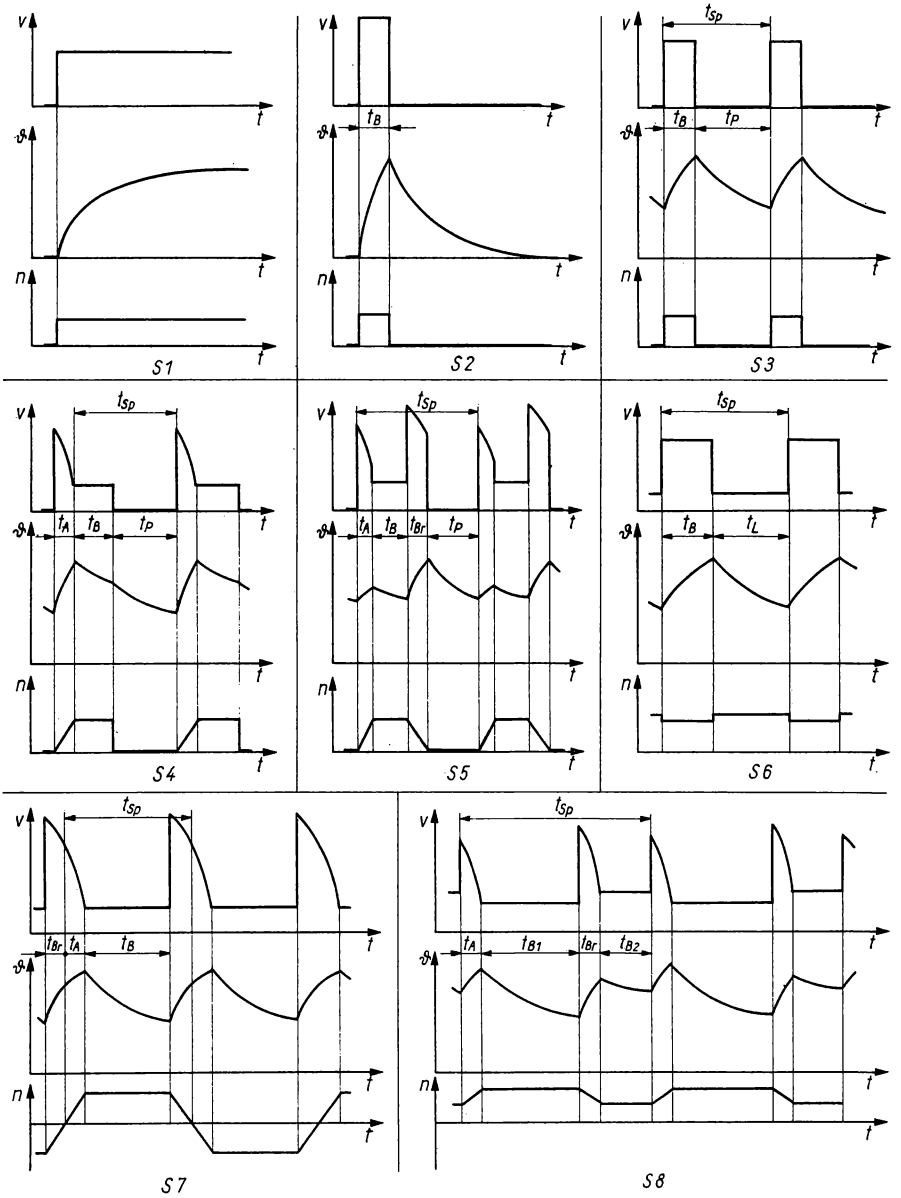


Bild 4.50. Nennbetriebsarten S 1 bis S 8
v Verluste, ϑ Übertemperatur, n Drehzahl, t Zeit, t_A Anlaufzeit, t_B Belastungszeit, t_{Sp} Spieldauer, t_{Br} Bremszeit, t_P Pausenzeit, t_L Leerlaufzeit

Einfluß auf die Temperatur der Maschine: Anlauf, Betrieb mit konstanter Belastung und Pause. Die Dauer dieser Betriebszustände ist so kurz, daß das thermische Gleichgewicht innerhalb eines Spiels nicht erreicht wird.

Betriebsart S 5 Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufs und der Bremsung auf die Temperatur

Periodischer Betrieb mit einer dauernden Folge gleicher Spiele. Jedes dieser Spiele umfaßt die folgenden Betriebszustände mit Einfluß auf die Temperatur der Maschine: Anlauf, Betrieb mit konstanter Belastung, elektrische Abbremsung und Pause. Die Dauer dieser Betriebszustände ist so kurz, daß das thermische Gleichgewicht innerhalb eines Spiels nicht erreicht wird.

Betriebsart S 6 Durchlaufbetrieb mit Aussetzbelastung

Periodischer Betrieb mit einer dauernden Folge gleicher Spiele. Jedes dieser Spiele umfaßt die folgenden Betriebszustände mit Einfluß auf die Temperatur der Maschine: Betrieb mit konstanter Belastung und Leerlauf. Die Dauer dieser Betriebszustände ist so kurz, daß das thermische Gleichgewicht innerhalb eines Spiels nicht erreicht wird.

Betriebsart S 7 Reversierbetrieb

Periodischer Betrieb mit einer dauernden Folge gleicher Spiele. Jedes dieser Spiele umfaßt die folgenden Betriebszustände mit Einfluß auf die Temperatur der Maschine: Anlauf, Betrieb mit konstanter Belastung und elektrische Abbremsung. Die Dauer dieser Betriebszustände ist so kurz, daß das thermische Gleichgewicht innerhalb eines Spiels nicht erreicht wird.
Während des folgenden, sich ohne Stillstandszeit anschließenden Spiels ist die Drehrichtung umgekehrt.

Betriebsart S 8 Durchlaufbetrieb mit veränderlicher Drehzahl

Periodischer Betrieb mit einer dauernden Folge gleicher Spiele. Jedes dieser Spiele umfaßt die folgenden Betriebszustände mit Einfluß auf die Temperatur der Maschine: Betrieb mit konstanter Belastung mit einer zugehörigen Drehzahl, Umschaltung, Betrieb mit konstanter Belastung bei der geänderten Drehzahl, Umschaltung. Die Dauer dieser Betriebszustände ist so kurz, daß das thermische Gleichgewicht innerhalb eines Spiels nicht erreicht wird.

Zusätzliche Begriffe zu den Betriebsarten

Spiel: Bei periodischem Betrieb die Gesamtheit der während einer Periode auftretenden Betriebszustände. Die Dauer der Periode wird als Spieldauer bezeichnet.

Relative Einschaltdauer t_E*:* Bei periodischem Betrieb das Verhältnis der Belastungszeit zur Spieldauer.

Leerschalthäufigkeit: Bei Asynchronmotoren die Anzahl der Schaltungen je Stunde, die in der mit Nennspannung und Nennfrequenz gespeisten, unbelasteten Maschine bei periodischem Reversieren mittels Gegenstrombremsung die gleiche Erwärmung wie bei Nennbetrieb hervorruft.

Schaltbetrieb: Betrieb einer Maschine, bei der ihre Erwärmung wesentlich durch Anlauf- und Bremsvorgänge beeinflußt wird.
Der Schaltbetrieb umfaßt insbesondere die Betriebsarten S 4, S 5, S 7 und S 8.

4.3.1.5. Kühlungsarten

Die Unterscheidung erfolgt:

1. nach der Art der Kühlmittelbewegung

Selbstkühlung: Die Maschine besitzt keine speziellen Einrichtungen zur Erhöhung der Geschwindigkeit des Kühlmittels.

Eigenkühlung: Die Bewegungsgeschwindigkeit des Kühlmittels wird durch eine in der Maschine vorhandene Vorrichtung (Lüfter unmittelbar mit dem Läufer verbunden) erhöht.

Fremdkühlung: Die Bewegung des Kühlmittels erfolgt durch eine von der Maschine unabhängige Vorrichtung (z. B. gesonderter Lüfter).

2. nach der Art der Kühlmittelführung

Durchzugskühlung: Kühlmittel tritt einseitig in die Maschine ein und durchströmt sie.

Beiderseitige Kühlung: Kühlmittel tritt auf beiden Seiten in die Maschine ein und in der Mitte aus oder umgekehrt.

Oberflächenkühlung: Kühlmittel wird entlang der äußeren Oberfläche der Maschine geführt.

Man unterscheidet dabei weiterhin: Natürliche Oberflächenkühlung, wenn die Wärme durch Konvektion oder Strahlung abgegeben wird, und Oberflächenbelüftung, wenn ein Außenlüfter Luft über die Maschinenoberfläche bläst.

Direkte Kühlung (der Leiter): Das Kühlmittel kommt mit einem wesentlichen Teil der Leiteroberfläche außerhalb oder innerhalb des Leiters in Berührung.

Indirekte Kühlung (der Leiter): Das Kühlmittel strömt außerhalb der Isolation an der zu kühlenden Wicklung vorbei.

3. nach der Kühlmittelrückführung

Frischluft-(Frischwasser-)Kühlung: Das Kühlmittel wird ständig erneuert.

Kreislaufkühlung: Das Kühlmittel durchströmt Maschine und Wärmeaustauscher im Kreislauf.

4. nach dem Kühlmittel

Gaskühlung: Dazu rechnen Luftkühlung, Wasserstoffkühlung, Stickstoffkühlung.

Flüssigkeitskühlung: Dazu gehören Wasserkühlung, Ölkühlung.

Bei *Luftkühlung* werden nach TGL 20675 weitere spezielle Kühlsysteme unterschieden, die dann mit dem Buchstaben C und einer Zahl zwischen 1 und 8 unterteilt sind.

4.3.1.6. Kennzeichen und Angaben auf dem Leistungsschild

Jede elektrische Maschine muß mit den entsprechenden technischen Daten dauerhaft gekennzeichnet sein.

Leistungsschilder werden bevorzugt am Ständergehäuse angebracht, in Ausnahmefällen am Lagerschild, an der Lüfterhaube oder am Klemmenkasten. Außer bei Maschinen im Leistungsbereich von 1,6···500 W, bei denen nur Hersteller, Kennummer, Nennspannung mit Stromart, Nennfrequenz oder Nenndrehzahl, Kondensatorkapazität und -betriebsspannung sowie Maschinennummer und Baujahr angegeben sein müssen, enthält das Leistungsschild bei allen übrigen Maschinen die in Tabelle 4.29 aufgeführten Mindestangaben.

Tabelle 4.29: Mindestangaben auf dem Leistungsschild

Leistungsschild-angaben	Erläuterung	Kennzeichnung
Hersteller		
Maschinen-bezeichnung	Typkurzzeichen, Listen- oder Kennummer	Typ
Maschinen-nummer und Baujahr oder Monat und Baujahr	betriebseigene Bezeichnung	
Stromart	Gleichstrom	—
	Einphasenstrom	1
	Zweiphasenstrom	2
	Dreiphasenstrom (Drehstrom)	3
	Sechsphasenstrom	6
	Allstrom	—
	Mischstrom	
Arbeitsweise	Motor	Mot
	Generator	Gen
	Umformer	U (bei 2 Leistungsschildern Mot und Gen)
	Blindleistungsmaschine	Bl M

Tabelle 4.29 (Fortsetzung)

Leistungsschild-angaben	Erläuterung	Kennzeichnung
Schaltart der Wicklung	Kennzeichnung für Wechselstromsysteme	nach TGL 16006
Nennspannung	Auf dem Leistungsschild dürfen dann mehrere Spannungen (z. B. 220/380 V) angegeben werden, wenn die Maschine mit diesen betrieben werden darf. Die Schaltung (z. B. Sternschaltung) ist anzugeben.	V
Nennstrom	Bei Motoren und Induktionsgeneratoren sind die Angaben als angenähert zu betrachten, bei Allstrommotoren Angabe des zum Nenndrehmoment gehörenden maximalen Stromes.	A
Nennleistung	Bei Motoren, Gleichstrom- und Induktionsgeneratoren ist die abgegebene Leistung angegeben.	W, kW, MW
	Bei Wechselstromgeneratoren, Synchron- und Blindleistungsmaschinen ist die Scheinleistung angegeben.	VA, kVA, MVA
Nennfrequenz	Bei frequenzveränderlichen Maschinen sind höchste und niedrigste Frequenz angegeben.	.../... Hz
Nennkapazität/Kondensatornennspannung	für Einphasenmotoren mit Anlauf- und Betriebskondensator	...µF/... V
Nennleistungsfaktor	bei Synchronmaschinen bezogen auf Nennleistung und Nennerregung;	cos φ
	bei Maschinen, die Blindleistung aufnehmen sollen.	cos φ ... u
Drehzahl	Bei Maschinen mit 2 oder mehreren Nenndrehzahlen sind alle Nenndrehzahlen angegeben. Bei drehzahleinstellbaren Maschinen sind die niedrigste und die höchste Nenndrehzahl angegeben.	Umdr./min
Drehsinn (Blickrichtung Wellenende Antriebsseite)	Sind beide Drehrichtungen möglich, entfällt Kennzeichnung. Bei Maschinen, die nur für eine Drehrichtung geeignet sind, ist der Drehzahlangabe bei Rechtslauf ein Pfeil mit Spitze nach rechts und bei Linkslauf mit Spitze nach links beigefügt.	nur $\overrightarrow{UVW}$ nur $\overleftarrow{UVW}$
Nennbetriebsart	Bei Dauerbetrieb (S 1) entfällt Kennzeichnung, bei allen übrigen	S ...
Wärmebeständigkeitsklasse	Wärmebeständigkeitsklassen nach TGL RGW 782	W-Kl ...
Nennerregerstrom	Die Angaben für den Erregerstrom bei Nennbetrieb gelten als angenähert, nur zur Bemessung der Zuleitung. Es werden nur Nennströme über 10 A angegeben.	Err...A
Nennerregerspannung		Err...V
Schaltungsart der Läuferwicklung	Angabe bei Asynchronmaschinen, außer Käfigläufermotoren	betreffendes Schaltzeichen
Masse	Es wird die Masse mit einer zulässigen Überschreitung von 10% angegeben. Bei Großmaschinen werden Teilmasseangaben für Läufer und Ständer angegeben.	kg, t
Gütezeichen	nach TGL 3933	betreffendes Kurzzeichen
Schutzgrad	Haben einzelne Teile einen niedrigeren Schutzgrad als das Hauptteil, so ist das Schutzgradzeichen für die abweichenden Teile zusätzlich angegeben, z. B. IP 56-Klemmen IP 44.	IP ...

4.3.1.7. Anschlußbezeichnungen

Die Klemmenanschlüsse sind einheitlich durch Buchstaben, ggf. mit Beibuchstaben, Beiziffern und/oder Symbolen, zu bezeichnen (Tabelle 4.30).
Die Anschlüsse gleichartiger Wicklungen müssen durch kleine Buchstaben (Indizes) a···c unterschieden werden, z. B.

$u_a - x_a$, $u_b - x_b$, $A_a - B_a$, $A_b - B_b$.

Anzapfungen und unterbrochene Ausführungen erhalten dieselben Buchstaben als Anschlußbezeichnungen wie das entsprechende Wicklungsende. Dieses wird mit der Beiziffer 1, die Anzapfungen und unterbrochenen Ausführungen werden mit fortlaufenden Beiziffern 2, 3 usw. versehen.

Allstrommotoren

Die Bezeichnung der Anschlüsse für Gleich- und Wechselstrom erfolgt wie für Gleichstrommaschinen. Zur Kennzeichnung der Ankerseite sind kleine Beibuchstaben a und b unmittelbar hinter den großen Kennbuchstaben zu setzen.
Bei symmetrischer Ausführung der Feldwicklung ist zur Kennzeichnung der Ankerseite A bzw. B hinter den Kennbuchstaben ein großer Beibuchstabe zu setzen.
Mit dem Symbol »—« unter dem großen Buchstaben sind Anschlüsse, die nur zum Anschluß an Gleichstrom dienen, zusätzlich zu kennzeichnen.
Mit dem Symbol »~« unter dem großen Buchstaben sind Anschlüsse, die nur zum Anschluß an Wechselstrom dienen, zusätzlich zu kennzeichnen.

Sondermaschinen

Bei Sondermaschinen ist eine sinngemäße Anschlußbezeichnung anzuwenden. Zum Beispiel sind für rotierende Umformer die Bezeichnungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen sinngemäß anzuwenden.

Tabelle 4.30: Anschlußbezeichnungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen

1. Gleichstrommaschinen

Anschluß an			Bezeichnung
Anker			A–B
Nebenschlußwicklung für Selbsterregung			C–D
Reihenschlußwicklung für Erregung durch eigenen Ankerstrom			E–F
Wendepol- oder Kompensationswicklung und Wendepol- mit Kompensationswicklung, nicht getrennt			G–H
getrennte Wendepol- und Kompensationswicklung	Wendepolwicklung Kompensationswicklung		GW–HW GK–HK
auf beide Seiten des Ankers verteilte gleiche Wicklungsstelle, z. B. zum Zwecke der Symmetrierung für Funkenstörung	Reihenschlußwicklungen bei Motorrechtslauf	Seite der Ankerklemme A Seite der Ankerklemme B	EA–FA EB–FB
	Wendepolwicklungen	Seite der Ankerklemme A Seite der Ankerklemme B	GA–HA GB–HB
fremderregte Feldwicklungen	allgemein bei Bemessung für die eigene Ankerspannung, zulässig		I–K C–D

2. Wechselstrommaschinen

Anschluß an			Primär	Sekundär
Drehstrom	verkettet unverkettet		U, V, W U–X, V–Y, W–Z	u, v, w u–x, v–y, w–z
Zweileiterwechselstrom	verkettet, Knotenpunkt XY bzw. xy unverkettet		U, XY, V U–X, V–Y	u, xy, v u–x, v–y
Einleiterwechselstrom	allgemein mit Hilfswicklung	 Hauptwicklung Hilfswicklung	U–V U–V W–Z	– – –
Mehrleiterstrom, allgemein	Mittelpunkt bzw. Sternpunkt		N	n
Gleichstromerregerwicklung		Fremderregung Selbsterregung		I–K C–D

4.3.1.8. Aufbau von elektrischen Maschinen

Im Bild 4.51 ist der Aufbau einer Gleichstrommaschine, im Bild 4.52 der einer Drehstrommaschine dargestellt.

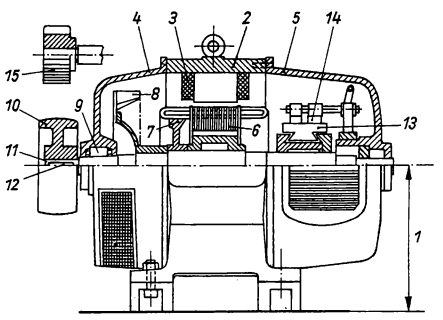


Bild 4.51. Gleichstrommaschine
1 Nennhöhe (TGL 8393), 2 Ständer, 3 Erregerwicklung, 4 Lagerschild A-Seite, 5 Lagerschild B-Seite, 6 Dynamobleche, Anker (TGL 10475), 7 Ausgleichsmassen, 8 Lüfter, 9 Wälzlager, 10 Riemenscheibe, 11 Wellenende, zylindrisch (TGL 10543), 12 Paßfeder (TGL 9500), 13 Kommutator, 14 Bürsten, 15 Zahnrad

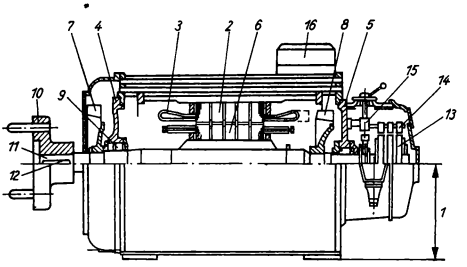


Bild 4.52. Drehstrommaschine Schutzart P 33 mit Bürstenabhebe- und Kurzschließeinrichtung
1 Nennhöhe (TGL 8393), 2 Dynamobleche, Ständerblechpaket (TGL 10475), 3 Ständerwicklung, 4 Lagerschild A-Seite, 5 Lagerschild B-Seite, 6 Dynamobleche, Läufer (TGL 10475), 7 Außenlüfter, 8 Innenlüfter, 9 Wälzlager, 10 Kupplung (TGL 21611), 11 Wellenende, zylindrisch (TGL 10543), 12 Paßfeder (TGL 9500), 13 Schleifringe, 14 Bürsten, 15 Bürstenabhebe- und Kurzschließeinrichtung, 16 Klemmen

4.3.1.9. Bauformen

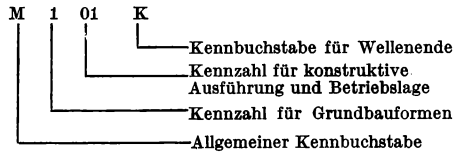
Bauformen für elektrische Maschinen sind in TGL RGW 246-76 festgelegt.

Aufbau des Kurzzeichens

Das Kurzzeichen der Bauformen setzt sich zusammen aus einem Kennbuchstaben (M), einer Kennzahl für die Grundbau-

form (1. Ziffer), einer Kennzahl für konstruktive Ausführung der Grundbauform (2. Ziffer), einer Kennzahl für die Betriebslage oder weitere konstruktive Ausführungsarten (3. Ziffer) und einem Kennbuchstaben für die Ausführung der Wellenenden (Tabelle 4.31).

Bauformen-Kurzzeichen für einen Motor mit zwei Lagerschilden und Füßen mit einem kegeligen Wellenende:



Bauformen, die nicht in diesem Standard enthalten sind, sind in vollem Wortlaut als Sonderbauform anzugeben.

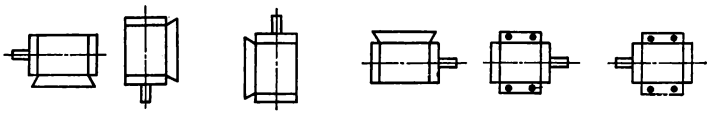
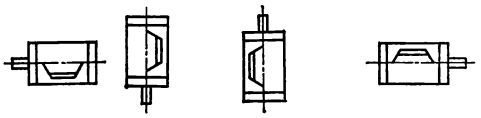
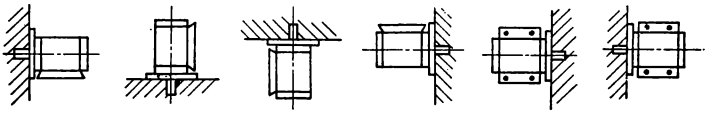
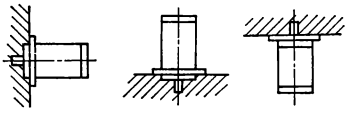
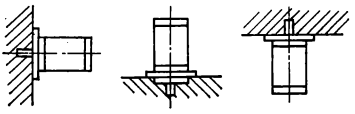
Die Kennzahlen für die Grundbauformen (1. Ziffer) bezeichnen:

1 Maschinen auf Füßen mit zwei (oder einem) Lagerschilden und Maschinen mit eingebautem Getriebe sowie Tatzlagermotoren,
2 Maschinen auf Füßen mit Flansch am Lagerschild,
3 Maschinen ohne Füße mit Flansch am Lagerschild,
4 Maschinen ohne Füße mit Flansch am Gehäuse,
5 Maschinen zum Einbau und Anbau,
6 Maschinen mit Lagerschild und Stehlager,
7 Maschinen ohne Lagerschild mit Stehlager,
8 Große Maschinen (z. B. vertikale Hydrogeneratoren),
9 Maschinensätze.

Tabelle 4.31: Kennbuchstabe für die Ausführung der Wellenenden

Form der Wellenenden	Anzahl der Wellenenden		
	ein	zwei	kein
zylindrisch	ohne Bezeichnung	ZZ	N
kegelig	K	KK	N
mit Flansch	F	FF	N
mit Flansch und kegelig	–	FK	N
zylindrisch und mit Flansch	–	ZF	N
zylindrisch und kegelig	–	ZK	N

Tabelle 4.32: Beispiele für Bauformen

Maschinen mit Füßen und zwei Lagerschilden	Maschinen arbeiten in allen Lagen						
Kurzzeichen	M 100	M 101	M 102	M 103	M 104	M 105	M 106
bisheriges Kurzzeichen	–	B 3	V 5	V 6	B 8	B 7	B 6
Maschinen mit Füßen in Wellennähe und zwei Lagerschilden	–						
Kurzzeichen	–	M 111	M 112	M 113	M 114	–	–
bisheriges Kurzzeichen	–	B 20	–	–	–	–	–
Maschinen mit Füßen mit einem normalen Lagerschild und einem großen Flansch am Lagerschild	Maschinen arbeiten in allen Lagen						
Kurzzeichen	M 200	M 201	M 202	M 203	M 204	M 205	M 206
bisheriges Kurzzeichen	–	B 3/B 5	V 1/V 5	V 3/V 6	–	–	–
großer Flansch Antriebsseite, Zentrierung Antriebsseite	Maschinen arbeiten in allen Lagen						
Kurzzeichen	M 300	M 301	M 302	M 303	–	–	–
bisheriges Kurzzeichen	–	B 5	V 1	V 3	–	–	–
Flansch Antriebsseite, Zentrierung Antriebsseite	–						
Kurzzeichen	–	M 401	M 402	M 403	–	–	–
bisheriges Kurzzeichen	–	B 10	V 10	V 14	–	–	–

4.3.1.10. Schutzgrade

Die Schutzgrade für Berührungs-, Fremdkörper- und Wasserschutz sind in TGL 15165/03 festgelegt. Sie sind in den Tabellen 4.33···4.35 zusammengestellt.
Der Aufbau des Kurzzeichens ist:

Kennbuchstaben IP für Schutzgrade,

1. Kennziffer 0···6 für Schutzart Berührungs- und Fremdkörperschutz,

2. Kennziffer 0···8 für Schutzart Wasserschutz,

Zusatzbuchstabe C für Tropfwasserprüfung von Erzeugnissen in Schiffsausführung beim Wasserschutzgrad 2,
Zusatzbuchstabe R für Schutzgehäuse mit Rohranschluß, z. B. für Fremdbelüftung.
Zusatzbuchstabe W für Überflutungsschutzprüfung mit Angabe der Eintauchtiefe, z. B. W 5 für Eintauchtiefe 5 m.
Wird für ein Erzeugnis eine der beiden Schutzarten — Berührungs- und Fremdkörperschutz sowie Wasserschutz — nicht gefordert oder nicht vorgesehen und diese Schutzart auch nicht geprüft, so ist an ihrer Stelle in der Bezeichnung der Buchstabe X zu setzen, z. B. IP X 5 für ein strahlwassergeschütztes Gerät, für das keine Prüfung des Fremdkörperschutzes erfolgt.

Tabelle 4.33: Schutzgrade

Kennbuchstabe	Erste Kennziffer Berührungs- und Fremdkörperschutz	Zweite Kennziffer Wasserschutz								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
IP	0	IP 00	IP 01	—	—	—	—	—	—	—
	1	IP 10	IP 11	IP 12	IP 13	—	—	—	—	—
	2	IP 20	IP 21	IP 22	IP 23	—	—		—	—
	3	IP 30	IP 31	IP 32	IP 33	IP 34	—	—	—	—
	4	IP 40	IP 41	IP 42	IP 43	IP 44	—	—	—	—
	5	IP 50	—	—	—	IP 54	IP 55	IP 56	—	—
	6	IP 60	—	—	—	—	IP 65	IP 66	IP 67	IP 68

Tabelle 4.34: Berührungs- und Fremdkörperschutz

Erste Kennziffer	Art des Schutzes	
	Berührungsschutz	Fremdkörperschutz
0	kein Schutz gegen Berührung	kein Schutz gegen Fremdkörper
1	Schutz gegen unbeabsichtigte, großflächige Berührung mit der Hand kein Schutz gegen Berührung, die absichtlich erfolgt	Schutz gegen das Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser ≧ 52,5 mm
	Schutz gegen Berührung mit den Fingern	Schutz gegen das Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser ≧ 12,5 mm
3	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen und das Eindringen von Fremdkörpern mit einem Durchmesser ≧ 2,5 mm	
4	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen und das Eindringen von Fremdkörpern mit einem Durchmesser ≧ 1,0 mm	
5	vollständiger Schutz gegen Berührung	Schutz gegen schädliche Staubablagerung im Inneren
6		Schutz gegen das Eindringen von Staub

Tabelle 4.35: Wasserschutz[1])

Zweite Kennziffer	Art des Schutzes
0	kein Schutz gegen Wasser
1	Schutz gegen schädliche Wirkung senkrecht fallender Wassertropfen bei waagerechter Gebrauchslage des Prüflings
2 2 C	Schutz gegen schädliche Wirkung senkrecht fallender Wassertropfen auch bei Neigung des Prüflings um 15° (22,5° bei 2 C) in 2 zueinander senkrechten Ebenen aus der waagerechten Gebrauchslage
3	Schutz gegen schädliche Wirkung von Wasser, das als Regen in einem Winkel bis zu 60° in bezug auf die Senkrechte fällt
4	Schutz gegen schädliche Wirkung von Spritzwasser aus beliebiger Richtung
5	Schutz gegen schädliche Wirkung von Strahlwasser aus beliebiger Richtung
6	Schutz gegen das Eindringen von Strahlwasser aus beliebiger Richtung unter verschärften Bedingungen

Anwendung der Schutzgradangaben

Schutzgradangaben beziehen sich auf die festgelegte oder übliche Montage des Erzeugnisses.
Durch andere Aufstellung oder anderen Einbau kann sich der Schutzgrad verändern.
Weicht der Schutzgrad im Lieferzustand vom Schutzgrad nach der Montage des Erzeugnisses ab, so ist der Schutzgrad im Lieferzustand zwischen Hersteller und Verbraucher zu vereinbaren.
Der Berührungs-, Fremdkörper- und Wasserschutz bezieht sich auf den Schutz von inneren sich bewegenden oder spannungführenden Teilen.
Weicht der Schutzgrad eines Teiles des Erzeugnisses, z. B. der Anschlußklemmen, von dem des Hauptteils ab, so sind das abweichende Teil und sein Schutzgradkurzzeichen zusätzlich anzugeben, z. B.

IP 23 — Klemmen IP 55.

Der Schutzgrad für ein Erzeugnis ist auf dem Erzeugnis oder seinem Typenschild anzugeben.

[1]) Die Einwirkung von Wasser gilt als schädlich, wenn a) eine Störung der Funktion des Prüflings erwartet werden kann, b) Wasser in Leitungsumhüllungen eindringt.

4.3.1.11. Nennspannungen und Nennleistungen

In den Tabellen 4.36 und 4.37 sind Angaben über Nennspannungen und Nennleistungen von elektrischen Maschinen enthalten.

Tabelle 4.36: Nennspannungen (kursive Zahlen sind Vorzugsspannungen)

Gleichstrom			Einphasen- und Drehstrom 50Hz			Einphasenstrom $16^2/_3$ Hz	
Generatoren	Motoren	Bahngeneratoren	Generatoren		Motoren	Generatoren	Motoren
Nennspannungen in V							
30[1]	*24*				*24*		
65[1]	40				*42*		
115	110		130	127[2]	125		
140[1]							
230	*220*	250	230	225[2]	*220*		220
460	440		400	390[2]	*380*		
630	*600*	660	525	512[2]	500		
	750	825		695	*660*		
	1200	1320					
	1500	1650					
	3000	3300	3150		3000		
			6300		*6000*	6600	
			10500		*10000*		
			15750		15000	16500	

[1]) für achsangetriebene Generatoren
[2]) für Generatoren für besonderen Verwendungszweck, z. B. Notstrom

Tabelle 4.37: Nennleistungen (in kW bzw. kVA)

0,001	0,0016	0,0025	0,004	0,006	0,010	0,016	0,025	0,040	0,060	0,090
0,120	0,180	0,250	0,370	0,550	0,750	1,1	1,5	2,2	3	4,
5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45	55	75
90	110	132	160	200	250	320	400	500	630	800
1000	1250	1500	1800	2100	2500	3000	3500	4200	5000	

4.3.1.12. Achshöhen, Wellenenden und andere konstruktive Angaben

Die Achshöhen sind in TGL 8393 festgelegt (Bild 4.53 und Tabellen 4.38 und 4.39).

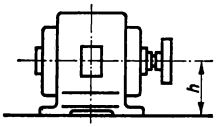


Bild 4.53. Achshöhe

Tabelle 4.38: Achshöhen (in mm)

25	40	63	100	160	250	400	630	1000
26	42	67	106	170	265	425	670	—
28	45	71	112	180	280	450	710	—
30	48	75	118	190	300	475	750	—
32	50	80	125	200	315	500	800	—
34	53	85	132	212	335	530	850	—
36	56	90	140	225	355	560	900	—
38	60	95	150	236	375	600	950	—

Tabelle 4.39: Zulässige Abweichungen (in mm)[1])

Achshöhen h mm	Zulässige Abweichungen für elektrische Maschinen, getriebene Maschinen, Getriebe, Schiffswellenantriebe	Zulässige Abweichungen für treibende nichtelektrische Maschinen
von 25···50	−0,4	+0,4
über 50···250	−0,5	+0,5
über 250···600	−1,0	+1,0
über 600···1000	−1,5	+1,5
über 1000	−2,0	+2,0

[1]) Die zulässigen Abweichungen gelten nicht für Maschinen, bei denen die Achshöhe kleiner ist als die Hälfte des Gehäusedurchmessers.

Bild 4.54 zeigt Wellenenden, Bild 4.55 Paßfedern und Keile.

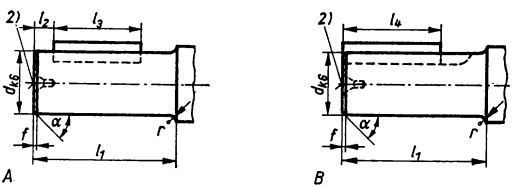


Bild 4.54. Wellenenden (Profil A und Profil B)

Wellenenden (nach TGL 10543)

Angaben über Wellenenden sind Bild 4.54 und Tabelle 4.40 zu entnehmen. Dazugehörige Paßfedern nach TGL 9500 und Keile nach TGL 18076 sind im Bild 4.55 dargestellt; in Tabelle 4.41 sind Daten davon zusammengestellt.

Tabelle 4.40: Wellenenden (nach TGL 10543) (Maße in mm)

Durchmesser	Länge	r^1)	f	$\alpha°$	Zulässiges Nenndrehmoment[5]) bei Dauerbetrieb N · m		l_2	Anwendung (Schnitt A–A)	
d^2)	l_1				M_{t1}[3])	M_{t2}[4])		l_3	l_4
7	16	0,6	0,6	45	0,25	–	3	10	–
9	20				0,62	–		14	–
11	23				1,23	–		16	12
14	30				2,84	–	5	16	16
16	40				4,51	–		25	25
18					7,06	–			
22	50				13,73	–		32	32
24					17,65	–			
28	60				31,38	–		40	40
32	80	1	1		50,01	–		56	56
38					90,22	–			
42	110				127,49	–	10	80	80
48					196,13	–			
55		1,6	1,6	30	353,04	–			
60	140				451,1	–		110	110
70					784,5	1667			
80	170				1245	2667		140	140
90		2,5			1912	4040			
100	210				–	5883		180	–
110					–	8325			
120					–	11227			
130	250	4	2,5		–	14709		220	–
140					–	19123			
160	300				–	30891		280	–
180					–	46581			
200	350	6	4		–	65704		315	–
220					–	93163			

[1]) Freistich nach TGL 0-509 zulässig
[2]) Zentrierbohrung nach Standard des Fachbereiches 231, Elektrische Maschinen (bis d = 32 mm auch ohne Gewinde zulässig)
[3]) M_{t1} Drehmoment mit überlagerter Biegespannung, z. B. durch Riemenzug
[4]) M_{t2} Drehmoment mit vernachlässigbarer Biegespannung, z. B. durch Kupplungsmasse
[5]) Nenndrehmoment, bezogen auf Werkstoff mit Zugfestigkeit 490 N/mm²

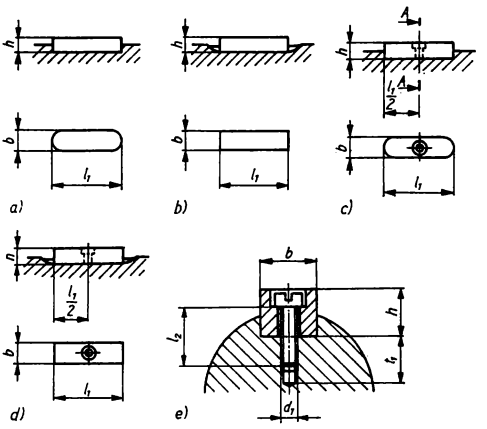


Bild 4.55. Paßfedern (nach TGL 21000) und Keile (nach TGL 18076)
a) rundstirnig, ohne Bohrung für Halteschraube, b) geradstirnig, ohne Bohrung für Halteschraube, c) rundstirnig, mit Bohrung für Halteschraube, d) geradstirnig, mit Bohrung für Halteschraube, e) Schnitt A–A
bis M 10 Zylinderschraube nach TGL 0-84, ab M 12 Zylinderschraube nach TGL 0-912, Senkungen nach TGL 0-75/03, mittel

Tabelle 4.41: Paßfedern und Keile (nach TGL 9500 und 18076) (Maße in mm)

Wellendurchmesser über	Paßfedern, Keile b	h	t	Tangentkeile für stoßartige Wechselbelastung Wellendurchmesser	b	h
10···12	4	4	2,5	100	30	10
12···17	5	5	3	110	33	11
17···22	6	6	3,5	120	36	12
22···30	8	7	4	130	39	13
30···38	10	8	5	140	42	14
38···44	12	8	5	150	45	15
44···50	14	9	5,5	160	48	16
50···58	16	10	6	170	51	17
58···65	18	11	7	180	54	18
65···75	20	12	7,5	190	57	19
75···85	22	14	9	200	60	20
85···95	25	14	9	210	63	21
95···110	28	16	10	220	66	22
110···130	32	18	11	230	69	23
130···150	36	20	12	240	72	24
150···170	40	22	13	250	75	25
170···200	45	25	15	260	78	26

Wellendurchmesser und übertragene Leistung

Tabelle 4.42 gibt eine Übersicht über die übertragene Leistung P in Abhängigkeit vom Wellendurchmesser und der Drehzahl.

Tabelle 4.42: Wellendurchmesser und übertragene Leistung[1])

Drehzahl n	Leistung P in kW																		
	0,74	1,5	2,2	2,9	3,7	5,9	7,4	11	14,7	22,1	29,4	36,8	44,2	58,9	73,6	88,3	103	118	132	147
min^{-1}	Wellendurchmesser in mm																			
60	45	55	60	65	65	75	80	85	95	105	110	115	120	130	140	145	150	155	160	170
80	45	50	55	60	60	70	75	80	85	95	105	110	115	120	130	135	140	145	150	155
100	40	50	50	55	60	65	70	75	85	90	100	105	110	115	120	130	135	135	140	145
120	40	45	50	55	55	65	65	75	80	85	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
140	35	45	50	50	55	60	65	70	75	85	90	95	100	105	115	120	120	125	130	135
160	35	40	45	50	55	60	60	70	75	80	85	90	95	105	110	115	120	120	125	130
180	35	40	45	50	50	55	60	65	70	80	85	90	95	100	105	110	115	120	120	125
200	35	40	45	50	50	55	60	65	70	75	85	85	90	100	105	110	110	115	120	120
250	35	40	40	45	50	55	55	60	65	70	80	85	85	95	100	100	105	110	115	115
300	30	35	40	45	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	100	105	110	110
400	30	35	40	40	45	50	50	55	60	65	70	75	75	85	85	90	95	100	100	105

[1]) Verdrehungsbeanspruchung im Mittel $\tau_t = 1176{,}8\ N/cm^2$

Staufferbuchsen

In Tabelle 4.43 sind Angaben über Staufferbuchsen zusammengestellt.

Tabelle 4.43: Staufferbuchsen (nach TGL 0-3411)

Größe	Kapseldurchmesser mm	Mindestvolumen cm^3	Gewindezapfen		für Wellendurchmesser mm
00	14	0,6	R 1/8"	M 6	20
0	16	1,2	R 1/8"	M 8 × 1	30
1	24	2,2	R 1/8"	M 10 × 1	45
3	38	10	R 1/4"	M 12 × 1,5	60
5	58	35	R 1/4"	M 12 × 1,5	80
7	75	70	R 3/8"	M 16 × 1,5	125
9	110	220	R 1/2"	M 20 × 1,5	200

Wandkonsolen für Elektromotoren

Wandkonsolen sind in Bild 4.56 dargestellt, und in Tabelle 4.44 sind Daten angegeben.

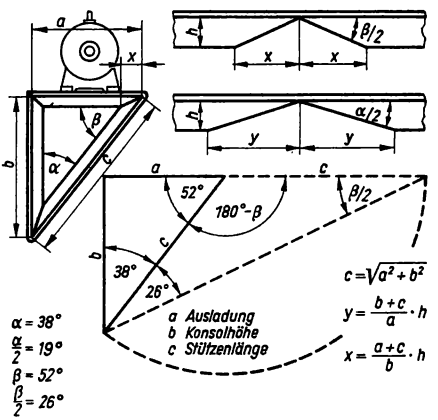


Bild 4.56. Wandkonsole für Elektromotoren

Tabelle 4.44: Wandkonsolen (Maße in mm)

Motormasse kg	Ausladung a	Konsolhöhe b	Stütze c	⌞-Stahl Profil	h	x	y
10···19	350	448	568	40 · 40 · 4	36	74	104
				45 · 45 · 5	40	82	116
20···29	400	512	650	40 · 40 · 5	36	74	104
				45 · 45 · 5	40	82	116
30···49	500	640	810	45 · 45 · 5	40	82	116
				50 · 50 · 5	45	92	131
50···80	600	766	974	45 · 45 · 5	40	82	116
				50 · 50 · 5	45	92	131

Wellenkupplungen (starre Scheibenkupplungen)

Die Ausführung einer starren Wellenkupplung zeigt Bild 4.57, Daten sind in der Tabelle 4.45 enthalten.

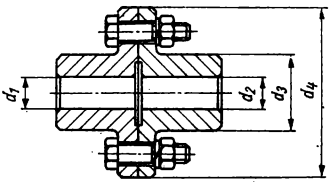


Bild 4.57. Wellenkupplung (starre Scheibenkupplung)

4.3.1.13. Maßbezeichnungen

Die Maßbezeichnungen sind für die verschiedenen Maschinentypen aus den Bildern 4.58···4.64 ersichtlich. Darin bedeuten:

a, a_1, a_2, a_3, a_4 Abstand der Befestigungslöcher des Gehäuses, der Grundplatte oder des Sockels in Achsrichtung,

b, b_1, b_2 Abstand der Befestigungslöcher quer zur Achsrichtung,

c, c_1 Fußdicke des Gehäuses, des Sockels oder der Grundplatte,

d, d_1 Durchmesser der Wellenenden (d auf der Antriebsseite, d_1 auf der Bürstenseite) und Gewindezapfen,

d_2 Durchmesser der Gewindezapfen bzw. der Kegel der festen und auswechselbaren Polierspitzen am dünnen Ende,

d_3 auf der Bürstenseite,

e, e_1 Länge des Gehäusefußes bzw. des Sockels oder der Grundplatte in Achsrichtung,

e_2, e_3 Mitte Maschine bis Mitte Befestigungslöcher der Grundplatte,

Tabelle 4.45: Wellenkupplungen (starre Wellenkupplung)

Nenn-drehmoment	d_1 vorgebohrt	d_2 Kleinstmaß	d_3 Größtmaß	d_3	d_4	Schrauben- Gewinde	Schrauben- Länge	Schrauben- Anzahl	Drehzahl	Masse
N · m	mm	mm	mm	mm	mm		mm		min^{-1}	kg
39,2	14	16	30	48	110	M 10	30	2	5200	2,2
61,8	16	18	35	55	115	M 10	30	2	5000	2,7
98	18	20	40	65	125	M 10	30	2	4600	3,5
157	20	22	45	70	130	M 10	30	2	4400	3,7
245	22	25	50	80	150	M 12	40	2	3800	6,5
392	28	30	55	90	160	M 12	40	2	3600	7,8
618	30	32	65	100	170	M 12	40	3	3400	11
981	35	38	75	115	180	M 12	40	3	3200	14
1569	40	42	85	135	220	M 16	50	3	2600	22
2452	48	50	90	145	240	M 16	50	3	2400	31
3923	55	60	95	160	260	M 20	65	3	2200	40
6178	65	70	100	180	280	M 20	65	3	2100	58
9807	70	75	120	200	320	M 24	75	3	1800	74
15691	80	85	130	220	340	M 24	75	3	1700	102

f, f_1 Breite des Gehäusefußes bzw. des Sockels oder der Grundplatte quer zur Achsrichtung,

g größter Durchmesser der Maschine,

g_1 größte Ausladung der Maschine mit Klemmenkasten,

h, h_1 Achshöhe, d. h. Unterkante Fuß, Sockel oder Grundplatte bis Mitte Welle,

i, i_1 Mitte Befestigungslöcher bis Wellenenden,

i_2 Abstand von der bearbeiteten Fläche des Flansches bis Wellenende,

k, k_1, k_2, k_3 Gesamtlänge der Maschine (des Aggregates) mit 1 oder 2 Wellenenden, mit Gewindezapfen und mit Riemenscheibe,

l, l_1 Länge des freien Wellenendes (l auf der Antriebsseite, l_1 auf der Bürstenseite), zylindrisch oder kegelig,

l_2 Länge der Gewindezapfen an den freien Wellenenden, Länge des Kegels am Wellenende auf der Antriebsseite,

l_3 Länge des Kegels am Wellenende auf der Bürstenseite,

l_4 Länge des Kegels,

l_5, l_6 Länge der auswechselbaren Polierspitze mit Gewindezapfen (l_6 mit Kegel),

l_7 Länge des Kegels an der auswechselbaren Polierspitze. Entsprechend den verschiedenen Maßen l_1, l_3, l_5, l_6 werden k_1, k_3, k_5, k_6 und q_1, q_3, q_5 und q_6 gebildet,

m Länge der Auflagefläche des Fußes in Achsrichtung,

n Breite der Auflagefläche des Fußes quer zur Achsrichtung,

o Mitte Maschine bis Außenkante Lager auf Bürstenseite,

p, p_1 Gesamthöhe, d. h. Unterkante Fuß, Sockel oder Grundplatte bis höchsten Punkt der Maschine,

q, q_1, q_3, q_5, q_6 Mitte Maschine bis Wellenende (q_3 Mitte Generator bis Mitte Motor),

s, s_1 Durchmesser der Befestigungslöcher der Grundplatte, des Sockels, des Fußes oder des Flansches,

t, t_1 Unterkante Welle bis Oberkante Paßfeder, zylindrisch oder kegelig,

u, u_1 Breite der Paßfeder,

z Mitte Befestigungslöcher der Maschine bis Innenkante Riemenscheibe.

Für *Flanschmotoren* gelten noch:

F Durchmesser des Befestigungsflansches,
G Durchmesser des Zentrierrandes,
S Durchmesser der Zentriereindrehung,
K Dicke des Befestigungsflansches,
L Lochkreisdurchmesser,
A Höhe des Zentrierrandes,
A_1 Tiefe der Zentriereindrehung,
B Breite der Riemenscheibe,
D Durchmesser der Riemenscheibe,
E Abstand der Befestigungslöcher der Spannschienen in Achsrichtung der Maschine,
H Höhe der Spannschienen,
M Breite der Spannschienen,

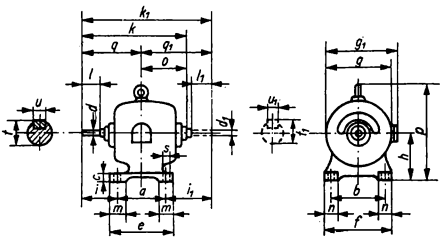


Bild 4.58. Maschine mit 2 Schildlagern (1 oder 2 freie Wellenenden, Gehäuse mit Füßen)

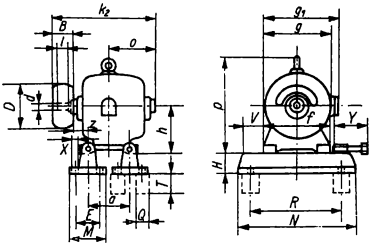


Bild 4.59. Maschine mit 2 Schildlagern (freies Wellenende, Gehäuse mit Füßen, Spannschienen)

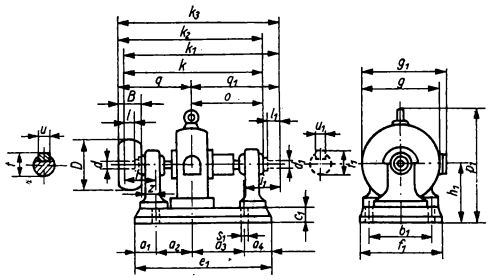


Bild 4.60. Maschine mit 2 Stehlagern (1 oder 2 freie Wellenenden, Grundplatte, Riemenscheibe)

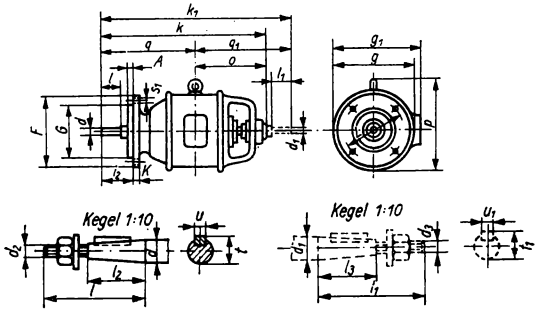


Bild 4.61. Maschine mit Flansch

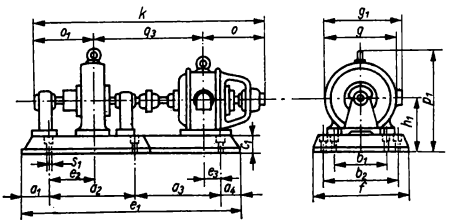


Bild 4.62. Motorgenerator

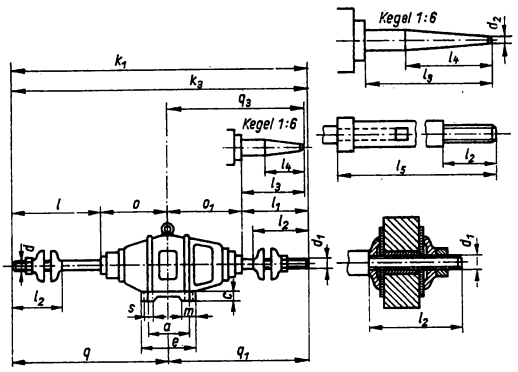


Bild 4.63. Polier- und Schleifmotor ohne Anlasser

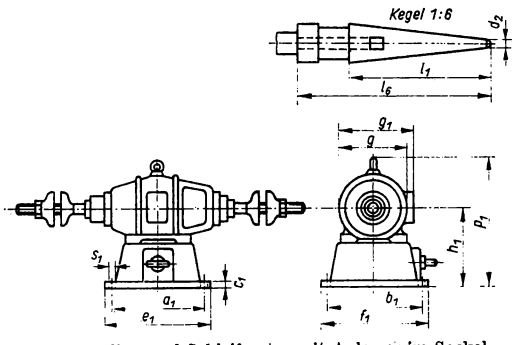


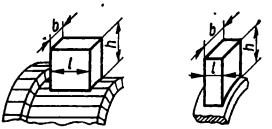
Bild 4.64. Polier- und Schleifmotor mit Anlasser im Sockel

N Länge der Spannschienen,
Q Durchmesser oder Seitenlänge des Fundamentloches,
R Abstand der Befestigungslöcher der Spannschienen quer zur Achsrichtung der Maschine,
T Tiefe des Fundamentloches,
V größte Verschiebung der Maschine auf Spannschienen,
X Durchmesser der Befestigungslöcher der Spannschienen,
Y Länge der Spannschraube einschl. Kopf.

4.3.1.14. Kohlebürsten und Bürstenhalter

Die Tabellen 4.46···4.48 enthalten Angaben über Kohlebürsten für Kommutatoren und Schleifringe sowie für Taschenbürstenhalter und Angaben über Bürstenhalter.

Tabelle 4.46: Bürsten für Kommutatoren und Schleifringe (Maße in mm)

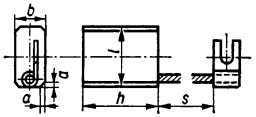


Länge *l* Abmessung der Bürste in Richtung der Achse,
Breite *b* Abmessung in Richtung des Umfangs,
Höhe *h* Abmessung in Richtung des Durchmessers;
Länge *l* gleich oder größer als Breite *b*: vorwiegend Kommutatorbürste;
Länge *l* kleiner als Breite *b*: vorwiegend Schleifringbürste;

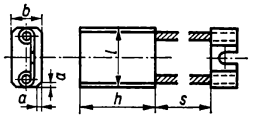
Bezeichnung einer Bürste von *l* = 10 mm, *b* = 8 mm, *h* = 25 mm:
Bürste 10 × 8 × 25.
Bürstenart und Ausführung sind bei Bestellung anzugeben.

l	*b*	*h*				*l*	*b*	*h*			
4	3	12,5	—	—	—	20	5	—	25	—	—
							6,4	20	25	—	—
5	3	12,5	—	—	—		8	20	25	32	—
	4	12,5	—	—	—		10	20	25	32	—
							12,5	—	25	32	—
6,4	4	16	—	—	—		16	—	25	32	40
	5	16	—	—	—		25	—	—	32	—
	12,5	16	—	—	—		32	—	25	32	40
							40	—	25	32	40
8	5	20	—	—	—	25	5	25	—	—	—
	6,4	20	—	—	—		6,4	—	32	—	—
	16	20	—	—	—		8	—	32	40	—
	20	20	25	—	—		10	—	32	40	50
	25	—	25	—	—		12,5	—	32	40	50
							16	—	32	40	50
10	5	16	20	25	—		20	—	32	40	50
	6,4	16	20	25	—		32	—	32	40	—
	8	16	20	25	—		40	—	—	40	—
	16	—	20	25	—		50	—	—	40	—
	20	—	20	25	—						
	25	—	—	25	32	32	5	—	32	40	—
							6,4	—	32	40	—
12,5	6,4	20	25	32	—		8	—	32	40	50
	8	20	25	32	—		10	—	32	40	50
	10	20	25	32	40		12,5	—	32	40	50
	16	—	25	32	40		16	—	32	40	50
	20	—	25	32	40		20		32	40	50
	25	—	25	32	—		25	—	32	40	50
	32	—	—	32	—		32	—	32	—	—
	40	—	—	—	40		40	25	—	40	50
16	5	20	—	—	—	40	5	—	32	—	—
	6,4	20	25	—	—		6,4	—	32	—	—
	8	20	25	—	—		8	—	—	40	—
	10	20	25	—	—		10	—	—	40	—
	12,5	—	25	32	—		12,5	—	—	40	50
	20	—	—	—	40		16	—	—	—	50
	25	—	25	32	40		20	—	32	—	—
	32	—	—	32	40						
	40	—	—	—	40						

Tabelle 4.47: Kohlebürsten für Taschenbürstenhalter
(Maße in mm)



Mit 1 Kupferseil[1])



Mit 2 Kupferseilen

Bezeichnung einer Kohlebürste mit den Nennmaßen

l = 16 mm und b = 10 mm,

metallfrei (f) mit Kupferseil und Kabelschuh, Kohlebürstenmarke[2])

Kohlebürste 16 × 10f.

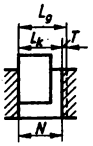
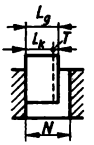
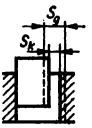
Ausführung: Kupferseil in Kohlebürste: Stampfkontakt oder Nietkontakt nach Wahl des Herstellers. Die Kupferseile müssen so angebracht sein, daß ein Klemmen des Druckfingers des zugehörigen Bürstenhalters vermieden wird.
Berührungsschutz für Kupferseil nur auf besondere Bestellung. Berührungsschutz darf die Biegsamkeit des Kupferseiles nicht nachteilig beeinflussen.
Kupferseil in Kabelschuh: Schweißung oder Lötung nach Wahl des Herstellers.
Kohlebürstenkopf: Für weiche Kohlebürstenmarken ist bei Bedarf Kopfhärtung (z. B. durch Lack) oder Anbringen eines Kopfbleches vom Hersteller vorzusehen, in Sonderfällen vom Besteller vorzuschreiben.

Kennzeichnung: Die Kohlebürsten müssen mit einem Kennzeichen versehen sein.

Nennmaße $l \times b$[3])	h[4])	a	s	Kohlebürste metallfrei			Kohlebürste metallhaltig		
				Kupferseil		Kabelschuh Kurzzeichen	Kupferseil		Kabelschuh Kurzzeichen
				Anzahl	A mm²		Anzahl	A mm²	
10 × 5	20	0,8−0,2	45 ± 2	1	0,35	A 5 × 1	1	0,5	A 5 × 1,2
10 × 6,4				1	0,5	A 5 × 1,2	1	0,5	A 5 × 1,2
10 × 8				1	0,5	A 5 × 1,2	1	1	A 5 × 1,7
12,5 × 6,4	25	0,8−0,2	55 ± 2	1	0,5	A 5 × 1,2	1	1	A 5 × 1,7
12,5 × 8				1	1	A 5 × 1,7	1	1,5	A 5 × 2,1
12,5 × 10				1	1,5	A 5 × 2,1	1	2,5	A 5 × 2,6
16 × 8	25	0,8−0,2	60 ± 2	1	1,5	A 6 × 2,1	1	2,5	A 6 × 2,6
16 × 10				1	2,5	A 6 × 2,6	1	4	A 6 × 3,3
16 × 12,5				1	2,5	A 6 × 2,6	1	4	A 6 × 3,3
20 × 8	25	1,0−0,3	60 ± 2	1	2,5	A 6 × 2,6	1	4	A 6 × 3,3
20 × 10				1	2,5	A 6 × 2,6	1	4	A 6 × 3,3
20 × 12,5				1	4	A 6 × 3,3	1	6	A 6 × 4,3
20 × 16				1	4	A 6 × 3,3	1	6	A 6 × 4,3
25 × 10	32	1,0−0,3	70 ± 3	1	4	A 6 × 3,3	1	6	A 6 × 4,3
25 × 12,5				1	4	A 6 × 3,3	1	6	A 6 × 4,3
25 × 16			75 ± 3	2	2,5	B 6 × 2,6	2	6	B 6 × 4,3
25 × 20				2	4	B 6 × 3,3	2	6	B 6 × 4,3
32 × 12,5	40	1,0−0,3	80 ± 3	2	2,5	B 6 × 2,6	2	6	B 6 × 4,3
32 × 16				2	4	B 6 × 3,3	2	6	B 6 × 4,3
32 × 20				2	4	B 6 × 3,3	2	8	B 6 × 4,9
32 × 25				2	6	B 6 × 4,3	2	8	B 6 × 4,9

[1]) Kupferseil kann auch in eine abgeschrägte Ecke oder Kante eingeführt werden.
[2]) Kohlebürsten-Werkstoff bei Bestellung angeben.
[3]) Zulässige Abweichungen s. S. 275.
[4]) Zulässige Abweichung für h = JSA h 14.

Tabelle 4.48: Grenzmaße für Kohlebürsten und Bürstenhalter
(Maße in mm)[1])

Kohlebürste	N 1 oder b für K oder B		 Kohlebürste K			 Bürstenhalter B				 K und B	
			L_g	L_k	T		L_g	L_k	T	S_g	S_k
metallfrei	5	d 11	4,97	4,89	0,08	H 10	5,05	5,00	0,05	0,16	0,03
	6,4		6,36	6,27	0,09		6,46	6,40	0,06	0,19	0,04
	8		7,96	7,87	0,09		8,06	8,00	0,06	0,19	0,04
	10		9,96	9,87	0,09		10,06	10,00	0,06	0,19	0,04
	12,5	d 11	12,45	12,34	0,11	H 11	12,61	12,50	0,11	0,27	0,05
	16		15,95	15,84	0,11		16,11	16,00	0,11	0,27	0,05
	20		19,93	19,80	0,13		20,13	20,00	0,13	0,33	0,07
	25		24,93	24,80	0,13		25,13	25,00	0,13	0,33	0,07
	32		31,92	31,76	0,16		32,16	32,00	0,16	0,40	0,08
metallhaltig	5	d 11	4,97	4,89	0,08	H 10	5,05	5,00	0,05	0,16	0,03
	6,4		6,36	6,27	0,09		6,46	6,40	0,06	0,19	0,04
	8		7,96	7,87	0,09		8,06	8,00	0,06	0,19	0,04
	10		9,96	9,87	0,09		10,06	10,00	0 06	0,19	0,04
	12,5	b 11	12,35	12,24	0,11	H 11	12,61	12,50	0 11	0,37	0,15
	16		15,85	15,74	0,11		16,11	16,00	0,11	0,37	0,15
	20		19,84	19,71	0,13		20,13	20,00	0,13	0,42	0,16
	25		24,84	24,71	0,13		25,13	25,00	0,13	0,42	0,16
	32		31,83	31,67	0,16		32,16	32,00	0,16	0,49	0,17

[1]) L_g Größtmaß, L_k Kleinstmaß, T Toleranz, N Nennmaß, S_g Größtspiel, S_k Kleinstspiel

4.3.1.15. Übertragung

Daten zu Übertragungselementen und Übersetzungsverhältnissen sind in den Tabellen 4.49···4.53 enthalten.
Für die *Anlaufzeit* in Abhängigkeit vom Schwungmoment gilt

$$t_A = \frac{(GD^2 \text{ des Motors} + GD^2 \text{ der Arbeitsmaschine})}{375 \cdot M_N} \cdot n.$$

P Leistung bei Vollast in kW, n_s synchrone Drehzahl in min^{-1}; n Nenndrehzahl in min^{-1}, M_N Nenndrehmoment in N · m; $M_N = 1000P : n_s$, GD^2 Schwungmoment in N · m^2. Das Schwungmoment des Motors ist in Verbindung mit dem Schwungmoment der Arbeitsmaschine maßgebend für die Anlaufzeit t_A in s und damit für die Erwärmung des Motors beim Anlauf.

Tabelle 4.49: Rohhaut- (Hartgewebe-) Zahnräder

Modul m / Breite $10m$		1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7
		Motorleistung in kW								
Umlauf-	2	0,1	0,3	0.5	0,8	1,2	—	—	—	—
geschwindig-	4	0,2	0,5	0,8	1,2	1,8	3,0	4,6	5,8	—
keit	6	0,3	0,7	1,0	1,6	2,4	4,0	6,1	8,4	13
in m/s	8	0,4	0,8	1,2	2,0	2,9	4,8	7,4	10	15
	10	0,5	0,9	1,4	2,2	3,3	5,6	8,5	12	17

Tabelle 4.51: Kleinster Riemenscheibendurchmesser

P	n Drehzahl in min^{-1}					
	500	600	750	1000	1500	3000
kW	Kleinste Riemenscheibe in mm					
0,4	85	80	70	60	50	45
0,63	110	100	90	80	60	45
1,6	135	120	105	90	75	60
3,5	190	170	150	130	110	70
7	255	240	200	180	150	—
10	315	300	250	215	170	—
14	360	340	280	240	200	—
19	410	400	320	275	215	—
22	465	450	330	290	245	—

Die Zahlen sind Durchschnittswerte und bei den Motoren der einzelnen Hersteller je nach Ausbildung der Lager verschieden.

Tabelle 4.50: Riemenscheiben

Durchmesser der kleinen Scheibe	n Motoren-Drehzahl in min^{-1}												
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1500	2000
	Übertragene kW je cm Riemenbreite												
100 mm	—	—	—	0,06	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,21	0,29
200 mm	0,07	0,10	0,15	0,18	0,24	0,30	0,36	0,43	0,49	0,61	0,74	0,81	1,18
300 mm	0,13	0,22	0,31	0,40	0,54	0,68	0,88	0,98	1,13	1,44	1,76	1,91	
400 mm	0,24	0,40	0,57	0,73	1,06	1,16	1,38	1,47	1,93	2,48	zu hohe		
500 mm	0,37	0,61	0,85	1,10	1,37	1,69	2,02	2,42	2,89	Geschwindigkeiten			

Tabelle 4.52: Zulässige Übersetzungsverhältnisse

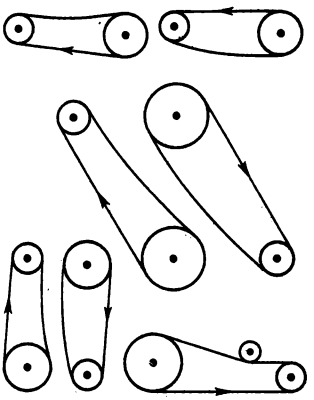
Richtung des Zuges und Lage der treibenden Scheibe	Antrieb	groß	normal	kleinst-zulässig
	waagerecht			
	unten	9 : 1	7 : 1	6 : 1
	oben	7 : 1	6 : 1	5 : 1
	schräg			
	unten	7 : 1	6 : 1	5 : 1
	oben	5 : 1	4 : 1	4 : 1
	senkrecht			
	unten	6 : 1	5 : 1	4 : 1
	oben	5 : 1	4 : 1	3 : 1
	beliebig mit Spannrolle	20 : 1	–	–

Tabelle 4.53: Kleinster zulässiger Achsenabstand (in m)

Dmr. der kl. Scheibe mm	Durchmesser der größeren Scheibe in mm													
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1500	2000	2500
50	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,8	4,4	5,2
100	–	0,7	0,9	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,7	4,3	5,1
150	–	–	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8	2,2	2,4	2,7	3,6	4,2	5,0
200	–	–	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	3,5	4,1	4,8
250	–	–	–	0,7	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	3,4	4,0	4,7
300	–	–	–	0,6	0,8	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	3,3	3,9	4,6
350	–	–	–	–	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,2	3,2	3,8	4,5
400	–	–	–	–	0,6	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	3,0	3,6	4,4
450	–	–	–	–	–	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,9	3,5	4,3
500	–	–	–	–	–	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	1,8	2,8	3,4	4,2

Tabelle 4.54: Drehzahlen für Drehstrommaschinen in Abhängigkeit von der Anzahl der Polpaare

n^1)	Polpaare	n^1)	Polpaare
3000	1	300	10
1500	2	250	12
1000	3	214	14
750	4	188	16
600	5	150	20
500	6	125	24
375	8		

[1]) Drehzahl von Maschinen und leerlaufenden Motoren

Bestellbeispiel:

10 t Blech 0,5 × 1000 × 2000 TGL 10476-II 2,8 TGL 10475

Dicke
Breite
Länge
Blechsorte

4.3.1.16. Dynamo- und Trafobleche (nach TGL 10475 und 10476)

Geometrische Daten der Bleche sind in Tabelle 4.55 enthalten. In Tabelle 4.56 sind physikalisch-technische Kennwerte zusammengestellt.
Die Ummagnetisierungsverluste $V_{1,0}$ und $V_{1,5}$ geben die bei Wechselstrom 50 Hz auftretenden Verluste in W/kg für die Scheitelwerte der Induktion von 1,0 und 1,5 Wb/m² bei 20 °C an.
Die magnetische Induktion, die zur Beurteilung der Magnetisierbarkeit dient, wird bezeichnet

B_{10} B_{25} B_{50} B_{100} B_{300}

gemessen in Wb/m²
für die Feldstärke 10 25 50 100 300 A/cm.

Im Bild 4.65 sind Magnetisierungskurven und im Bild 4.66 ist die Hysteresisschleife dargestellt.

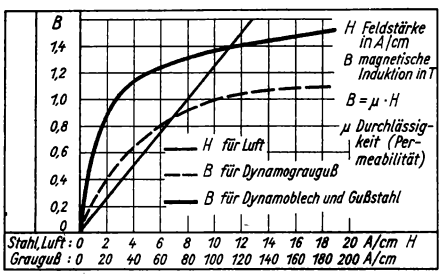


Bild 4.65. Magnetisierungskurven

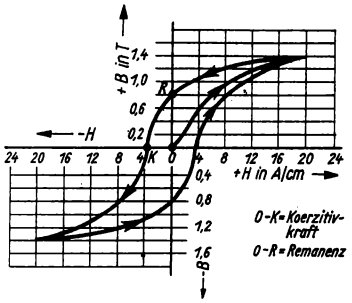


Bild 4.66. Hysteresisschleife

Tabelle 4.55: Abmessungen von Dynamo- und Trafoblechen

Blechsorte	Nenndicke mm	Breite × Länge mm · mm	Zulässige Dickenabweichung mm
I 8,0	1,0	750 × 1500 und 1000 × 2000	±0,1
I 3,6	0,5		±0,05
I 3,2			
II 2,8			
III 2,5			
III 2,2			
III 2,0			
IV 1,8			
IV 1,6			
IV 1,4			
IV 1,4	0,35	750 × 1500	±0,04
IV 1,3			
IV 1,2			
IV 1,1			
IV 1,0			
IV 0,9			

4.3.1.17. Wicklungen

Ankerwicklungen (Beispiele)

Man unterscheidet Fädel- (Hand-), Schablonen- und Stabwicklungen. Bei den Fädelwicklungen werden die Ankerdrähte jeder Spule einzeln in die Nuten eingefädelt. Bei der Schablonenwicklung werden die Drahtwindungen zuerst zur fertigen Spule auf Schablonen geformt, mit Band bewickelt und getränkt. Die Spulen werden dann in die ausgekleideten Nuten eingelegt. Bei der Stabwicklung werden die stabförmigen, mit Mikanit umpreßten Leiter in die Nuten eingebracht und an ihren Enden durch besondere, abgesteifte Wickelköpfe verbunden (s. Bild 4.67).

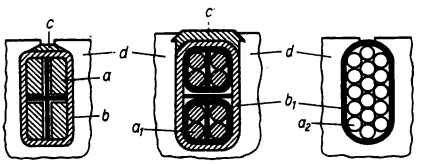


Bild 4.67. Zahn- und Nutenformen
a Ankerdraht, -stab, b Nutenisolation, c Nutenverschluß, d Anker

Gleichstromwicklungen

Wicklung erfolgt allgemein auf Trommelankern (Bild 4.68). Ringanker werden nur noch für Sonderausführungen verwendet, da Schablonenwicklung bei ihnen nicht möglich ist.

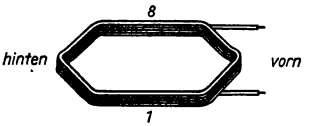


Bild 4.68. Schablonenspule

Jede Spule besteht aus mehreren Windungen und hat zwei Flanken (1 und 8). Sie liegen auf dem Anker parallel zu seiner Achse um etwa eine Polteilung auseinander. Um keine zu feine Nutenteilung zu erhalten, legt man die Flanken mehrerer Spulen (bis zu 8 Stück) in eine Nut (1 und 2, 3 und 4, usw.). Die Zahl der Flanken von einer Spulenflanke (1) zur zweiten Flanke der gleichen Spule (8) ist der hintere *Wickelschritt* (8 − 1 = 7). Die Zahl der Flanken vom Ende der ersten

Tabelle 4.56: Physikalisch-technische Kennwerte von Dynamo- und Trafoblechen

Blechsorte	$V_{1,0}$	$V_{1,5}$	B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	Mindestbiegezahl	Dichte kg/dm³	
	Ummagnetisierungsverlust W/kg höchstens		Magnetische Induktion Wb/m² mindestens						entzundert	mit Zunder
I 8	8,0	19,0	—	—	—	—	—	—	7,85	7,8
I 3,6	3,6	8,6	—	1,53	1,63	1,73	1,98	10	7,85	7,8
I 3,2	3,2	7,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98	10	7,8	7,75
II 2,8	2,8	6,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98	10	7,7	7,65
III 2,5	2,5	6,1	—	1,48	1,59	1,73	1,95	10	7,7	—
III 2,2	2,2	5,3	—	1,48	1,59	1,73	1,95	6	7,7	—
III 2,0	2,0	4,9	—	1,46	1,57	1,72	1,94	6	7,6	—
IV 1,8	1,8	4,4	—	1,46	1,57	1,71	1,92	2	7,6	—
IV 1,6	1,6	3,9	1,32	1,46	1,57	1,71	1,92	1	7,6	—
IV 1,4	1,4	3,4	1,34	1,45	1,56	1,69	1,89	1	7,55	—
IV 1,4	1,4	3,4	1,34	1,46	1,57	1,71	1,92	2	7,6	—
IV 1,3	1,3	3,1	1,34	1,46	1,57	1,69	1,90	2	7,6	—
IV 1,2	1,2	2,9	1,34	1,45	1,56	1,69	1,89	1	7,55	—
IV 1,1	1,1	2,7	1,35	1,44	1,55	1,69	1,89	1	7,55	—
IV 1,0	1,0	2,6	1,37	1,44	1,55	1,69	1,89	1	7,55	—
IV 0,9	0,9	2,4	1,37	1,44	1,55	1,69	—	1	7,55	—
Dynamostahlguß GS 38 und GS 45			—	1,45	1,60	1,75	—	—	7,85	—
Dynamograuguß			—	0,63	0,77	0,95	—	—	7,85	—

Spule (8) bis zum Anfang der zweiten Spule (3 bzw. 13) ist der vordere Wickelschritt (8 − 3 = 5) bzw. (13 − 8 = 5) (s. Bild 4.69).

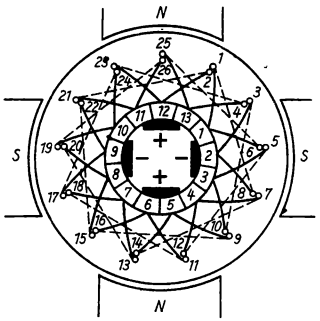
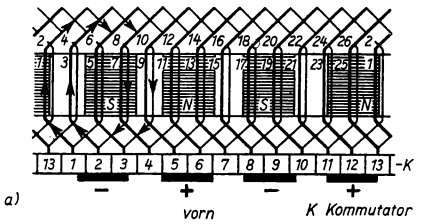


Bild 4.69. Gleichstromwicklung, allgemein

Der *Kommutatorschritt* ist die Zahl der Lamellen vom Anschluß (1) der ersten Spule bis zum Verbindungspunkt (2 bzw. 7) mit der nächsten Spule (2 − 1 = 1) bzw. (7 − 1 = 6).

Die *Schleifen- (Parallel-) Wicklung* (Bild 4.70a) unterscheidet sich von der Wellen- (Serien-) Wicklung nur durch die Spulenfolge und den Kommutatorschritt. Bei der *Schleifenwicklung* kehrt das Ende (8) der ersten Spule zum Anfang (3) der nächsten Spule zurück (Schleife s. Pfeile). Der Kommutatorschritt bei der Schleifenwicklung ist immer 1. Die Schleifenwicklung hat so viele parallele Zweige und so viele Bürsten, wie Pole vorhanden sind; sie wird daher für stärkere Ankerströme bei niedrigen Spannungen angewendet.



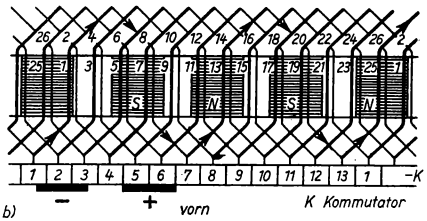


Bild 4.70. Gleichstromwicklungen
a) Schleifenwicklung, b) Wellenwicklung

Die *Wellenwicklung* (Bild 4.70b) setzt in der Regel mindestens vier Feldpole voraus. Das Ende (8) der ersten Spule führt hier nicht zum Anfang der zweiten Spule zurück, sondern geht zum Anfang (13) der gleichliegenden Spule des nächsten gleichnamigen Feldpoles weiter. Die Wicklung schreitet also wellenförmig um den Anker weiter (s. Pfeile). Erst nach Umgang um den ganzen Anker wird die Nachbarlamelle (13) der Lamelle (1) des Kommutators erreicht. Dazwischen liegt die Verbindungsstelle der Lamelle (7). Der Kommutatorschritt ist also (13 − 1) : 2 = 6. Die Wellenwicklung hat unabhängig von der Polzahl nur zwei parallele Zweige und in der Regel nur zwei Bürsten; sie eignet sich daher für höhere Ankerspannungen bei schwächeren Ankerströmen.

Auf die vorstehend behandelten Wicklungsarten lassen sich alle Gleichstromwicklungen zurückführen. So besteht z. B. die Reihenparallelwicklung aus mehreren Wellenwicklungen, die unter sich zu Schleifen verbunden sind.

Für die beiden im Bild 4.70 dargestellten Gleichstromwicklungen ergeben sich die in den Tabellen 4.57 und 4.58 angegebenen Wickelvorschriften.

Tabelle 4.57: Herstellung der Schleifenwicklung[1])

von Lamelle Nr.	vorn nach Flanke Nr.	hinten zurück durch Flanke Nr.	vorn zur Lamelle Nr.
1	1	8	2
2	3	10	3
3	5	12	4
		usw.	
13	25	6	1

[1]) Wickelschritt vorn = 5, hinten = 7, Kommutatorschritt = 1.

Tabelle 4.58: Herstellung der Wellenwicklung[1])

von Lamelle Nr.	vorn nach Flanke Nr.	hinten zurück durch Flanke Nr.	vorn zur Lamelle Nr.
1	1	8	7
7	13	20	13
13	25	6	6
		usw.	
8	15	22	1

[1]) Wickelschritt vorn = 5, hinten = 7, Kommutatorschritt = 6.

Beispiel: Der aus einem vierpoligen 440-V-, 20-A-Gleichstrommotor stammende Trommelanker soll für ein 220-V-Motorgestell gleichen Typs und gleicher Leistung umgewickelt werden. Der 440-V-Anker besitzt Wellenwicklung.

Lösung: Der Anker ist bei gleicher Drahtzahl mit Schleifenwicklung zu versehen. Als Wellenwicklung besaß er zwei parallele Zweige. Als Schleifenwicklung erhält er, entsprechend den vier Polen des Gestells, vier parallele Zweige. Die Spannung ändert sich daher in 440 V · 2:4 = 220 V, wie verlangt. Die Ankerstromstärke wird 20 A · 4:2 = 40 A.

Ständerwicklungen

Entsprechend den drei Phasen des Drehstromes haben die Ständerwicklungen (Bild 4.71) drei Wickelstränge (I, II, III). Die Spulen jedes Stranges sind in Reihe geschaltet. Die Spulenflanken sind gewöhnlich auf mehrere nebeneinanderliegende Nuten (a, b, c) verteilt (Dreilochwicklung). Die Stäbe dieser

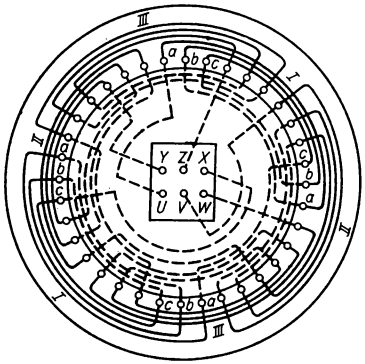


Bild 4.71. Ständerwicklung

Nuten bilden eine Spulenflankengruppe (abc). Die Wicklung hat so viele Pole (z. B. 4 Pole), wie Flankengruppen in einem Strang vorhanden sind. Die Nuten sind meist bis auf einen kleinen Schlitz geschlossen (Stab- oder Fädelwicklung). Die Wickelköpfe liegen in zwei Ebenen, nur bei geteilten Gehäusen kommen auch drei Wickelkopfebenen vor.
Zur Vermeidung zu feiner Nutenteilung können auch die Flanken mehrerer Spulen in einer Nute liegen.
Die Anfänge der Stränge führen zu den Klemmen U, V, W, die Enden zu X, Y, Z.

Läuferwicklungen

Die Wicklungsart der Phasenläufer (Bild 4.72) ist die gleiche wie die der Ständer. Sie kann dreiphasig oder auch nur zweiphasig (V-Schaltung) ausgeführt werden. Die Wickelköpfe liegen beim dreiphasigen Läufer meist in drei Ebenen. Die Stranganfänge führen zu drei Schleifringen u, v, w; die Strang-

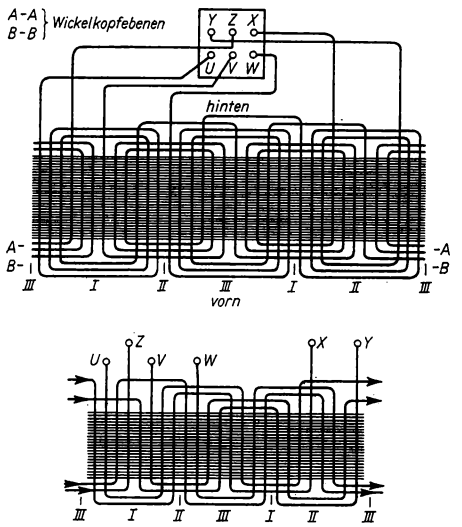


Bild 4.72. Läuferwicklungen

enden sind innerhalb des Läufers miteinander (in Stern) verbunden (Schleifringläufer).
Kurzschlußläufer sind bisweilen kurzgeschlossene Phasenläufer, normal aber Käfigläufer. Bei den Phasen-Kurzschlußläufern sind auch die Anfänge u, v, w im Läufer kurzgeschlossen. Käfigläufer haben nur in geschlossenen Nuten liegende Stäbe, die an beiden Läuferstirnen sämtlich durch Ringe kurzgeschlossen sind.
Das Beispiel einer Drehstrom-2-Loch-Stabwicklung ist im Bild 4.73 dargestellt.

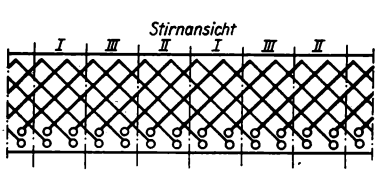


Bild 4.73. Drehstrom-2-Loch-Stabwicklung

4.3.2. Generatoren

4.3.2.1. Gleichstromgeneratoren

Dynamoelektrisches Prinzip

Wirkungsweise

Der Strom kommt dadurch zustande, daß bei der Drehung des Ankers im Luftspalt magnetische Feldlinien geschnitten werden und dadurch in den Stäben der Ankerwicklung eine Quellenspannung U_{iq} erzeugt wird. Das Magnetfeld wird durch die Erregerwicklung auf den Polen erzeugt. Bei Selbsterregung liefert die Maschine den Erregerstrom selbst (Hocherregung des remanenten Magnetismus). Bei *Eigenerregung* wird er von einer mit der Hauptmaschine unmittelbar oder mittelbar gekuppelten Erregermaschine erzeugt, die nur diesem Zwecke dient. *Fremderregung* ist die Erregung eines Generators durch eine andere als die vorstehend genannten Spannungsquellen.
Der Kommutator dient zur Gleichrichtung der Ankerströme, die Bürsten dienen zur Verbindung der Aw mit dem äußeren Stromkreis.
Erklärung der Bezeichnungen in den Skizzen: U_{iq} Quellenspannung; U_k Klemmenspannung; I Strom im äußeren Stromkreis; I_a Ankerstrom; I_m Feldstrom; R Widerstand des äußeren Stromkreises; R_a Ankerwiderstand; R_m Feldwiderstand. Rechtslauf im Sinne des Uhrzeigers, vom Wellenende (A-Seite) aus gesehen. *Nennleistung, Nennspannung, Nennstrom, Nenndrehzahl* usw. werden auf dem Leistungsschild angegeben.

Aufbau der Gleichstrom-Generatoren

Die Pole liegen außen.

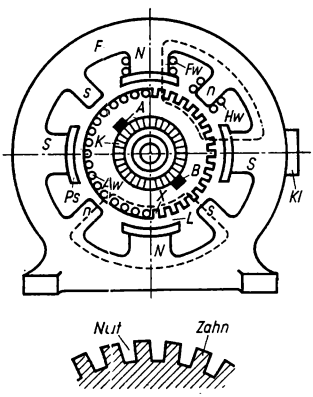


Bild 4.74. Aufbau eines Gleichstromgenerators

Es bedeuten im Bild 4.74:

A	Anker (Läufer) (Stahlblechpaket mit Luftschlitzen), Trommelanker mit Welle,
B	Bürsten (Kohle, Graphit) in Bürstenhaltern auf Bürstenträgern,
K	Kommutator (Kollektor, Stromwender), Kupferlamellen mit Glimmerzwischenlagen,
Aw	Ankerwicklung (Draht- oder Stabwicklung),
Hw	Hilfspolwicklung,
x	Nuten, meist offen, ausgekleidet mit Glimmer, Preßspan dazwischen Zähne,
L	Luftspalt,
Kl	Klemmenbrett,
F	Magnetfeld (-gestell, -gehäuse), Spezialstahlguß,
N	Nord- } Hauptpole, n Nord- } Wendepole,
S	Süd- } s Süd- }
Fw	Feldwicklung (Polspulen),
Ps	Polschuhe,
---	Feldlinienverlauf (magnetischer Kreis).

Gleichstrom-N ebenschlußgenerator

$I = I_a - I_m$; $U_k = U_{iq} - I_a \cdot R_a$; $I_m = U_k : R_m$ und I_a sind groß; R_a und I_m sind klein. Die Feldwicklung besteht aus vielen Windungen dünnen Drahtes. Feldregler mit Kurz-

schlußkontakt q dient zum Kurzschließen der Feldwicklung beim Ausschalten. (Merke: s muß immer an C liegen.)
Im Bild 4.75 sind die Schaltungen des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators ohne Wendepole dargestellt. Im Bild 4.76 ist die Charakteristik dieses Generators veranschaulicht. Die Schaltungen des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators mit Wendepolen sind im Bild 4.77 angegeben.

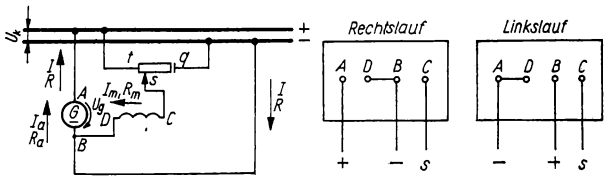


Bild 4.75. Schaltungen des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators (ohne Wendepole)

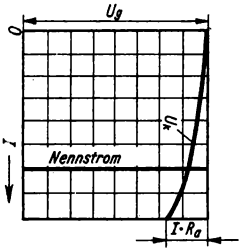


Bild 4.76. Äußere Charakteristik des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators (ohne Wendepunkte)

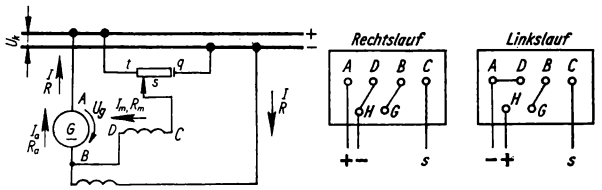


Bild 4.77. Schaltung des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators (mit Wendepolen)

Die Wendepole werden bei großen Generatoren sowie bei solchen für große Spannungsverstellung oder Belastungsschwankungen zwischen die Hauptpole eingebaut. Sie heben die Ankerrückwirkung zum Teil auf und vermindern das Bürstenfeuer. Bei Generatoren ohne Wendepole ist hierzu eine Bürstenverschiebung in Drehrichtung erforderlich. Die Wendepole haben bei Generatoren die Polarität des in der Drehrichtung folgenden Hauptpoles. Sie können einseitig oder symmetrisch zum Anker geschaltet werden.
Die meisten Hersteller führen die Enden der Hilfspolwicklungen nicht nach dem Klemmenbrett, sondern verbinden die Enden B und G im Innern der Maschine. Die Klemmen B und G entfallen dann, und H erhält die Bezeichnung HB; ebenso können A und H wegfallen, und G kann mit G.A bezeichnet werden (Bild 4.78).

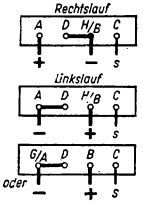


Bild 4.78. Schaltung der Hilfspolwicklungen

Eigenschaften: Die Spannung ändert sich nur wenig bei verschiedener Belastung (leichte Einstellbarkeit). Die Generatoren werden bei Kurzschluß spannungslos. Bei Rückstrom polt sich der Generator nicht um. Die Parallelschaltung mit anderen Stromquellen ist möglich. Die Spannung ist verhältnisgleich der Drehzahl.

Gleichstrom-Reihenschlußgenerator (Serien-, Hauptstrom-Generator)

$U_k = U_{12} - I \cdot (R_a + R_m)$; $I = I_a = I_m$; R_a und R_m sind klein; I_m ist groß.
Die Feldwicklung hat wenige Windungen aus dickem Draht, der Feldsteller gestattet nur Einstellung in groben Stufen (parallel zur Feldwicklung). Hilfspole sind hier anwendbar.

Die Schaltungen des Gleichstrom-Reihenschlußgenerators gehen aus Bild 4.79 hervor. Im Bild 4.80 ist die Charakteristik dieses Generators dargestellt.

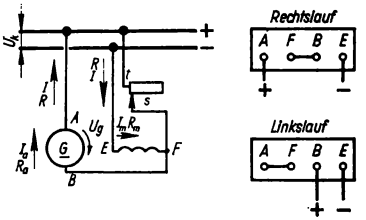


Bild 4.79. Schaltungen des Gleichstrom-Reihenschluß-generators

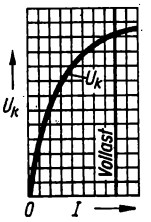


Bild 4.80. Äußere Charakteristik des Gleichstrom-Reihenschlußgenerators

Eigenschaften: Die Spannung ist fast verhältnisgleich der Belastung (schwer einstellbar). Der Generator ist abhängig von einem Mindestwiderstand der Verbraucher, gibt nur in Verbindung mit einer bestimmten Belastung gleiche Spannung und polt sich bei Rückstrom um. Parallelbetrieb zweier Reihenschlußgeneratoren ist nur möglich bei Überkreuzschalten der Erregerwicklungen.
Parallelschaltung zu anderen Stromerzeugern ist nicht möglich. Der Generator ist nicht geeignet zur Akkumulatorenladung und zur Verwendung für chemische Zwecke.

Gleichstrom-Doppelschlußgenerator (Verbund-, Compound-Generator)

Generatoren, bei denen die Verbundwicklung nicht abschaltbar ist

$I_a = I_{m_2}$; $I = I_a - I_{m_1}$; $U_k = U_{12} - I_a \cdot (R_a + R_{m_2})$;

$$I_{m_1} = \frac{U_k}{R_{m_1}}.$$

Die Schaltungen des Generators gehen aus Bild 4.81, die Charakteristik geht aus Bild 4.82 hervor.

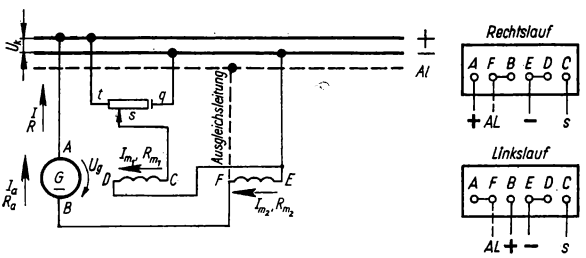


Bild 4.81. Schaltungen des Gleichstrom-Doppelschlußgenerators (Verbundwicklungen nicht abschaltbar)

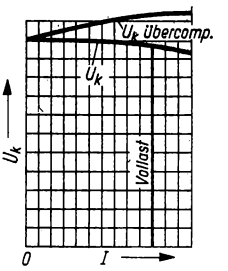


Bild 4.82. Äußere Charakteristik des Gleichstrom-Doppelschlußgenerators

Eigenschaften: Die Spannung bleibt bei allen Belastungen auf +2% konstant (leichte Einstellbarkeit im Nebenschluß). Die Maschine wird bei Überwiegen der Nebenschlußwicklung bei Kurzschluß fast stromlos. Für Parallelbetrieb ist eine Ausgleichsleitung, die zusammen mit dem Hauptschalter jeder Maschine abgeschaltet wird, erforderlich, um ein Umpolen zu verhindern. Parallelbetrieb zweier Maschinen ist durch Überkreuzschalten der Hauptstrom-Erregerwicklung möglich.

Generatoren, bei denen die Verbundwicklung abschaltbar ist

$I = I_{m_2}$; $I = I_a - I_{m_1}$; $U_k = U_{12} - I \cdot R_{m_2} - I_a \cdot R_a$;

$$I_{m_1} = \frac{U_k + I \cdot R_{m_2}}{R_{m_1}}.$$

Die Schaltungen des Generators sind im Bild 4.83 angegeben.

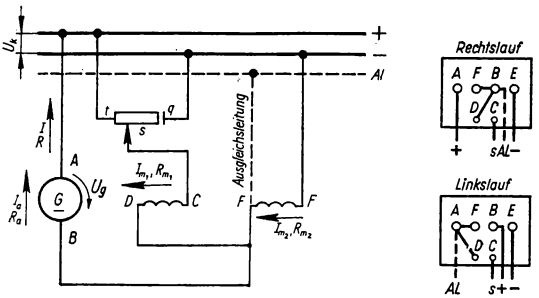


Bild 4.83. Schaltungen des Gleichstrom-Doppelschlußgenerators (Verbundwicklung abschaltbar)

Eigenschaften: Wie oben. Durch die »Ausgleichsleitung« kann die Maschine außerdem als Nebenschlußmaschine arbeiten und ist dann auch für Akkumulatorenladung verwendbar. Bei Stillstand der Maschine muß die Verbundwicklung eingeschaltet bleiben. Einpolige Ausschalter. In beiden Fällen sind I_a, I_{m_2}, R_{m_1} groß, I_{m_1}, R_a, R_{m_2} klein. Feldwicklung gleich der der Nebenschluß- und Reihenschlußmaschine. Wendepole können verwendet werden. Der Hauptstromkreis ist dann: Netz – Verbundwicklung – Wendepole – Anker – (Wendepole –) Netz.

Gleichstrom-Maschine mit Fremderregung

$I = I_a$; $U_k = U_{12} - I_a \cdot R_a$; $I_m = \frac{U_e}{R_m}$.

Die Schaltungen gehen aus Bild 4.84 hervor, Bild 4.85 zeigt die Charakteristik des Generators

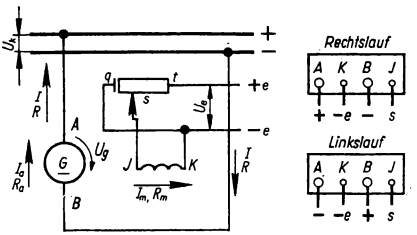


Bild 4.84. Schaltungen der Gleichstrommaschine mit Fremderregung

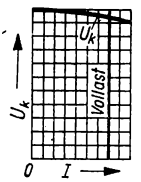


Bild 4.85. Äußere Charakteristik der Gleichstrommaschine mit Fremderregung

Eigenschaften: Geringe Spannungsänderung bei allen Belastungen. Einstellung der Spannung in weitesten Grenzen leicht möglich.
Anwendung besonders als LEONARD-Generator.

Gleichstrom-Querfeldgenerator von Rosenberg

$I = \text{const}$; $U_k = I \cdot R$; $I_m = \frac{U_e}{R_m}$.

Im Bild 4.86 sind die Schaltungen, im Bild 4.87 ist die Charakteristik des Generators angegeben.

Die Maschine hat 4 Bürsten, 2 davon sind kurzgeschlossen. Wirksam ist nur das Ankerquerfeld. Die Bürsten A und B stehen unter den Polen (große Polschuhe).

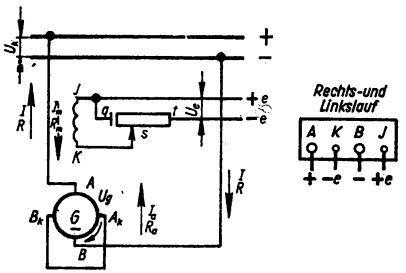


Bild 4.86. Schaltungen des Gleichstrom-Querfeldgenerators

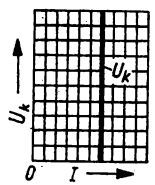


Bild 4.87. Äußere Charakteristik des Gleichstrom-Querfeldgenerators

Eigenschaften: Gleichbleibende Stromstärke bei jedem äußeren Widerstand. Die Stromstärke ist fast unabhängig von der Drehzahl. Die Stromrichtung ist bei Rechts- und Linkslauf gleich.
Die Spannung einer Gleichstrom-Maschine ändert sich mit der Drehzahl. Je höher die Drehzahl ist, desto kleiner und billiger wird die Maschine.

4.3.2.2. Wechselstromgeneratoren

Das Prinzip des Wechselstromgenerators ist im Bild 4.88 dargestellt.
Die Pole sind meistens innenliegend. Es bedeuten im Bild 4.88:

St Ständer (Stator), Stahlblechpaket mit Luftschlitzen in gegossenem oder geschweißtem Gehäuse,
I, II, III Ständerwicklung (Phasenwicklung); eine oder mehrere Nuten je Pol und Phase (Draht- und Stabwicklung, z. B. achtpolig),
X Nuten (geschlossen oder durch Keile verschlossen, ausgekleidet mit Glimmer), dazwischen Zähne,
L Luftspalt (sehr klein),
Kl Klemmenbrett,
Pr Läufer (Rotor), mit Einzelpolen für kleine Drehzahlen; Walzenläufer für große Drehzahlen (Turbogenerator),
N Nordpol bei Einphasenstrom 1 Ständerwicklungsgruppe je Pol,
S Südpol bei Zweiphasenstrom (wenig gebräuchlich) zwei Ständerwicklungsgruppen je Pol,
bei Drehstrom 3 Ständerwicklungsgruppen je Pol,
Ew Erregerwicklung (Polspulen) Draht oder Band; Erregermaschine meist auf gleicher Welle, selten getrennt,
Sr Schleifringe zur Erregerwicklung,
B Bürsten zur Erregerwicklung (Kupfer, Bronze),
W Welle,
--- Feldlinien (magnetischer Kreis), laufen mit den Polen um.

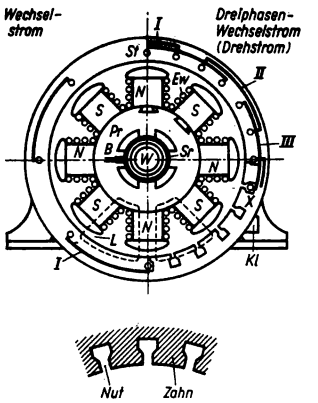


Bild 4.88. Aufbau des Wechselstromgenerators

Wirkungsweise: Der Strom kommt dadurch zustande, daß vor den Ständerspulen I, II, III nacheinander Nord- und Südmagnetismus vorbeigeführt wird, dessen Feldlinien die Ständerwicklungen schneiden und in ihnen eine wechselnde Quellenspannung (U_{1s}) erzeugen. Die Ständerspulen einer Phase sind hintereinandergeschaltet und die Enden zu dem Klemmenbrett geführt.
Im Bild 4.89 ist der Phasenverlauf für Wechselstrom und für Drehstrom angegeben. Im Bild 4.90 ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bei verschiedener Belastung veranschaulicht.

Frequenz: Anzahl der Schwingungen (Perioden) je Sekunde in Hertz (Hz). Als Nutzfrequenz werden 50 Hz (= 100 Polwechsel), für Vollbahnen auch $16^2/_3$ Hz verwendet. Die Drehzahl ist bei bestimmter Frequenz abhängig von der Polpaarzahl.

$n = \frac{60f}{p}$, n Drehzahl, p Polpaarzahl, f Frequenz.

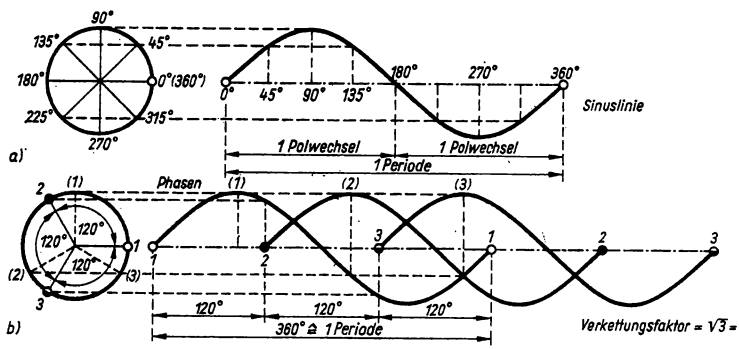


Bild 4.89. Phasenverlauf für a) Wechsel-, b) Drehstrom

Für die Frequenz 50 Hz ist die Drehzahl $n = \frac{3000}{p}$, für $16^2/_3$ Hz ist $n = \frac{1000}{p}$ (standardisierte Drehzahl s. 4.3.1.15.).

Zwischen Strom und Spannung entsteht bei verschiedenen Belastungen eine *Phasenverschiebung* (im Bild 4.90 dargestellt).

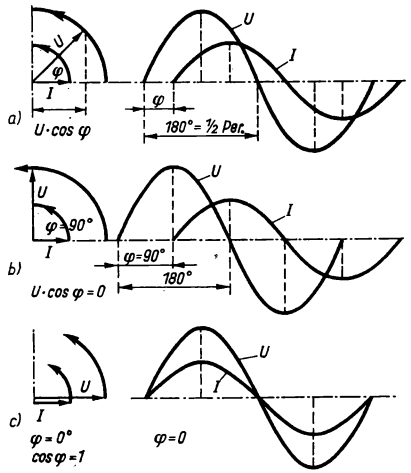


Bild 4.90. Phasenverschiebung bei
a) und b) kapazitiver, c) ohmscher Belastung

Bei *induktiver Belastung* (Motoren, Drosselspulen) eilt der Strom der Spannung nach, bei *kapazitiver Belastung* (Kondensatoren, übererregte Synchronmaschine) eilt der Strom der Spannung voraus. Die Scheitelpunkte (Höchstwerte) von Strom und Spannung sind um den Winkel φ gegeneinander verschoben. Das bedeutet, daß zum Zeitpunkt des Scheitelwerts des Stromes der Scheitelwert der Spannung um den Faktor $\cos\varphi$ verschoben ist. Damit hat die Spannung den Wert $U \cdot \cos\varphi$ (Bild 4.90a). Im Extremfall ist $\varphi = 90°$, d. h., $\cos\varphi = 0$ (rein induktive Belastung) (Bild 4.90b). Hierbei gibt die Maschine keine Leistung ab. Daraus folgt, daß der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ nahe 1 zu halten ist, um maximale Wirkleistung zu erhalten (Bild 4.90c). Gegebenenfalls ist die induktive Belastung durch zusätzlichen Einbau von Kapazitäten auszugleichen (Blindstromkompensation).

Bei rein *ohmscher Belastung* (Glühlampen, Wärmegeräte) haben Strom und Spannung zu gleicher Zeit ihre Höchst- und Nullwerte. Es tritt also kein Verschiebungswinkel auf ($\varphi = 0$; $\cos\varphi = 1$; induktionsfreie Belastung).

Eigenschaften: Leichte Fortleitung mit kleinen Drahtquerschnitten, da hohe Spannungen unmittelbar in ruhenden Maschinenwicklungen und mittelbar durch Transformatoren erzeugt werden können. Drehstrom ist nicht speicherbar (Umformung in Gleichstrom).

Die *Leistungsfaktoren der Generatoren* betragen 1,0; 0,8; 0,7; 0,6 (i. M. 0,8). Für Synchronmotoren und Einankerumformer beträgt der Leistungsfaktor 1,0.

Dreiphasen-Wechselstrom- (Drehstrom-) Generatoren

Sternschaltung

Es ist $U = 1{,}73 \cdot U_{str}$; $I = I_{str}$

mit U Leiterspannung (Außenleiter), Netzspannung, U_{str} Strangspannung (Phasenspannung), I Leiterstrom, I_{str} Strangstrom (Phasenstrom).

Die Sternschaltung wird bei Hochspannungsgeneratoren in Kraftwerken angewandt, da sie je Wicklung eine niedrigere Spannung ergibt als die Dreieckschaltung; ferner bei Niederspannungsgeneratoren mit herausgeführtem Nullpunkt.

Schaltungen und Schaltskizze des Generators bei Sternschaltung sind im Bild 4.91 angegeben, die Strom-Spannungs-Kurve bei verschiedenen Belastungen ist im Bild 4.92 wiedergegeben.

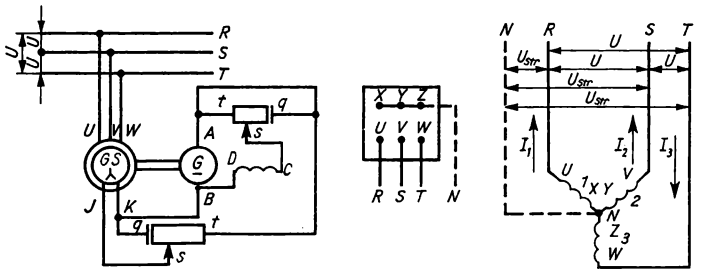


Bild 4.91. Schaltungen des Dreiphasen-Wechselstromgenerators (Sternschaltung)

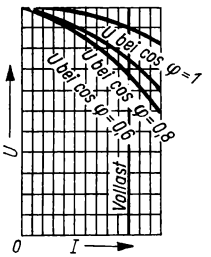


Bild 4.92. Strom-Spannungs-Kurve des Dreiphasen-Wechselstromgenerators

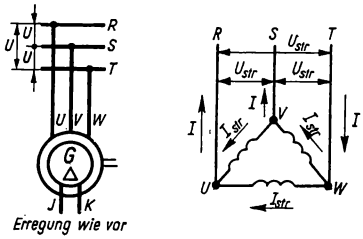


Bild 4.93. Schaltungen des Dreiphasen-Wechselstromgenerators (Dreieckschaltung)

Dreieckschaltung

Es ist $U = U_{str}$; $I = 1{,}73 \cdot I_{str}$.

Die Dreieckschaltung wird selten angewandt; sie kann bei Niederspannungsgeneratoren für hohe Ströme (Elektrostahlöfen) Verwendung finden.

Schaltung und Prinzipskizze sind im Bild 4.93 wiedergegeben. Die Drehstromgeneratoren sind für alle Zwecke brauchbar außer zur Elektrolyse und zum Laden von Akkumulatoren. Bei Bahnen erfordert der Drehstrom doppelpolige Oberleitungen; er ist daher nur für verhältnismäßig geringe Fahrdrahtspannungen geeignet und kaum gebräuchlich.

Klemmenbezeichnung

Strang 1: U – X Strang 2: V – Y Strang 3: W – Z	Sternpunkt N

Einphasen-Wechselstrom-Generatoren

Äußere Charakteristik wie bei Drehstrom, ebenso Spannungen. Schaltung und Prinzipskizze sind im Bild 4.94 enthalten.

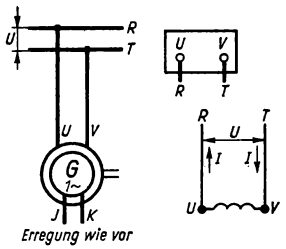


Bild 4.94. Schaltungen des Einphasen-Wechselstromgenerators

Anwendungsgebiet: Vollbahnen mit der Frequenz $16^2/_3$ Hz. Die Fahrdrahtleitung ist nur einpolig (geerdete Rückleitung durch die Schienen) und daher hohe Fahrdrahtspannung von 15000 V möglich. Für sonstige Kraftzwecke wenig üblich.
Über Leistungen und Wirkungsgrad ist Näheres in 1.9.7. angegeben.

Parallelschalten von Wechselstromgeneratoren

Meßinstrumente zum Parallelschalten

Soll ein Generator an das Netz geschaltet werden oder sollen zwei Generatoren den Parallelbetrieb aufnehmen (Bild 4.95), so müssen Frequenz, Spannung, Phasenlage und Phasenfolge übereinstimmen.
Nach dem Parallelschalten arbeitet die hinzugeschaltete Maschine entweder als Generator oder wird als Motor von der Sammelschiene angetrieben. Da die in Betrieb befindlichen Maschinen meistens schon stark belastet sind, ehe man die neue Maschine hinzuschaltet, muß eine weitere Belastung der Sammelschiene durch die hinzugeschaltete Maschine nach Möglichkeit vermieden werden. Wenn es die Betriebsverhältnisse gestatten, wird deshalb stets bei etwas übersynchronem Gang, also bei etwas überhöhter Frequenz, zugeschaltet. Um die Vorbedingungen zum Parallelschalten überwachen oder herbeiführen zu können, benutzt man nachstehend aufgeführte Geräte.

Doppelspannungsmesser. Das Gerät kann gleichzeitig die Spannungswerte zweier Wechselstromnetze anzeigen. Zwei voneinander unabhängige Dreheisenmeßwerke sind im Gehäuse angeordnet.

Doppelfrequenzmesser. Das Gerät besitzt 2 voneinander unabhängige Vibrationsmeßwerke. Die Frequenzen können gleichzeitig abgelesen werden.

Synchronoskop. Das Synchronoskop mit Zeiger bietet gegenüber den Nullspannungsmessern den Vorteil, daß es nicht nur die Phasengleichheit anzeigt, sondern auch angibt, in welchem Sinne die zuzuschaltende Maschine zu regeln ist.
Die Anzeige beim Synchronoskop erfolgt durch einen Zeiger, der durch zwei auf einer Aluminium-Systemscheibe nach dem Induktionsprinzip arbeitende wattmetrische Systeme ausgelenkt wird. Die verwendeten Systeme sind die gleichen wie bei den normalen Induktionszählern. Jedes System besitzt eine Strom- und eine Spannungsspule. Die Schaltung der Systeme ist gekreuzt. Beide Systeme wirken auf dieselbe Scheibe und sind gegeneinander geschaltet. Der Zeiger hat einen maximalen Ausschlag von etwa 180°. Der Zeiger wird von einer in Hellschaltung geschalteten Phasenlampe beleuchtet und markiert sich als Schatten auf der in ihrer oberen Hälfte mattierten Glasscheibe. Die Rückführung des Zeigers erfolgt bei Phasenopposition, auch hier wandert der Zeiger durch die senkrechte Mittelstellung, jedoch markiert sich der Zeiger nicht auf der Mattglasscheibe (da die Lampe dunkel ist). Durch diese Anordnung wird eine drehende Bewegung des Zeigers vorgetäuscht. Die Kennzeichnung auf der Mattglasscheibe gibt an, wie die zuzuschaltende Maschine zu regeln ist. Sind die Frequenzunterschiede ausgeglichen, so werden die Zeigerbewegungen langsam, und beim Durchgang des beleuchteten Zeigers durch die Mittelstellung kann geschaltet werden. Bei größeren Frequenzunterschieden steht der Zeiger infolge seiner Trägheit in Mittelstellung, jedoch ist in diesem Falle deutlich ein periodisches Flackern der Lampe zu erkennen.

Synchronisiereinrichtung

Die zum Synchronisieren notwendigen Geräte werden in einem in zwei Wandarmen drehbar angeordneten Gehäuse eingebaut. Auf diese Weise werden die für den Parallelschaltvorgang so wichtigen Meßgeräte aus der Schalttafelebene herausgehoben

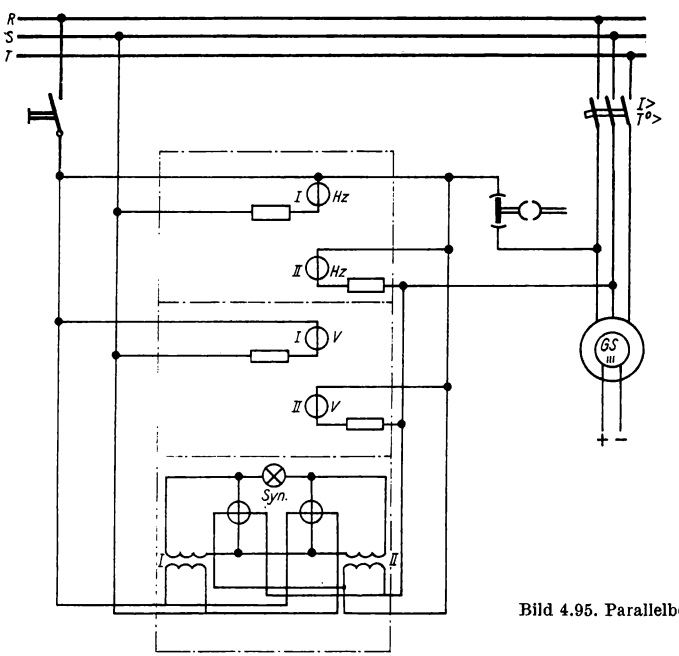


Bild 4.95. Parallelbetrieb von Wechselstromgeneratoren

und können in die für das Ablesen günstigste Richtung gedreht werden.
In den Spannungs- und Stromabgriff können bei höheren Spannungen oder größeren Strömen entsprechend den Erfordernissen Spannungs- oder Stromwandler eingeschaltet werden.

4.3.3. Elektromotoren

4.3.3.1. Gleichstrommotoren

Allgemeiner Aufbau und Wirkungsweise

Der *Aufbau* ist der gleiche wie bei den Generatoren (Bild 4.96).

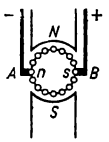


Bild 4.96. Prinzip des Gleichstrommotors

Wirkungsweise: Unter der Einwirkung des magnetischen Feldes auf die stromdurchflossenen Ankerstäbe entsteht eine Bewegung dieser Stäbe und damit eine Drehung des Ankers (Läufers). Durch die Wirkung des Kommutators ist die Stromverteilung in den Ankerwicklungen von der jeweiligen Stellung des Ankers unabhängig; es entsteht somit eine dauernde Bewegung. Durch den Umlauf des Ankers wird wie bei dem Generator eine Quellenspannung (U_{12}) im Anker erzeugt, die der dem Anker aufgedrückten Spannung entgegenwirkt. Diese Gegenspannung (U_g) ist bei leerlaufenden Motoren fast so groß wie die aufgedrückte Spannung an den Bürsten. Der leerlaufende Motor nimmt daher nur einen geringen Strom auf. Bei belastetem Motor sinkt die Drehzahl und damit die U_g, während die Bürstenspannung gleichbleibt. Die vom Motor aufgenommene elektrische Arbeit stellt sich also selbsttätig je nach der Belastung ein.

$$\text{Ankerstromstärke} = \frac{\text{Bürstenspannung} - U_g}{\text{Ankerwiderstand}};$$

$$I_a = \frac{U_k - U_g}{R_a}.$$

Beim Anlauf ist die U_g noch nicht vorhanden; die Anlaufstromstärke würde also $\frac{U_k}{R_a}$ sein, und da R_a sehr klein ist, würde im Anker ein unzulässig starker Strom entstehen. Man schaltet deshalb beim Anlassen einen Widerstand vor den Anker, den man allmählich, der Zunahme der Drehzahl entsprechend, abschaltet. Zu jedem Motor über 1,5 kW, der an eine konstante Spannung gelegt wird, gehört daher ein Anlasser. Man kann die Ankerstromstärke beim Anlauf auch dadurch klein halten, daß man dem Motor die wachsende Spannung eines besonderen Generators (Anlaßgenerator) zuführt. Anlaßgenerator und Motor bilden dann eine elektrisch gekuppelte Einheit (LEONARD-Schaltung). Diese Schaltung findet man z. B. bei Fördermaschinen, Walzwerkmotoren und Papierkalandern, bei denen es in der Hauptsache auf häufiges Anlassen, stetige Verstellung der Drehzahl und leichte Drehsinnänderung ankommt. An die Stelle des Anlassers tritt hier der Nebenschlußsteller des Anlaßgenerators.
Der Anker sucht sich stets auf eine solche Drehzahl einzustellen, daß die U_g gleich der Bürstenspannung wird. Die Drehzahl des Motors ist daher bei Leerlauf der zugeführten Spannung verhältnisgleich.
Schwächt man das magnetische Feld allein bei gleicher Bürstenspannung, so ist die erforderliche U_g nur durch höhere Drehzahl zu erreichen, der Motor läuft daher bei Schwächung des magnetischen Feldes schneller.

Gleichstrom-Nebenschlußmotor

$I = I_a + I_m$; $U_k = U_g + I_a \cdot R_a$.

Die Schaltungen von Gleichstrom-Nebenschlußmotoren ohne Wendepole sind aus Bild 4.97 ersichtlich, die Charakteristik ist im Bild 4.98 wiedergegeben. Die Schaltungen von Gleichstrom-Nebenschlußmotoren mit Wendepolen (symmetrisch zum Anker aufgeteilt) sind im Bild 4.99 angegeben.
Die Feldwicklung hat viele Windungen aus dünnem Draht. Klemme M zweigt stets an den ersten Einschaltkontakten ab

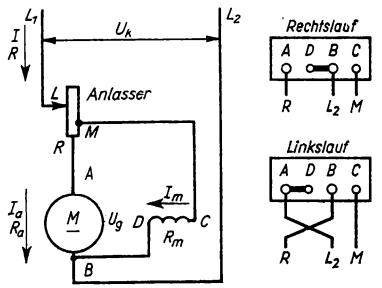


Bild 4.97. Schaltungen des Gleichstrom-Nebenschlußmotors (ohne Wendepole)

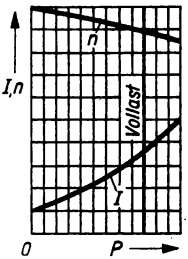


Bild 4.98. Charakteristik des Gleichstrom-Nebenschlußmotors

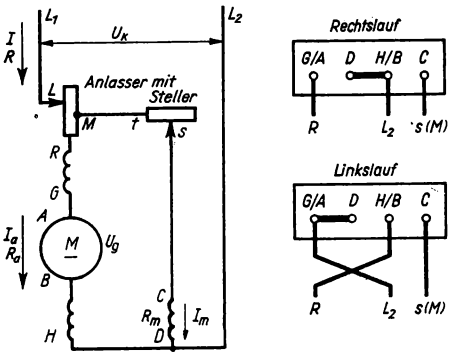


Bild 4.99. Schaltungen des Gleichstrom-Nebenschlußmotors (mit Wendepolen)

oder an einer von der Kurbel L bestrichenen besonderen Schiene. Wendepole werden bei Motoren für große Drehzahländerungen und bei solchen für starke Belastungsschwankungen zwischen die Hauptpole eingebaut. Die Wendepole haben bei Motoren die Polarität des in der Drehrichtung *vorhergehenden* Hauptpols (vgl. Generatoren).

Eigenschaften: Fast gleichbleibende Drehzahl bei jeder Belastung. Leichte Verstellbarkeit durch Schwächung des Feldes mittels Vorschaltwiderstandes im Erregerstromkreis, praktisch verlustlos. Drehzahlerhöhung bis 1:1,3 bei Motoren ohne, bis 1:3 bei Motoren mit Wendepolen.

Anwendungsgebiete: Bei allen Antrieben, die relativ konstante Drehzahlen bei wechselnder Belastung erfordern, sowie für mittleres Anzugsmoment.

Gleichstrom-Reihenschlußmotor oder Hauptstrommotor

$I = I_a = I_m$; $U_k = U_g + I(R_a + R_m)$.

Im Bild 4.100 sind die Schaltungen dargestellt, und Bild 4.101 zeigt die Charakteristik dieses Motors.

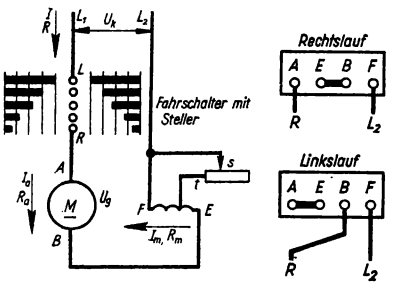


Bild 4.100. Schaltungen des Gleichstrom-Reihenschlußmotors

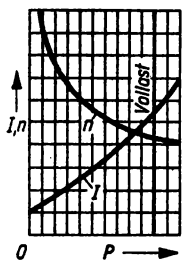


Bild 4.101. Charakteristik des Gleichstrom-Reihenschlußmotors

Die Feldwicklung hat wenige Windungen aus dickem Draht. Der Feldsteller dient nur zum Einstellen des Drehzahlbereiches in großen Stufen (selten verwendet). Die Drehzahl nimmt mit wachsender Belastung ab. Bei Leerlauf gehen die Motoren durch (gefährlich für die Ankerwicklungen); daher für Riemenantriebe (Abfallen des Riemens) ungeeignet. Das Anzugsdrehmoment beträgt etwa das Dreifache des Nennmomentes.

Anwendungsgebiete: Bahnen, Hebezeuge usw., wo bei wechselnder Belastung wechselnde Drehzahl (Geschwindigkeit) verlangt wird, für direkte Kupplung und Zahnradantriebe.

Gleichstrom-Doppelschlußmotor oder Verbund- (Compound-) Motor

$I_a = I_{m_2} - I_{m_1}$; $I = I_{m_2}$; $U_k = U_g + I_a R_a + I_{m_2} R_{m_2}$.

Der Doppelschlußmotor (Schaltung s. Bild 4.102) wird hauptsächlich für Sonderzwecke verwendet.

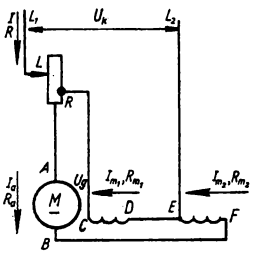


Bild 4.102. Schaltung des Gleichstrom-Doppelschlußmotors (D kann auch an F liegen)

Man gibt z. B. Nebenschlußmotoren zur Erzielung eines hohen Anzugsmomentes bei gleicher Drehzahl (Aufzüge) eine im gleichen Sinne wirkende Verbundwicklung. Man hat auch Doppelschlußmotoren in Akkumulator-Triebwagen eingebaut, um die Motoren bei Fahrten zu Tal als Nebenschlußgeneratoren zum Wiederaufladen der Batterie zu verwenden (Nutzbremsung). Für genau gleich hoch zu haltende Drehzahl gibt man den Nebenschlußmotoren eine im umgekehrten Sinne wirkende Verbundwicklung (Gegencompoundierung).

4.3.3.2. Wechselstrommotoren

Drehstrom-Asynchronmotoren (Drehfeld-Induktionsmotoren)

Aufbau und Wirkungsweise

Der Aufbau ist aus Bild 4.103 ersichtlich.

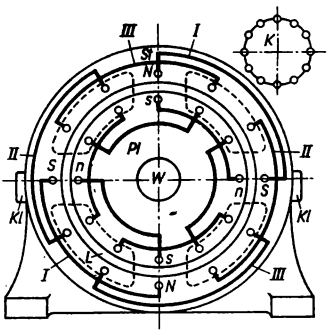


Bild 4.103. Aufbau des Wechselstrommotors

Es bedeuten im Bild 4.103:

St Ständer (Stator), Stahlblechpaket mit Luftschlitzen in gegossenem oder geschweißtem Gehäuse,
I, II, III Ständerwicklung (Phasenwicklung); eine oder mehrere Nuten je Pol und Strang (Draht oder Stabwicklung, z. B. vierpolig); Nuten und Zähne wie bei den Generatoren.
L Luftspalt (sehr klein),
Kl Klemmenbrett,
Pl Phasenläufer (Phasenwicklung, bei Kurzschlußläufermotoren sind sämtliche Anfänge kurzgeschlossen, ebenso sämtliche Enden; bei Schleifringmotoren sind nur die Anfänge kurzgeschlossen, die Enden führen je Phase zu je einem Schleifring),
K Käfigläufer nur bei Kurzschlußläufermotoren; Anfänge und Enden der Läuferstäbe sind durch je einen Ring kurzgeschlossen.
W Welle,
--- Feldlinien (magnetischer Kreis) laufen mit den Phasen um.

Dem Stromfluß des Drehstromgenerators entsprechend geht der Höchstwert des Stromes von Spule I über Spule II nach Spule III usf. Das Magnetfeld des Ständers folgt diesem Fortschreiten, die Pole N und S wandern an dem inneren Umfang des Ständers im Kreise herum. Der Drehstrom erzeugt daher ein magnetisches Drehfeld. Die umlaufenden Pole N und S erzeugen im Läufer die Pole n und s, und ihre Feldlinien schneiden die Läuferwicklung. Diese Läuferpole folgen den Polen des Drehfeldes; der Läufer läuft um. Die Pole n und s suchen mit den Polen N und S in Tritt zu bleiben (synchron zu laufen) und erreichen auch bei Leerlauf fast die Umlaufzahl des Drehfeldes. In diesem Zustand werden aber fast keine Feldlinien der Läuferwicklung mehr geschnitten. Bei Belastung kann nur dann eine Leistungsabgabe (Drehmoment) zustande kommen, wenn von den Läuferwicklungen Feldlinien geschnitten werden. Der Läufer kann daher niemals die Drehzahl des Feldes erreichen. Er läuft nicht synchron mit dem Feld, sondern asynchron. Die Verschiedenheit der Geschwindigkeit wird Schlupf genannt und in % ausgedrückt. Je stärker der Motor belastet wird, um so mehr Feldlinien müssen die Läuferwicklung schneiden, um so größer wird also der Schlupf. Dieser beträgt zwischen Leerlauf und Vollast etwa 3···6%. Der Motor hat demnach die Drehzahl-Charakteristik eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors.

Die in der Läuferwicklung durch das Schneiden der Feldlinien hervorgerufenen Ströme und Spannungen wachsen mit der Zunahme der Belastung und des Schlupfs. Zur Erzeugung dieser Ströme und Spannungen muß der Ständer aus dem Netz einen größeren Strom aufnehmen. Die Wirkstromaufnahme des Motors ist daher wie bei allen Motoren nahezu verhältnisgleich der Belastung.

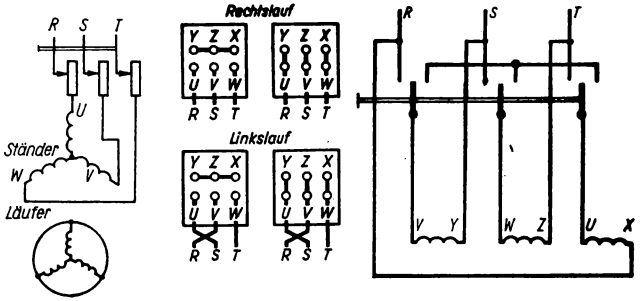


Bild 4.104. Schaltungen der Kurzschlußläufermotoren

Da der Motor aus Wicklungen mit Selbstinduktion (Induktivität) besteht, tritt eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf, deren Leistungsfaktor (cos φ) i. M. 0,8 beträgt, und zwar bei Vollast. Läuft der Motor leer oder ist er nur gering belastet, so ist der Leistungsfaktor bedeutend geringer. Bei der Wahl von Drehstrommotoren ist daher der Kraftbedarf besonders sorgfältig zu ermitteln. Die Drehzahl der Motoren ist nur von der Frequenz des Drehstroms abhängig (nicht von der Spannung). Standardisierte Drehzahlen s. 4.3.1.15.

Da die Leistung der Drehstrommotoren mit abnehmender Spannung sinkt, ist die Spannung an dem Aufstellungsort sorgfältig zu ermitteln (geringer Spannungsabfall in den Zuleitungen).

Die Motoren werden mit den 6 herausgeführten Ständerwicklungsenden geliefert, so daß die Ständerwicklung in Stern z. B. an 380-V-Netze und in Dreieck an 220-V-Netze gelegt werden kann. Der Motor ist auf diese Weise für diese beiden Netze verwendbar; sein Leistungsschild trägt die Bezeichnung 380/220 V. Auch der Anlasser bei Schleifringmotoren bleibt der gleiche, nur der Ständerschalter ist der jeweiligen Ständerstromstärke anzupassen. Die Umkehrung der Drehrichtung wird durch Vertauschen zweier beliebiger Außenleiter bewirkt.

Kurzschlußläufermotoren

Kurzschlußläufermotoren mit *Einfachkäfigläufer* oder *Rundstabläufer* sind die allereinfachsten Motoren mit bestem Wirkungsgrad und Leistungsfaktor, haben jedoch hohe Anlaufstromstärke: Man verringert sie durch Ständeranlasser, Anlaßtransformatoren und Sterndreieckschalter oder durch Kupplung des Motors über eine Rutschkupplung mit der angetriebenen Maschine. Auch Zweifachwicklung und Polumschaltung werden angewendet. Mittels Sterndreieckschaltung können normale 380/220-V-Motoren nur an 220-V-Netze (Außenleiterspannung) angeschlossen werden. Für 380-V-Netze sind Motoren nötig, die bei 380 V in Dreieck geschaltet sind.

Die Motoren sind für Spannungen bis 500 V mit Leistungen bis zu 500 kW standardisiert. Bei Sterndreieckschaltung fallen die Verbindungsstücke am Klemmenbrett fort, und die Klemmen Y, Z, X werden an den Umschalter angeschlossen.[1])

Die Schaltungen der Kurzschlußläufermotoren sind im Bild 4.104 wiedergegeben. Die Anordnung der Stäbe ist aus Bild 4.105 ersichtlich. Für verschiedene Kurzschlußläufermotoren sind in Tabelle 4.59 Anzugsmomente und Anlaufstromstärken

Tabelle 4.59: Anzugsmomente und Anlaufstrom für Kurzschlußläufermotoren

Motor	Anzugsmoment	Anlaufstrom
1. Einfachkäfigläufer bis 7,5 kW	2···2,8fach	5···7fach
2. Doppelkäfigläufer von 10 kW ab	1,6···2fach	4···5,1fach
3. Hochstabläufer von 20 kW ab	0,8···1,5fach	4···4,8fach

angegeben. Die Werte beziehen sich auf Nenndrehmomente und Nennströme. η und cos φ der Motoren zu 2 und 3 sind 1···2% geringer als bei den Motoren zu 1.

[1]) Ortsveränderliche Motoren haben meist aufgebauten Sterndreieckschalter. Hochspannungs-Kurzschlußmotoren werden für 6000 V mit Leistungen bis 1500 kW gebaut.

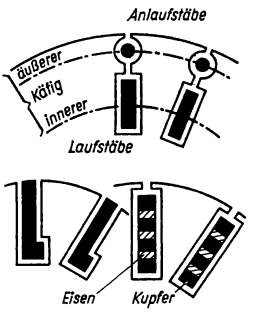


Bild 4.105. Anordnung der Stäbe bei Kurzschlußläufermotoren

Stromverdrängungsmotoren

Stromverdrängungsmotoren besitzen entweder *Doppelkäfigläufer* oder *Hochstabläufer* (Bild 4.106). Die Stäbe der Doppelkäfige liegen konzentrisch in den Nuten, die sie verbindenden Kurzschlußringe können für beide Käfige gemeinsam sein. Bei Stillstand ist der Scheinwiderstand des inneren (Lauf-)Käfigs sehr groß; der Läuferstrom wird in die Anlaufstäbe (äußerer Käfig) abgedrängt und gibt hier ein großes Anzugsdrehmoment. Beim Lauf wird der Scheinwiderstand der Laufstäbe klein, der Strom wählt den inneren Käfig mit dem kleinen ohmschen Widerstand.

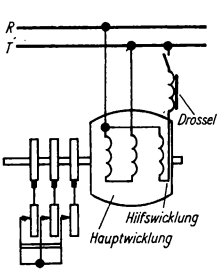


Bild 4.106. Schaltungen der Stromverdrängungsmotoren

Wirbelstromläufer (Hochstabläufer) besitzen tiefe Nutenstäbe oder solche mit Stahlzwischenlagen. (Auch die Stirnringe können aus Stahl sein: Sie dienen dann zur Erhöhung des Läuferwiderstandes beim Anlauf.) Die beim Anlauf auftretende Gegenkraft ist am inneren Stabende am größten. Der Strom wird daher beim Anlauf nach außen, also auf einen kleineren Querschnitt (höherer Widerstand) gedrängt.

Asynchrone Zweiphasenmotoren arbeiten wie Drehstrommotoren.

Induktionsmotoren für Einphasenstrom haben bei Stillstand kein Drehmoment. Der Ständer hat als Hauptkreis zwei in Reihe liegende Zweige einer Drehstromwicklung oder einen Zweig einer Zweiphasenwicklung. Dieser Hauptkreis erzeugt zunächst ein feststehendes magnetisches Wechselfeld. Der Läufer ist zwei- oder dreiphasig (Kurzschluß- oder Schleifringwicklung).

Beim Lauf entsteht durch die Läuferströme ein um 90° gegen das Ständerfeld verschobenes Querfeld und damit ein Drehmoment in der Laufrichtung. Die Leistung eines Einphasenmotors ist etwa 30% geringer, der Wirkungsgrad 3···4% geringer als bei einem gleich großen Drehstrommotor.
Zum Anlassen muß bei Stillstand ein Drehfeld erzeugt werden. Man benutzt hierzu den noch freien Zweig der Ständerwicklung (Hilfsphase) und erzeugt in ihm durch eine Drosselspule oder einen Kondensator einen um 90° verschobenen Strom.
Nach dem Anlassen wird die Hilfsphase wieder abgeschaltet. Einphaseninduktionsmotoren mit Kommutatoren laufen als Repulsionsmotoren (s. S. 291) an.

Doppelkranmotoren

Als Doppelkranmotor baut man einen Motor mit zwei Läuferwicklungen und Polumschaltung. Bei der hohen Polzahl (niedrigen Drehzahl von 0···750 min^{-1}) arbeitet die widerstandsarme Phasenläuferwicklung, bei der niedrigen Polzahl (hohen Drehzahl von 750···1500 min^{-1}) die hochohmige Käfigwicklung.

Schleifringmotoren

Die Ständerwicklungen und Ständerklemmenbrettschaltungen (Bild 4.107) sind die gleichen wie beim Kurzschlußläufermotor. Die 3 Enden der in Stern geschalteten Läuferwicklung führen über Schleifringe mit Bürsten zu den Klemmen u, v, w, an die der Läuferanlasser angeschlossen wird, der die Enden über Widerstände allmählich kurzschließt (Bild 4.107a). Man führt die Läuferwicklung auch zweiphasig aus. Der Verbindungspunkt der beiden Phasen wird mit x/y bezeichnet und zu einem Schleifring geführt, so daß auch hier 3 Schleifringe nötig sind (Bild 4.107b).

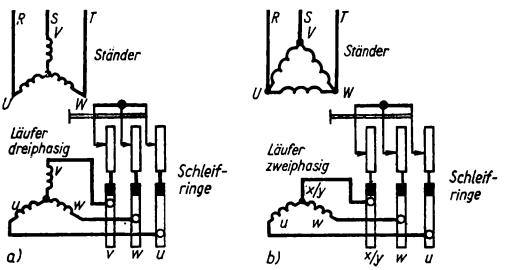


Bild 4.107. Schaltungen der Schleifringmotoren
a) Läufer dreiphasig, b) Läufer zweiphasig

Dafür wird aber der Anlasser einfacher, der Strom je Schleifring bei gleicher Schleifringspannung größer. Die Schleifringläuferspannungen, die nach Einschalten des Ständerschalters vor dem Anlasser auftreten, richten sich nach der Art der Wicklung des Läufers. Sie müssen auch bei Motoren über 1000 V so gehalten sein, daß keine Gefährdung von Personen beim Anlassen eintreten kann. Die Anlaßspannung zwischen 2 Schleifringen beträgt bei den normalen Motoren 28···400 V. Leicht zugängliche und ortsveränderliche Motoren werden mit Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung versehen, durch die die Schleifringe nach dem Kurzschließen durch den Anlasser kurzgeschlossen und die Bürsten abgehoben werden. Dadurch fällt der Verlust in den Anlasserleitungen weg (besserer Wirkungsgrad), und der Bürstenverschleiß wird geringer. Zum Abschalten des Ständers ist stets ein dreipoliger Schalter (Selbstschalter, Motorschutzschalter oder Schütz mit Bimetall-Relais) erforderlich. Werden nur drei Sicherungen als Schutz benutzt, besteht die Möglichkeit, daß nur eine Sicherung abschmilzt, der Motor weiterläuft und dadurch überlastet wird. Anlasser, Selbstschalter, Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung werden stets miteinander mechanisch oder elektrisch gekuppelt und verriegelt, so daß keine Fehler in der Reihenfolge der Bedienung gemacht werden können. Die Drehzahl kann durch Einschalten von Widerständen vor die Läuferwicklung, etwa im Läuferanlasser selbst, abwärts verstellt werden. Diese Regelung bringt jedoch eine Verschlechterung des Wirkungsgrades proportional der Drehzahlminderung und bedingt eine Herabsetzung der Leistung. Eine sprungweise Verstellung kann bei Kurzschlußläufern durch die Umschaltung der Ständerwicklung auf eine Teilpolzahl (Polumschaltung) herbeigeführt werden. Die Motoren verlieren jedoch dadurch den großen Vorteil der Einfachheit. Für verlustlose Drehzahländerung bis 1:3 verwendet man den *Drehstromkommutatormotor*, der auf S. 292f. beschrieben ist.

Synchronmotoren

Aufbau und Wirkungsweise

Aufbau und Wirkungsweise des Synchronmotors sind denen des Generators gleich. Der Synchronmotor (Schaltungen im Bild 4.108) bedarf demnach einer Gleichstromerregung.
Die Drehzahl ist genau gleich der des umlaufenden Drehfeldes. Der Motor muß durch einen asynchronen Anwurfmotor auf diese Drehzahl, außerdem auf gleiche Phase gebracht (synchronisiert) werden. Heute verwendet man die sogenannte Dämpferwicklung zum Anlassen. Der Motor läuft dann mit dieser Wicklung asynchron an. Bei sehr starker Überlastung fällt der Motor außer Tritt und bleibt stehen. Er ist daher an eine bestimmte Nennhöchstlast gebunden. Der Motor hat jedoch den großen Vorzug, daß sein Leistungsfaktor ($\cos\varphi$) = 1 gemacht werden kann; er kann sogar, wenn er übererregt wird, voreilenden Strom hervorbringen und damit den nacheilenden der Asynchronmotoren ausgleichen, also als *Phasenschieber* wirken. Man verwendet ihn daher zu diesem Zweck in Netzen mit schlechtem Leistungsfaktor.

Der *synchronisierte Asynchronmotor* ist ein Asynchron-Schleifringmotor, dessen Läuferwicklung der Gleichstrom einer mitlaufenden Gleichstromerregermaschine überlagert ist. Er läuft bei Vollast als Synchronmotor ($\cos\varphi = 1$), bei Überlast als Asynchronmotor weiter und liefert zwischen Leerlauf und Vollast selbsttätig Blindstrom an das Netz zurück, der den Gesamtleistungsfaktor der Anlage verbessert. Der synchronisierte Asynchronmotor wird für Leistungen von 15 kW an aufwärts gebaut.

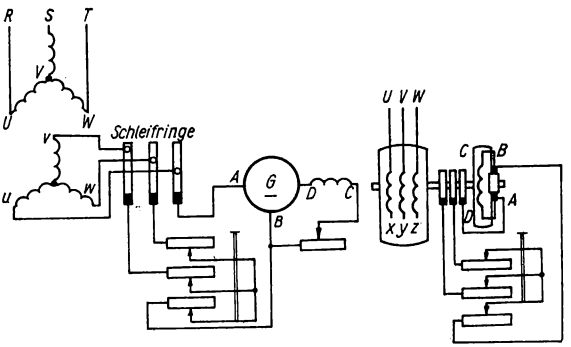


Bild 4.108. Schaltungen der Synchronmotoren

Drehstrommotoren am Einphasennetz

Der Anschluß von Drehstrommotoren am Einphasenwechselstromnetz ist möglich. Dazu bedarf es einer Schaltungsänderung am Klemmenbrett und der zusätzlichen Anordnung eines Kondensators (Bilder 4.109 und 4.110). Der Kondensator ist zur Erzeugung eines symmetrischen Spannungssystems und damit zur Verbesserung des Betriebsverhaltens bei einphasiger Speisung erforderlich.

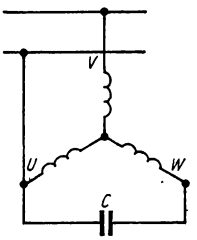


Bild 4.109. Asynchronmotor in Sternschaltung am Einphasennetz

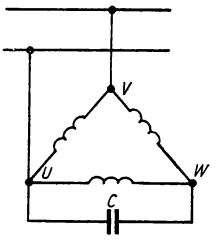


Bild 4.110. Asynchronmotor in Dreieckschaltung am Einphasennetz

Bei geeigneter Bemessung des Kondensators entwickelt der Motor im Stillstand etwa 25% seines Nennmomentes und kann bis zu 80% seiner Nennleistung belastet werden:

$$X_C = \frac{1 - Z}{2 \sin \varphi}.$$

φ Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung,
Z Scheinwiderstand einer Motorphase für den betreffenden Betriebszustand bei dreiphasiger Speisung.

Einphasen-Kommutatormotoren

Reihenschlußmotor

Der Aufbau der Einphasen-Kommutatormotoren gleicht dem der Gleichstrommotoren bis auf das Magnetgestell, das nicht massiv ist, sondern wie der Läufer aus Blechpaketen besteht. Ihre Drehzahl ist von der Frequenz des Wechselstromes unabhängig.
Die Schaltungen des Motors sind im Bild 4.111 wiedergegeben.

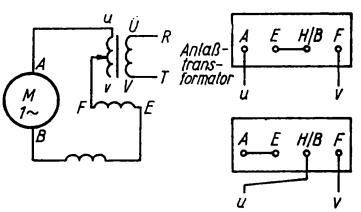


Bild 4.111. Schaltungen des Einphasen-Reihenschluß-Kommutatormotors

Wirkungsweise: Bekanntlich ändert ein Gleichstrommotor seine Drehrichtung nicht, wenn man die Zuleitungsdrähte vertauscht, d. h., wenn die Stromrichtung im Motor geändert wird. Ein an eine Wechselstromquelle angeschlossener Gleichstrommotor wird daher ebenfalls umlaufen. Der gewöhnliche Gleichstrommotor würde aber infolge der hohen Induktivität (Selbstinduktion) seiner Wicklungen einen sehr schlechten Leistungsfaktor haben und dadurch einen relativ hohen Strom aufnehmen. Man bringt daher auf dem Magnetgestell, das in der Regel keine ausgeprägten Pole aufweist, eine zweite Wicklung auf, die das vom Läufer herrührende Magnetfeld aufhebt (*Kompensationswicklung*). Die Richtung des Stromes in den Drähten dieser Wicklung muß entgegengesetzt derjenigen der gegenüberliegenden Läuferdrähte sein. Die Ständerwicklung erhält aus dem gleichen Grunde wenige Windungen (schwaches Feld). Die Funkenbildung am Kommutator schränkt man durch Wendepole ein. Kompensationswicklungen werden auch bei Gleichstrom-Turbo-Generatoren verwendet. Auf diese Weise erhält man den *kompensierten Einphasen-Reihenschlußmotor* mit den gleichen Eigenschaften wie der Gleichstrom-Reihenschlußmotor (s. S. 288). Zum Anlassen und Einstellen benutzt man einen Stufentransformator, der dem Motor die Spannung nach und nach aufdrückt (Bahnbetrieb).

Repulsionsmotor oder Kurzschlußmotor[1])

Ständer- und Läuferwicklungen eines Wechselstrommotors bilden zusammen einen Transformator. Schließt man die unter den Polen N und S stehenden Läuferwindungen kurz, so wird in dem Kurzschlußstück ein starker Strom entstehen (Transformator mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung). Der Läufer wird sich jedoch nicht drehen, da, wie aus Bild 4.112a ersichtlich, in jeder Läuferhälfte die nach vorn fließenden Ströme den nach hinten fließenden das Gleichgewicht halten. Verstellt man dagegen die kurzgeschlossenen Bürsten im Sinne des Uhrzeigers, so werden die auf der linken Seite in der Mehrheit befindlichen, nach vorn fließenden Ströme den gleichen Weg wie vorher über die kurzgeschlossenen Bürsten nehmen und nur durch die Ströme in den Läuferstäben a, b in ihrer Spannung etwas abgeschwächt werden. Ebenso verhält es sich mit der rechten Läuferhälfte. Das Gleichgewicht der Läuferhälften ist jetzt verschoben. Es stehen in der oberen Läuferhälfte unter dem Nordpol mehr Strom nach vorn als nach hinten führende Drähte, ebenso unter dem Südpol mehr Strom nach hinten als nach vorn führende Drähte. Die Lage der stromdurchflossenen Drähte zu den Polen gibt eine Drehung im Uhrzeigersinn. Daran ändert sich auch nichts, wenn im nächsten Augenblick der Strom im ganzen System seine Richtung ändert, da ja auch die Läuferdrähte hierbei ihren Stromfluß ändern.
Dieser Motor hat den Vorteil, daß er nur Zuleitungen zu dem Ständer benötigt, also für hohe Spannung gebaut werden kann. Das Anlassen, die Drehzahleinstellung und die Drehsinnänderung werden durch Verstellen des Bürstenträgers, also mechanisch bewirkt. Die Repulsionsmotoren besitzen ebenfalls Reihenschlußcharakter. Das Magnetfeld steht schräg zur Bürstenachse (s. Bild 4.112b).

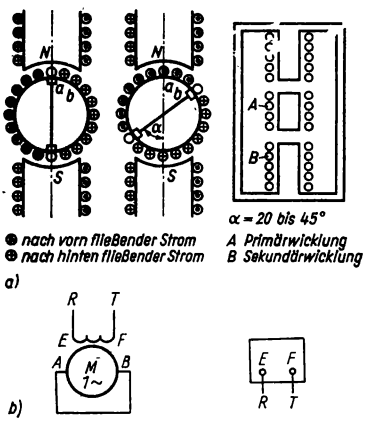


Bild 4.112. Einphasen-Kurzschluß-Kommutatormotor
a) Aufbau, b) Schaltungen

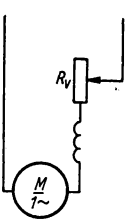


Bild 4.113. Schaltung des Universalmotors

Universalmotor

Der Universalmotor (Schaltungen im Bild 4.113) kann an Gleich- oder Wechselspannungen angeschlossen werden. Der Vorwiderstand R_V dient zur Drehzahlverstellung.

[1]) Repulsion bedeutet Abstoßung.

Einphasen-Reihenschluß-Kommutatormotoren haben nur noch größere Bedeutung als Bahnmotoren, Repulsionsmotoren, Kran- und Aufzugsmotoren. Des weiteren finden sie als Kleinmotoren für Büro- und Haushaltmaschinen Verwendung.

Einphasen-Induktionsmotor

Der Einphasen-Induktionsmotor besitzt denselben mechanischen Aufbau wie ein Drehstrommotor. Im Ständer sind eine Haupt- und eine Hilfswicklung untergebracht (Bild 4.114). Die Hilfswicklung dient zum Anlassen des Motors. Bei verschiedenen Arten wird diese wieder vom Netz getrennt, nachdem der Motor angelaufen ist. Der Läufer kann entweder einen Kurzschlußkäfig oder Wicklungen über Schleifringe haben. Der Kurzschlußkäfig dominiert.

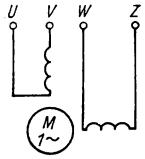


Bild 4.114. Einphasen-Induktionsmotor (U – V Hauptwicklung, W – Z Hilfswicklung)

Der Einsatz von Einphasen-Induktionsmotoren erfolgt dort, wo kein Drehstromnetz zur Verfügung steht. Die obere Leistungsgrenze liegt bei 2 kW. Hauptsächlichste Anwendungsgebiete sind Kleinantriebe, wie sie für Haushalts- und Büromaschinen sowie für kleinere Lüfter und Elektrowerkzeuge benötigt werden. Häufigere Anwendung im unteren Leistungsbereich (bis etwa 200 W) finden Spaltpolmotoren, die infolge ihrer Kurzschlußwindungen und den dabei auftretenden Stromwärmeverlusten nachteilig sind.
Zur Erzeugung eines Anzugsmoments ist es notwendig, im Stillstand das von der Hauptwicklung hervorgerufene Wechselfeld in ein Drehfeld umzuwandeln. Das geschieht durch Zufuhr eines Stromes in der Hilfswicklung, der gegenüber dem Strom in der Hauptwicklung phasenverschoben ist. Dazu wird die Hilfswicklung über ohmsche, induktive oder kapazitive Widerstände an das Netz gelegt (Bild 4.115).

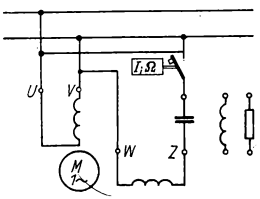


Bild 4.115. Anlaßschaltung eines Einphasen-Induktionsmotors mit Hilfswicklung

Nach erfolgtem Hochlauf wird die Hilfswicklung entweder mittels eines stromabhängigen Hilfsschützes oder eines auf der Motorwelle sitzenden Fliehkraftschalters abgeschaltet. Es gibt auch spezifische Anlaßschalter. Das Motorverhalten nach Abschalten der Hilfswicklung unterscheidet sich im stationären Betrieb nicht von dem des Motors mit Hilfswicklung.

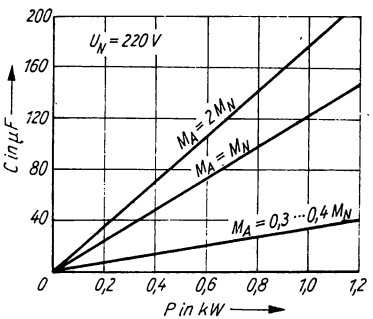


Bild 4.116. Richtwerte für die Ermittlung des Anlaufkondensators
M_A Anzugsmoment, M_N Nennmoment

Bei Einsatz von kapazitiven Widerständen wird in der Hilfswicklung ein voreilender Strom erzeugt und damit eine Erhöhung der Anzugsmomente erreicht. Motoren mit Anlaufkondensatoren in der Hilfsphase entwickeln im Stillstand je nach Auslegung und Größe des Kondensators etwa das 1···3,5fache Nennmoment. Der Einschaltstrom überschreitet dabei nicht den 3···5fachen Wert des Nennstromes. Richtwerte der erforderlichen Kondensatorgröße bei 220 V können Bild 4.116 entnommen werden.
Wird ein Motor mit guten Anlaufeigenschaften bei sehr großem Anzugsmoment (bis zu 350% M_N) gefordert, so sind zwei Kondensatoren vorzusehen. Der eine kleiner dimensionierte dient der Unterstützung des Anlaufes und verbleibt nach Anlauf in der Schaltung, während der zweite wegen der zu starken Erwärmung der Hilfswicklung nach Anlauf abgetrennt werden muß.

Drehstrom-Kommutatormotoren

Reihenschlußmotor (Bild 4.117)

Der Ständer trägt eine Dreiphasenwicklung. Der Läufer ist wie bei den Einphasen-Kommutatormotoren ein Gleichstromanker. Die 3 Bürsten des Läufers sind um 120° gegeneinander versetzt und mit den Enden des Ständers entweder unmittelbar oder zur Vermeidung zu hoher Kommutatorspannungen durch Zwischentransformator verbunden (Bild 4.117a). Anlassen und Drehzahleinstellung erfolgen wie beim Repulsionsmotor durch Verschieben der Bürsten entgegen dem Drehsinn. Stelltransformatoren werden ebenfalls bei hohen Spannungen und zur Drehzahleinstellung verwendet (Bild 4.117b). Bei Motoren mit doppeltem Bürstensatz verteilt sich der Läuferstrom auf die doppelte Zahl der Bürsten (Bild 4.117c). Der Wirkungsgrad ist etwas geringer als bei den Asynchronmotoren, der Leistungsfaktor ist jedoch nahezu 1; Voreilung des Stromes ist erreichbar. Zur Drehsinnänderung sind die Bürsten entgegengesetzt zu verschieben und 2 Außenleiter zu vertauschen. Die Drehzahl

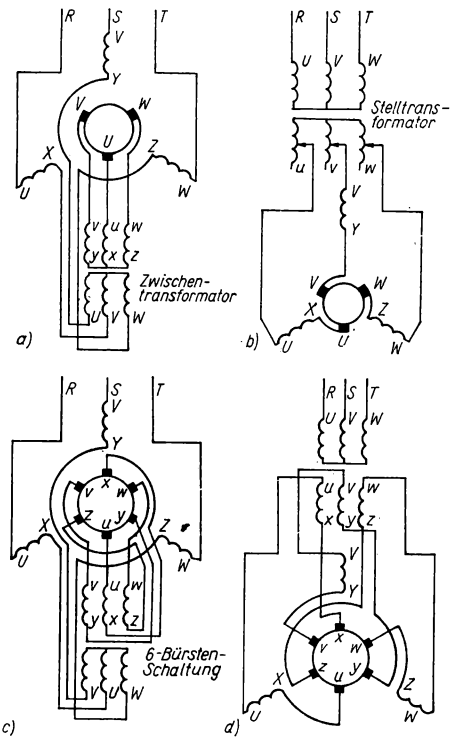


Bild 4.117. Schaltungen des Drehstrom-Reihenschluß-Kommutatormotors
a) mit Zwischentransformator, b) mit Stelltransformator, c) mit 6-Bürsten-Schaltung, d) mit vertauschten Bürsten

des Motors ist unabhängig von der Frequenz. Reihenschlußcharakteristik und Anwendungsgebiet s. Gleichstrom. Die Motoren werden für Dauer- (S 1) und Aussetzbetrieb (S 2, S 3, S 4) gebaut. Ausführung meist geschlossen mit Außenbelüftung. Stellbereich mit Nenndrehmoment: 0,5···1,0 der Nenndrehzahl, bei verringertem Drehmoment bis zu 1,3facher Nenndrehzahl.

Drehstrom-Nebenschlußmotor

Die Schaltungen ständergespeister und läufergespeister Drehstrom-Nebenschlußmotoren sind den Bildern 4.118 und 4.119 zu entnehmen.

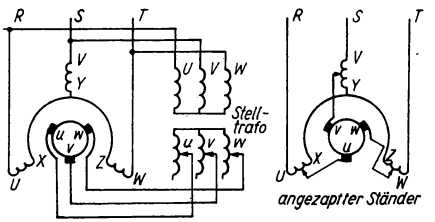


Bild 4.118. Ständergespeister Drehstrom-Nebenschlußmotor

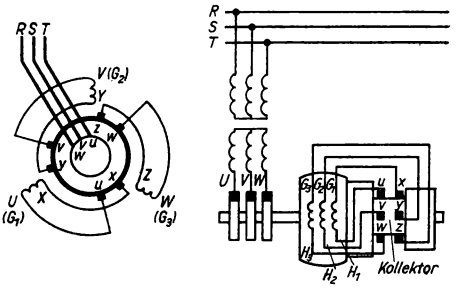


Bild 4.119. Läufergespeister Drehstrom-Nebenschlußmotor

Ständergespeist: Ständer und Läufer sind wie beim Drehstrom-Reihenschlußmotor gebaut. Man unterscheidet Nebenschlußmotoren mit Nebenschlußabzweig vor dem Ständer (mit besonderem Stelltransformator), solche mit Abzweig an der angezapften (als Spartransformator wirkenden) Ständerwicklung und solche mit Abzweig im Läufer. Der Stelltransformator und die Ständerwicklung können über den Nullpunkt hinaus verlängert werden, um dem Läufer höhere Spannung zuzuführen und ihn dadurch übersynchron laufen zu lassen. Der Motor hat Nebenschlußcharakteristik (s. Gleichstrom-Nebenschlußmotor). Er wird durch den Stelltransformator, die Ständeranzapfungen oder beim Motor mit Läuferabzweig durch Verschieben der Bürsten angelassen und auf die Drehzahl eingestellt. Drehsinnänderung wird durch Vertauschen von zwei Zuleitungen und beim Läuferabzweigmotor außerdem durch Verstellen der Bürsten hervorgerufen. Der Leistungsfaktor cos φ wird auch hier nahezu 1.

Die Motoren mit Ständerspeisung werden in der Regel für hohe Leistungen (bis zu 500 kW) und Spannungen über 1000 V gebaut.

Läufergespeist: Für Motoren bis etwa 100 kW und Spannungen bis 500 V die gebräuchlichste Bauart. Der Läufer dieses Motors besitzt außer einer Dreiphasenwicklung, die über 3 Schleifringe aus dem Netz gespeist wird, noch eine in den gleichen Nuten liegende Trommelwicklung mit Kommutator, in der transformatorisch eine niedrige Drehstromspannung erzeugt wird. Durch 2×3 gegenläufige Bürsten können hiervon veränderliche Spannungswerte abgegriffen und als Zu- oder Absatzspannung der im feststehenden Teil liegenden Läuferwicklung (Schlupffrequenz) zugeführt werden. Stehen je zwei korrespondierende Bürsten auf der gleichen Kommutatorlamelle, so ist die Läuferwicklung in sich kurzgeschlossen, und der Motor arbeitet wie ein normaler Kurzschlußläufer, wobei aber Ständer und Läufer ihre Rollen vertauscht haben. Durch Verschieben der zwei Bürsten wird in die Läuferwicklung die erwähnte Zu- oder Absatzspannung eingespeist, so daß der Motor dann über- oder untersynchron arbeitet. Anlassen und Drehzahleinstellung erfolgen lediglich durch Bürstenverschiebung. Der Leistungsfaktor ist nahezu 1 oder bei hohen Drehzahlen voreilend.

Kompensierter Drehstrom-Asynchronmotor

Der fremderregten Erregermaschine nach Bild 4.120 wird über einen regelbaren Netztrafo die Netzfrequenz zugeführt und durch den Kommutator in die Schlupffrequenz umgewandelt. Da hierbei eine bestimmte Phasenlage erforderlich ist, muß sie mit dem Hauptmotor über ein verstellbares Zahnrad- oder Planetengetriebe gekuppelt werden. Bei Fremderregung spielt die Belastung des Hauptmotors keine Rolle; er kann auch als reiner Phasenschieber verwendet werden.

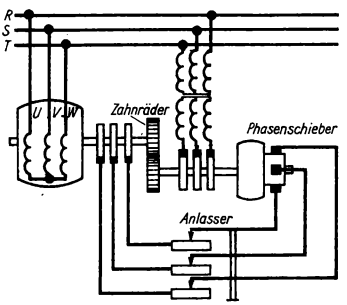


Bild 4.120. Schaltung der fremderregten Erregermaschine

Der Magnetisierungsstrom wird hierbei dem Läufer durch eine besondere Drehstrom-Erregermaschine (Phasenschieber) zugeführt. Bei der eigenerregten Erregermaschine (direkt gekuppelt als Hintermaschine oder mit Hilfsmotor angetrieben) wird ihrem Kommutator über die Schleifringe der Läuferstrom des Hauptmotors zugeführt. Die Kompensation setzt also eine Mindestbelastung desselben voraus (Bild 4.121).

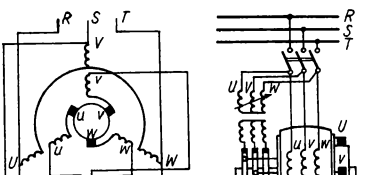


Bild 4.121. Schaltung der eigenerregten Erregermaschine

Leistungen der Wechselstrommotoren

In Tabelle 4.60 ist die Grundreihe wiedergegeben.

4.3.3.3. Linearmotoren

Drehstromlinearmotor

In neuester Zeit gewinnt in der Antriebstechnik ein neues Element, der *Wanderfeld-Linearmotor*, große Bedeutung. Sein Anwendungsgebiet liegt insbesondere dort, wo Linearbewegungen

Tabelle 4.60: Leistungsreihe der Wechselstrommotoren (in kW)

0,6	0,8	1,1	1,5	2,2	3	4	5,5	7,5	10	13	17	22	30	40	55	75	100	125
160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1500	1800	2100	2500	3000	3500	4200	5000	—

realisiert werden müssen, da der robuste und wartungsarme Drehstromlinearmotor keine Umformung der rotatorischen Bewegung in translatorische erfordert. Das kommt sehr häufig vor, z. B. bei Türenöffnung, Materialtransport, im Verkehrswesen.

Aufbau: Der Wanderfeld-Linearmotor besteht aus einem kammartigen linearen, d. h. ebenen Ständer, in den die Wicklungen eingelegt sind. Wenn man den Ständer eines Drehstromasynchronmotors aufschneidet und in die Ebene abrollt, so erhält man eine flache, ebene Magnetisierungseinrichtung. Die wie beim Asynchronmotor in die Nuten eingelegte Drehstromwicklung baut bei dreiphasigem Anschluß ein Magnetfeld auf, das längs des Ständers verläuft (Bild 4.122).
Bringt man in dieses magnetische Wanderfeld einen flachen, ebenen Leiter, so werden darin Spannungen induziert, die Wirbelströme antreiben (Bild 4.123).

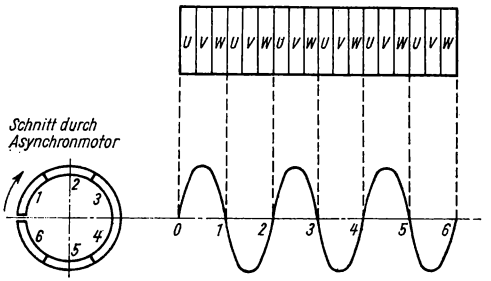


Bild 4.122. Ständer mit Wicklunganordnung und Drehfeld des Linearmotors

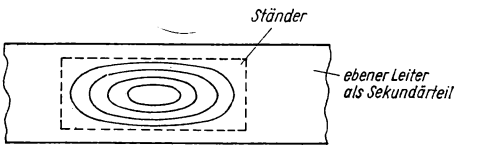


Bild 4.123. Wirbelstromverlauf bei ebenem, flachem Leiter als Sekundärteil

Beide, wanderndes Magnetfeld und Wirbelströme, stehen senkrecht aufeinander und verursachen, ähnlich wie beim rotierenden Motor, eine Kraftwirkung, die den Läufer längs der Ständerwicklung bewegt. Entsprechend der konstruktiven Ausführung unterscheidet man folgende 3 Formen:

Kurzständertyp: Die antreibende Kraft wirkt so lange auf den Läufer (Sekundärteil), solange er sich im Ständerbereich befindet. Nur ein Teil des Sekundärteils dient jeweils der Kraftbildung (Bild 4.124).

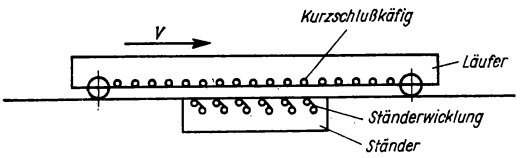


Bild 4.124. Kurzständertyp

Kurzläufertyp: Der Sekundärteil (Läufer) wird ständig vom Magnetfeld beeinflußt, jedoch nur der Teil des Ständers, dem der Sekundärteil gegenübersteht, wird wirksam (Bild 4.125).

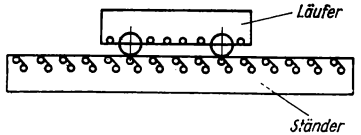


Bild 4.125. Kurzläufertyp

Kurzständer-Kurzläufer-Anordnung: Die Krafterzeugung erfolgt nur dann, wenn sich Ständer und Läufer ganz oder teilweise gegenüberstehen. Es werden Kraftimpulse erzeugt, so daß man von Pulsanordnung spricht (Bild 4.126).

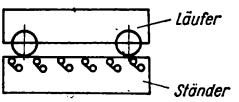


Bild 4.126. Kurzständer-Kurzläufer-Anordnung

Die Anordnung von Läufer und Ständer kann auch rund sein.
Besondere *Vorteile des Linearmotors* in der Förder- und Antriebstechnik:

Linearmotoren sind unmittelbar in der Lage, geradlinige (translatorische) Bewegungen zu erzeugen.
Die Kraft wird ohne mechanische Berührung auf einer großen Fläche auf die Läuferschiene übertragen.
Die Zugkraft wird unabhängig von der Haftreibung übertragen, d. h., es lassen sich auch große Steigungen mit leichten Fahrzeugen überwinden.
Es sind höhe Beschleunigungs- und Verzögerungswerte möglich.
Der lineare Antriebsmotor benötigt keine Zahntriebe, Transmissionen, Wellen, Differentiale, Lager usw.
Es gibt kaum Verschleiß im Antriebssystem, die Wartungs- und Betriebskosten sinken auf ein Minimum; auch das Bremsen, bei elektrischer Bremsung, erfolgt verschleißfrei.
Die Fliehkraft stellt keine Geschwindigkeitsgrenze dar. Der Antrieb erfolgt geräusch- und schwingungsarm.

4.3.3.4. Anschluß von Drehstrommotoren

Die Anschlußbedingungen von Motoren sind in TGL 200-0601 »Allgemeine Errichtungsvorschriften« festgelegt. Der Betreiber hat zur Sicherstellung der Energieversorgung die angegebenen Bedingungen zum Betreiben von Motoren zu gewährleisten. (Siehe hierzu 5.3.6. der TGL 200-0601.)[1])
Tabelle 4.61 enthält eine Auswahl aus dem Zubehör von Drehstrom-Einheitsmotoren für verschiedene Spannungen.

Zulässige Zuleitungslänge

Die Zuleitungslängen lassen sich in Abhängigkeit von den Motorleistungen berechnen. Dazu werden Mittelwerte für den Leistungsfaktor und den Motornennstrom verwendet.

$$I_N = \frac{P \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta},$$

$$I_W = I_N \cdot \cos\varphi \cdot f,$$

$$I_b = I_N \cdot \sin\varphi \cdot (0{,}6 + 0{,}4 \cdot f),$$

$$I = \sqrt{I_W^2 + I_b^2},$$

$$l_1 = \frac{U_{\%} \cdot A \cdot \varkappa \cdot l}{I \cdot \cos\varphi \cdot 173}$$

für Querschnitte von 2,5···50 mm²;

$$l_2 = l_1 \frac{1}{1 + \tan\varphi \cdot X_L \cdot A \cdot \varkappa}$$

für Querschnitte < 50 mm².

I_N Nennstrom in A,
I_W Wirkstrom in A,
I_b Blindstrom in A,
I tatsächlicher Belastungsstrom in A,
f Reduktionsfaktor des Leiters,
A Querschnitt in mm²,
$\varkappa$ Leitfähigkeit in $\frac{m}{mm^2 \cdot \Omega}$,
l Leiterlänge in m,
$U_{\%}$ zulässiger Spannungsabfall in %,
U Nennspannung in V,
P Nennleistung in kW,
η Motorwirkungsgrad,
X_L Blindwiderstand

[1]) Siehe auch S. 263 ff.

Tabelle 4.61: Zubehör von Drehstrom-Einheitsmotoren

Motor		Normallast				Schwerlast			Flexibler Motoranschluß NSH
P_n	I_n	Sicherungs-schmelz-einsatz	Schütz	Wärmerelais Typ Einstellbereich	Motor-schutz-schalter	Sicherungs-schmelz-einsatz	Schütz	Wärmerelais Typ Einstellbereich	
kW	A	A	Typ	A	A	A	Typ	A	mm
a) Auswahl für Nennspannungen 380 V									
0,16	0,42···0,68	2	ID 16	R 16 0,4···0,68	Größe 10 A 0,4···0,6	–	–	–	4 × 1,5
0,25	0,7···1,0	4	ID 16	0,65···1,1	0,6···1,0	–	–	–	4 × 1,5
0,4	1,0···1,6	4	ID 16	1,0···1,7	1,0···1,6	–	–	–	4 × 1,5
0,6	1,5···2,0	6	ID 16	1,0···1,7 1,6···2,8	1,6···2,5	–	–	–	4 × 1,5
0,8	1,9···2,4	6	ID 16	1,6···2,8	1,6···2,5	–	–	–	4 × 1,5
1,1	2,4···3,0	6	ID 16	1,6···2,8 2,6···4,5	1,6···2,5 2,5···4,0	10	ID 16	–	4 × 1,5
1,5	3,4···4,2	10	ID 16	2,6···4,5	2,5···4,0 4,0···6,0	15	ID 16	–	4 × 1,5
2,2	4,7···5,6	10	ID 16	4,3···7,5	4···6	15	ID 16	–	4 × 1,5
3,0	6,5···7,5	15	ID 16	4,3···7,5	6···8	20	ID 16	–	4 × 1,5
4,0	8,4···9,6	20	ID 16	7,2···12,5	8···10	25	ID 16 5 kW	–	4 × 1,5
5,5	11,2···12,6	25	ID 16 7,0 kW	7,2···12,5	Größe 25 A 10···16	35	ID 25	–	4 × 1,5
7,5	15···17	35	ID 25	R 25 10···16 16···25	10···16 16···25	50	ID 25 9,0 kW	–	4 × 1,5
10	19,8···21,4	50	ID 25 12,5 kW	16···25	16···25	50	ID 40	–	4 × 2,5
13	25,6···27	50	ID 40	R 40 25···40	–	60	ID 40 14 kW	–	4 × 4
17	33···35	60	ID 40 20 kW	25···40	–	80	ID 63	–	4 × 6
22	43···45	80	ID 63	R 63 40···60	–	100	ID 63 22 kW	ESG-Grimma 40···100	4 × 6
30	58···61	100	ID 63 30 kW	Ab 100 40···64	–	125	ID 100 37 kW	ESG-Grimma 40···100	4 × 10
40	78···82	125	ID 100 50 kW	64···100	–	160	ID 200 47 kW	ESG-Grimma 40···100	4 × 16
55	106···114	160	ID 200 64 kW	Ab 200 100···140	–	200	ES 160	SB 200 70···200	4 × 25
75	145···155	200	ES 160 80 kW	140·· 200	–	300	ES 160 80 kW	70···200	4 × 50
100	193···207	260	ES 250	BT 400 160·· 280	–	350	ES 250	SB 400 160···280	4 × 70
125	240·· 255	300	ES 250 125 kW	BT 400 160 · 280	–	430	ES 250 125 kW	160···280	4 × 95
160	304···328	350	ES 400	BT 400 280···400	–	500	ES 400	280···400	4 × 150
200	370···400	430	ES 400 200 kW	BT 600 250···420	–	600	ES 400 200 kW	SB 600 250···420	4 × 185
250	460···500	500	ES 630	420·· 600	–	2 × 430	ES 630	–	–
320	590···640	600	ES 630 320 kW		–	2 × 500	ES 630 320 kW	–	–

Tabelle 4.61 (Fortsetzung)

Motor		Normallast				Schwerlast			Flexibler Motoranschluß NSH
		Sicherungsschmelzeinsatz	Schütz	Wärmerelais Typ Einstellbereich	Motorschutzschalter	Sicherungsschmelzeinsatz	Schütz	Wärmerelais Typ Einstellbereich	
P_n	I_n								
kW	A	A	Typ	A	A	A	Typ	A	mm
b) Auswahl für Nennspannungen 500 V									
0,16	0,32···0,52	2	ID 16	R 16 0,25···0,43 0,40···0,68	Größe 10 A 0,25···0,4 0,4···0,6	–	–	–	4 × 1,5
0,25	0,53···0,73	2	ID 16	0,4···0,68 0,65···1,1	0,4···0,6 0,6···1,0	–	–	–	4 × 1,5
0,40	0,80···1,2	4	ID 16	0,65···1,1 1,0···1,7	0,6···1,0 1,0···1,6	–	–	–	4 × 1,5
0,60	1,20···1,50	6	ID 16	1,0···1,7	1,0···1,6	–	–	–	4 × 1,5
0,8	1,45···1,80	6	ID 16	1,0···1,7 1,6···2,8	1,0···1,6 1,6···2,5	–	–	–	4 × 1,5
1,1	1,90···2,30	6	ID 16	1,6···2,8	1,6···2,5	10	ID 16	–	4 × 1,5
1,5	2,6···3,2	6	ID 16	2,6···4,5	2,5···4,0	10	ID 16	–	4 × 1,5
2,2	3,6···4,2	10	ID 16	2,6···4,5	2,5···4,0 4,0···6,0	15	ID 16	–	4 × 1,5
3,0	5,0···5,7	10	ID 16	4,3···7,5	4,0···6,0	15	ID 16	–	4 × 1,5
4,0	6,4 ··7,3	15	ID 16	4,3···7,5	6,0···8,0	20	ID 16 5 kW	–	4 × 1,5
5,5	8,6···9,6	20	ID 16 7,0 kW	7,2···12,5	8,0···10,0	25	ID 25	–	4 × 1,5
7,5	11,5···12,5	25	ID 25	R 25 10···16	Größe 25 A 10···16	35	ID 25	–	4 × 1,5
10	15,2···16,2	35	ID 25	10···16	10···16	35	ID 25 11,5 kW	–	4 × 1,5
13	19,5···20,5	35	ID 25 16 kW	R 40 16···25	16···25	50	ID 40	–	4 × 2,5
17	25,0···26,6	50	ID 40	25···40	–	60	ID 40 17 kW	–	4 × 4
22	33,0···34,2	60	ID 40 25 kW	R 63 25···40	–	80	ID 63 22 kW	–	4 × 6
30	44···46,4	80	ID 63 30 kW	40···60	–	100	ID 100 37 kW	ESG-Grimma 40···100	4 × 10
40	59,3···62,3	100	ID 100 50 kW	Ab 100 40···64	–	125	ID 200 47 kW	ESG-Grimma 40···100	4 × 10
55	80,5···86,5	125	ID 200 64 kW	64···100	–	160	ES 160	ESG-Grimma 40···100	4 × 25
75	110···118	160	ES 160	Ab 200 100···140	–	200	ES 160	SB 200 70···200	4 × 35
100	147···157	200	ES 160 100 kW	BT 200 140···200	–	300	ES 160 100 kW	70···200	4 × 50
125	183···194	260	ES 250	BT 400 160···280	–	350	ES 250	SB 400 160···280	4 × 70
160	231···250	300	ES 250 160 kW	160···280	–	430	ES 250 160 kW	160···280	4 × 95
200	282···304	350	ES 400	BT 400 280···400	–	500	ES 400	280···400	4 × 120
250	350···380	430	ES 400 260 kW	280···400	–	600	ES 400 260 kW	280···400	4 × 185
320	448···486	500	ES 630 420 kW	BT 600 420···600	–	2 × 430	ES 630 420 kW	–	2 × 4 × 95

4.3.4. Anlasser und Steller

Die technischen Forderungen müssen TGL 20478 entsprechen.

Anlasser sind Schalter mit Widerständen zur Verringerung des Einschaltstroms von Elektromotoren, deren Widerstände sich zu Beginn des Anlassens im Motorstromkreis befinden und deren Widerstandswert während des Anlaßvorgangs verkleinert wird.

Steller sind Schalter mit Widerständen zur Änderung des Betriebszustandes elektrotechnischer Betriebsmittel (Stellen), deren Widerstand im Stromkreis dauernd eingeschaltet bleibt.

Anlasser und Steller gibt es in verschiedenen *Ausführungsformen:*

1. Flachbahnausführung: Hier liegen die feststehenden Schaltstücke in einer Ebene und werden von einem oder mehreren Schaltstücken bestrichen.

2. Trommelbahnausführung: Die feststehenden Schaltstücke sind zylindrisch angeordnet und werden von einem oder mehreren Schaltstücken bestrichen.

3. Walzenbahnausführung: Die beweglichen Schaltstücke bilden eine zylindrische Walze; die feststehenden Schaltstücke bestehen aus Einzelfingern, die auf den zugehörigen Ringsegmenten der drehbaren Walze schleifen.

4. Elektrodenbahnausführung: Diese bestehen aus einem elektrolytischen Widerstand und feststehenden und/oder beweglichen Elektroden, die den Stromübergang vermitteln.

Für die Auslegung und Auswahl von Anlassern sind entscheidend:

1. *Anlaßspitzenstrom* I_{An1}*:* höchster Effektivwert des Stromes während des Anlaßvorgangs.

2. *Schaltstrom* I_s: Strom, bei dem das Weiterschalten erfolgen soll.

3. *Mittlerer Anlaßstrom* I_m*:* geometrischer Mittelwert aus Anlaßspitzenstrom und Schaltstrom

$$I_m = \sqrt{I_{An1} \cdot I_s}.$$

4. *Mittlere Anlaßaufnahme* P_m*:* mittlere dem Netz entnommene Leistung

$$P_m = U \cdot I_m \cdot \sqrt{3}^{1}).$$

5. *Anlaßzeit* t_{An1}*;* Zeit zwischen Einschalten und Erreichen des betriebsmäßigen Zustandes.

6. *Anlaßschwere:* Verhältnis mittlere Anlaßaufnahme zu Nennleistung (s. Tabelle 4.62)

$$\frac{P_m}{P_n}.$$

7. *Anlaßzahl z:* Anzahl der hintereinander (mit Pausen gleich der doppelten Anlaßzeit) bis zum Erreichen der Grenztemperatur zulässigen Anlaßvorgänge.

8. *Anlaßhäufigkeit h:* Anzahl der je Stunde in gleichmäßigen Abständen dauernd zulässigen Anlaßvorgänge.

Tabelle 4.62: Zulässige Werte für die Anlaßschwere

Anlasserart	Halblast-anlassen	Vollast-anlassen	Schwerlast-anlassen
Flachbahn- und Trommelbahn-ausführung	0,65	1,3	1,7
Walzenbahn- und Elektrodenbahn-ausführung	0,75	1,5	2,0

Die Grenztemperaturen von Anlassern und Stellern hängen im wesentlichen vom angewandten Kühlmittel ab.

[1]) $\sqrt{3}$ gilt nur für Drehstrom.

Tabelle 4.63: Grenztemperaturen für Kühlmittel, Widerstände und Kapselung

Kühlmittel, Widerstände, Kapselung	Grenz-temperatur °C
austretende Luft bei luftgekühlten Widerstandsgeräten, die räumlich mit einem kontaktgebenden Gerät zusammengebaut sind	210
austretende Luft bei luftgekühlten Widerstandsgeräten, die räumlich nicht mit einem kontaktgebenden Gerät zusammengebaut sind	235
Öl bei ölgekühlten Widerstandsgeräten, die räumlich mit einem kontaktgebenden Gerät zusammengebaut sind	90
Öl bei ölgekühlten Widerstandsgeräten, die räumlich nicht mit einem kontaktgebenden Gerät zusammengebaut sind	115
Sand bei sandgekühlten Widerstandsgeräten	185
Elektrolyt bei elektrolytisch gekühlten Widerstandsgeräten	95
Gehäuse von Widerstandsgeräten	160

4.3.5. Antriebe

Die Beherrschung der Antriebstechnik ist von entscheidender Bedeutung bei der Durchsetzung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts, insbesondere der Automatisierung. Deshalb erhalten komplette Einrichtungen, die automatisch oder von zentraler Stelle (Warte) gestellt bzw. gesteuert werden können, mehr und mehr den Vorrang gegenüber den bisherigen Einzelstellern und Schaltern, die vor Ort bedient werden mußten. Mit den neuen Bauelementen auf Halbleiterbasis wurde die Grundlage für die Herausbildung der *Energieelektronik* geschaffen. Sie ist das wichtigste Bindeglied zwischen der Automatisierung (Informationsverarbeitung) und der Energienutzung.
Unter Energieelektronik versteht man Erzeugnisse, die der direkten *Regelung von Spannung, Strom und Frequenz* dienen. Mit diesen Größen lassen sich in der Antriebstechnik die wesentlichsten Probleme lösen. Energieelektronik wird darüber hinaus auf weiteren Gebieten, die in der Industrie eine wichtige Rolle spielen, angewendet. Der besondere Vorteil der Energieelektronik liegt in der nahezu verlustlosen Regelung. Es ist bekannt, daß der Gleichstrommotor ein ideales Antriebsaggregat darstellt. Die Gleichstromversorgung erfordert jedoch einen erheblichen Aufwand. Die Energieelektronik bietet einen guten Ausgleich, da z. B. bei Anwendung eines Wechselrichters der Anschluß am Drehstromnetz erfolgt, die Antriebsmaschine jedoch ein Gleichstromantrieb sein kann. Hauptsächliches Bauelement bei allen Geräten der Antriebsregelung ist der *Thyristor.*
Eine Übersicht über die Anwendung der Energieelektronik zum Umformen elektrischer Energie enthält 4.3.6.
Einige Beispiele für die Lösung von Antriebsproblemen durch Geräte der Energieelektronik sind nachfolgend aufgeführt.

Wechselstrom- und Drehstromsteller

Vielfach werden *Wechselstromsteller* für die Steuerung der Primärspannung von Transformatoren verwendet. Die anschließende Gleichrichtung der Sekundärspannung wird bei Widerstandsbremsung von Gleichstromfahrmotoren ausgenutzt. Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich für *Drehstromsteller* bei der ständerseitigen Amplitudensteuerung von Asynchronmotoren. Das Prinzip ist im Bild 4.127 dargestellt, wobei hier unter Last als Beispiel Glühlampen einer Helligkeitsregelung vorgesehen sind.
Eine interessante Anwendung für den Anlauf eines Einphasen-Induktionsmotors zeigt Bild 4.128.
Gesteuert vom Anlaufstrom in der Hauptwicklung (1) über einen Stromwandler (4) schaltet der symmetrische Thyristor (5) während des Anlaufvorgangs die Anlauf-Hilfswicklung (2) mit Anlaufkondensator (3) ans Netz. Durch das von beiden Wicklungen erzeugte Drehfeld entsteht ein Anlaufmoment. Sobald der Strom nach erfolgtem Anlauf auf seinen Nennwert abfällt, trennt der symmetrische Thyristor die Anlaufwicklung vom Netz.

Die Schaltung im Bild 4.129 zeigt einen Drehstromsteller für die Drehzahlsteuerung von Asynchronmotoren.

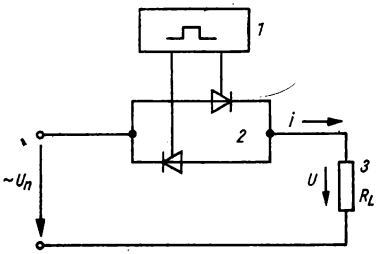


Bild 4.127. Wechselstromsteller mit Wirklast
1 Impulssteuersatz, 2 antiparallele Thyristoren, 3 Verbraucher; U_N Netzspannung, U Verbraucherspannung, i Strom durch Verbraucher, R_L Wirklast

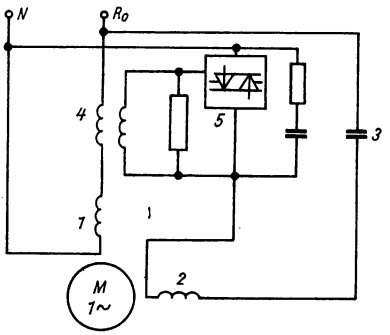


Bild 4.128. Wechselstromsteller für den Anlauf eines Induktionsmotors
1 Hauptwicklung, 2 Anlauf-Hilfswicklung, 3 Anlaufkondensator, 4 Stromwandler, 5 symmetrischer Thyristor

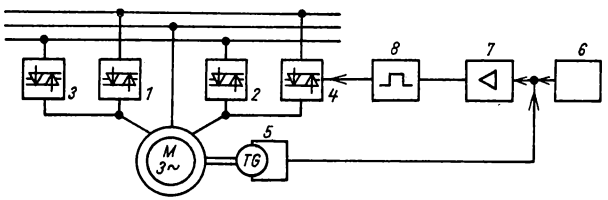


Bild 4.129. Drehstromsteller für die Drehzahlsteuerung von Asynchronmotoren
1···4 symmetrische Thyristoren, 5 Tachogenerator, 6 Sollwertquelle, 7 Regler, 8 Impulssteuersatz

Mit symmetrischen Thyristoren in den Ständerzuleitungen von Asynchronmaschinen kann die Ständerspannung gestellt werden. Das Drehmoment nimmt dabei quadratisch mit der Spannung ab, während der Kippschlupf konstant bleibt. Bei reiner Steuerung der Ständerspannung durch die symmetrischen Thyristoren (d. h. ohne den Regelkreis) ergeben sich die Kennlinien nach Bild 4.130. Dieser Antrieb ist geeignet für Lüfter und Zentrifugalpumpen, wo ein begrenzter Drehzahlstellbereich ausreicht.

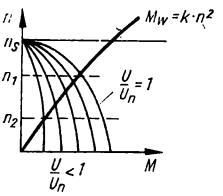


Bild 4.130. Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie bei Steuerung der Ständerspannung

Bei der Anwendung des Regelkreises kann die Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik so verformt werden, daß ein Nebenschluß – mit einstellbarer Drehzahl – entsteht (Bild 4.131). Durch Verwendung von zwei weiteren symmetrischen Thyristoren für Gegenrichtung ist ein kontaktloser Reversierbetrieb (Umkehrbetrieb) möglich.

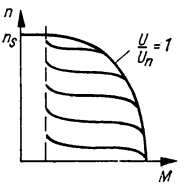


Bild 4.131. Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie bei Drehzahlregelung über die Ständerspannung

Selbstgeführter Drehstromumrichter

Der selbstgeführte Wechselrichter ermöglicht es, ein- oder mehrphasige Wechselspannungen veränderbarer Frequenz und Amplitude aus einer gegebenen Gleichspannung zu erzeugen. Damit steht eine geeignete Energiequelle bereit, um den in seiner Einfachheit und Robustheit nicht zu übertreffenden Drehstrom-Kurzschlußläufermotor mit in weiten Grenzen einstellbarer Drehzahl verlustarm zu betreiben.
Werden Frequenzen unterhalb der halben Netzfrequenz benutzt, so verwendet man den direkten Umrichter, während für Frequenzen oberhalb der halben Netzfrequenz der indirekte Umrichter eingesetzt wird. Das Hauptanwendungsgebiet der indirekten Umrichter, die im Frequenzbereich 20···200 Hz arbeiten, liegt in der Speisung von Drehstrom-Kurzschlußläufermotoren, die sowohl normale Asynchronmaschine als auch Reluktanzmotor sein können. Zum Beispiel wird der Reluktanzmotor für gleichlaufenden Betrieb von vielen hochtourigen Motoren mit einem Drehzahlstellbereich bis 1:2 in der Textilindustrie für die Spinnfasererzeugung bei der Verspinnung und Verzwirnung angewendet.
Aber auch auf anderen Anwendungsgebieten, z. B. in der Walzwerksindustrie (Rollgänge) sowie der chemischen Industrie (für aggressive Atmosphäre), wird der Kurzschlußläufermotor mit Drehzahlstellung durch Frequenzstellung in weiten Grenzen (neuerdings bereits bis zu 500 Hz) angewendet.

Gleichstromsteller

Während die Drehzahl von Gleichstrommotoren bei Speisung aus dem Wechselspannungsnetz schon seit langer Zeit über steuerbare Gleichrichter verlustarm gestellt wird, verwendet man bei der Speisung aus Gleichspannungsnetzen (z. B. Nahverkehr) überwiegend Vorwiderstände. An diese Stelle treten nunmehr Gleichstromsteller, die mit den gleichen Bauelementen sowohl Fahrbetrieb als auch Nutz- und Widerstandsbremsung beherrschen. Die Prinzipschaltung zur Drehzahlsteuerung eines Gleichstrom-Reihenschlußmotors zeigt Bild 4.132.
Während der Einschaltdauer T_e ist der Schalter Z geschlossen, an den Motorklemmen liegt die Spannung U_M. Der Motorstrom i_M steigt an, die Induktivität L_M nimmt Energie auf. Beim anschließenden Öffnen von Z wird der Motor von der

Spannungsquelle getrennt. In diesem Zeitraum, der Ausschaltdauer T_a, hält L_M den Motorstrom über die Freilaufdiode aufrecht, i_M sinkt hierbei ab. Wird die Periodendauer $T = T_e + T_a$ genügend klein gewählt (einige Millisekunden), so fließt im Motor ein welliger, nichtlückender Gleichstrom. Wegen der hohen Schaltfrequenzen muß Z kontaktlos arbeiten, wozu man am besten einen Thyristor verwenden kann und diesen über eine Löscheinrichtung abschaltet (Bild 4.133).

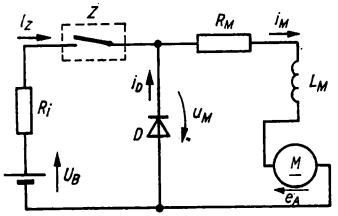


Bild 4.132. Pulsgesteuerter Fahrbetrieb

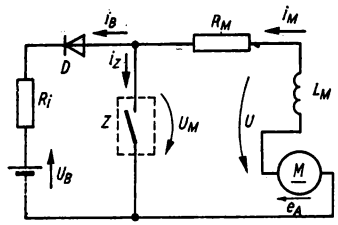


Bild 4.133. Pulsgesteuerte Nutzbremsung

4.3.6. Umformer, Umrichter, Frequenzwandler

4.3.6.1. Rotierende Umformer

Motorgeneratoren

Motorgeneratoren bestehen aus einem Asynchron- oder Synchronmotor, der mit einem Gleichstromgenerator unmittelbar gekuppelt ist. *Vorteil:* einfaches Anlassen, leichte Einstellung der Gleichspannung. *Nachteil:* schlechter Wirkungsgrad, da zwei getrennte Maschinen, deren η sich miteinander multiplizieren (bei Asynchronmotoren Phasenverschiebung). Das Anlassen kann von der Drehstrom- oder Gleichstromseite aus erfolgen, im letzteren Fall ist eine besondere Gleichstromquelle (Batterie) und bei Synchronmotoren Grobsynchronisierung erforderlich.

Einankerumformer

Aufbau wie die Gleichstrommaschinen, jedoch mit Dämpferwicklung. Drei oder sechs symmetrisch liegende Ankerspulen sind angezapft und zu Schleifringen geführt. Als Drehstromsynchronmotor betrachtet, liegen die Pole hier außen und die Ständerwicklung auf dem Anker (Außenpolmaschine). Die Spannung der Drehstromseite beträgt etwa 61% der Spannung der Gleichstromseite. Da die Gleichspannung gegeben ist, wird daher die Dreiphasenspannung anormal (besonderer Umspanner). Aus dem gleichen Grunde ist die Gleichspannung ohne besondere Hilfsmittel (Induktionssteller, Drehumspanner) nicht einstellbar. Durch die Verstellung der Erregung werden lediglich die Strom- und Spannungsphasen gegeneinander verschoben. (Der Leistungsfaktor cos φ wird auf 1 gebracht.)

Vorteil: guter Wirkungsgrad und Leistungsfaktor.

Nachteil: schwer einstellbar, besonderer Umspanner ist erforderlich. Das Anlassen von der Gleichstromseite oder durch Anwurfmotor erfordert Synchronisiereinrichtung auf der Drehstromseite. Man läßt daher (s. Bild 4.134) mit der Dämpferwicklung drehstromseitig mit angezapfter Umspannerspannung asynchron an und schaltet bei Vollauf und nach richtiger Polung der Gleichstromseite auf volle Spannung um. Die Synchronisierungseinrichtung entfällt hierdurch. Der Einankerumformer läßt sich auch umgekehrt als Gleichstrom-Drehstrom-Umformer verwenden wie ein Motorgenerator mit Synchronmotor.

Beispiel: Für welches Übersetzungsverhältnis ist der Umspanner für einen Einankerumformer zu wählen, der Drehstrom von 6000 V in Gleichstrom von 440 V umformen soll?

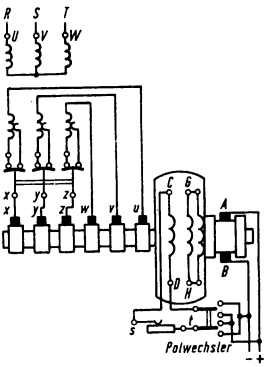


Bild 4.134. Einankerumformer mit Anlaßumschalter

Lösung: Es muß die Drehstromspannung an den Schleifringen des Einankerumformers 61% der abgegriffenen Gleichstromspannung betragen. Sie wird daher $440\ V \cdot 0{,}61 \approx 270\ V$.
Der Umspanner ist für eine Oberspannung von 6000 V und eine Unterspannung von 270 V zu bestellen. Sein Übersetzungsverhältnis berechnet sich aus 6000 V: 270 V = 22,2; es beträgt also 22:1.

Frequenzwandler

Dem unmittelbaren Antrieb zwischen Motor und schnellaufender Arbeitsmaschine (Holzbearbeitungsmaschine, Spinnzentrifugen) steht oft entgegen, daß die bei 50 Hz mit einem 2poligen Motor erreichbare Höchstdrehzahl von 3000 min^{-1} nicht ausreicht. Um einen Strom von höherer Frequenz zu erhalten, verwendet man entweder kleine Motorgeneratoren mit Synchrongeneratoren höherer Polzahl oder treibt einen Asynchronmotor entgegen seiner Drehrichtung an und entnimmt seinem Läufer den höherfrequenten Strom (z. B. 100 oder 150 Hz).

4.3.6.2. Statische Umformer

Die Tabellen 4.64 und 4.65 geben einen Überblick über Arten, Schaltungen, Eingangs- und Ausgangswerte sowie Anwendung statischer Umformer.

Tabelle 4.64: Umformerschaltungen mit netzgeführtem Stromrichter

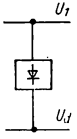
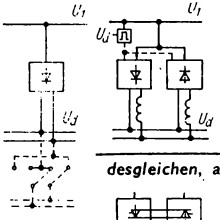
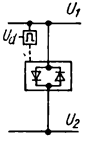
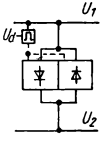
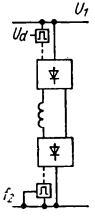
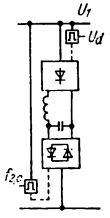
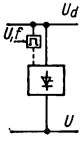
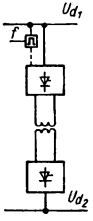
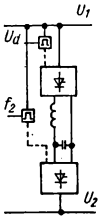
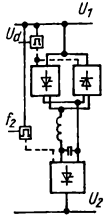
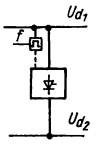
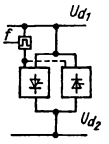
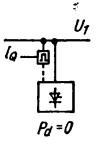
Umformerart	Gleichrichter, ungesteuert	Gleich-/Wechselrichter, desgl. mit Ankerumschaltung	Gleich-/Wechselrichter in Zweiventilschaltung	Wechselstromsteller	Direkter (Wechselstrom-)Umrichter	(Wechselstrom-)Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis	
Prinzipdarstellung		 *desgleichen, aber mit symmetrischen Thyristoren:* 	 	 			
Charakteristik	Spannung durch Stelltrafo veränderbar	durch Umschaltung der Gs-seitigen Leitungen Betrieb in 4 Quadranten möglich (totzeitbehaftet)	Betrieb in 4 Quadranten kreisstromfrei mit geringer Totzeit und kreisstromgeregelt ohne stromlose Pause	auch unsymmetrisch mit antiparalleler Diode	Frequenzumsetzung durch einfache Energieumwandlung	Frequenzumsetzung durch doppelte Energieumwandlung — auch mit ungesteuertem Gleichrichter ausführbar	Frequenzumsetzung durch doppelte Energieumwandlung — auch mit ungesteuertem Gleichrichter ausführbar
Eingang	Wechsel- oder Drehstromnetz vorgegebener Frequenz f_1 (meist Industriefrequenz) und Spannung U_1						
Ausgang	fester, nur durch Veränderung der Eingangsspannung veränderbarer Gleichspannungswert	stellbar zwischen $\pm U_{d\max}$	stellbar zwischen $\pm U_{d\max}$	Ws gleicher Frequenz, aber zwischen 0 und Maximalwert veränderbarer Effektivwert U_2	Frequenz je nach Pulsigkeit der Schaltung $0 \cdots {}^1/_3$ bzw. $0 \cdots {}^1/_3 f_1$ oder feste Frequenz	Ws vorgegebener Frequenz (sekundärnetzgeführt)	Ws mit f_2 aus LC-Belastung — f_2 stellbar durch Kondensatorzu- und -abschaltung
						U_2 stellbar über Gleichrichter	
Anwendung zur Speisung von	Netzen, Elektrolysen, Bahnstromversorgung 50-Hz-Loks	Gs-Antrieben mit Ankerumschaltung für schwere Umkehrantriebe (Fördermaschinen, Brammenstraßen)	Gs-Antrieben für hohe dynamische Anforderungen, z. B. Walzwerksscheren, Haspelantriebe für hochproduktive Kaltwalzwerke	Amplitudensteuerung von Ds-Antrieben, Ds-seitiger Steuerung von Gleichstromverbrauchern, Helligkeitssteuerung, Schaltgeräten	Bahnstromversorgung $16^2/_3$-Hz-Antrieben	untersynchronen Stromrichterkaskaden	stark induktiven Belastungen, z. B. Magnetspulen

Tabelle 4.65: Umformerschaltungen mit fremdgeführtem Stromrichter

Umformerart	Wechselrichter	Gleichstrom-umrichter	(Wechselstrom-)Umrichter mit Gs-Zwischenkreis		Gleichstromsteller für		Blindstromrichter
			1 Energierichtung	2 Energierichtungen	1 Energierichtung	2 Energierichtungen	
Prinzip-darstellung							
Charakteristik		feste Taktfrequenz f, doppelte Energie-umwandlung	Taktfrequenz für Antriebe beliebig (fremdgesteuerter Motor) oder vom Motor vorgegeben (selbstgesteuert) — Umrichter mit doppelter Energieumwandlung		in der Regel feste Taktfrequenz f und Veränderung der Einschaltdauer		stufenlos einstellbare Erzeuger kapazitiver Blindleistung
Eingang	Gs	Gs	Ws		Gs		Ws
Ausgang	Ws durch Phasen-anschnitt begrenzt stellbar — Frequenz je nach Kommu-tierungseinrichtung stellbar	Gs, anschnitt-gesteuert	oberwellenbehaftete Ws veränderlicher Frequenz und Amplitude		Gs pulsförmig mit veränderlichem Mittelwert		$U_d = 0$ oder $I_d = 0$, d. h. Gleichstrom-leistung Null
Anwendung	Notstromaggregate, Umrichter mit Gs-Zwischenkreis	Zusatzgleichrichter für batteriegespeiste Gs-Netze	Antriebe mit besonderen Ansprüchen an Betriebssicherheit (Kurzschlußläufer) für hohe Drehzahlen bzw. Gleichlauf-probleme (Rollgänge in Walzwerken, Textilindustrie) — induktive Erwärmung		Batteriefahrzeuge, Fahrzeuge mit Fahr-drahteinspeisung, Ds-Antriebe mit gepulstem Läuferwiderstand		in der Perspektive einsetzbar zur Leistungsfaktor-verbesserung u. Spannungshaltung (Kompensation von ind. Blindlaststößen)

4.4. Umspanner, Wandler, Übertrager

4.4.1. Wirkprinzip

Jeder Wechselstrom ist von einem magnetischen Wechselfeld, einem magnetischen Wechselfluß, begleitet. Spulen vervielfachen entsprechend der Windungszahl den Wechselfluß (vgl. 1.9.11.). Ein zeitlich veränderlicher Magnetfluß verursacht in einer Schleife bzw. in einer zweiten Spule mit N_2-Windungen eine Spannung von

$$-E_2 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N_2 \qquad \text{(s. Bild 4.135).}$$

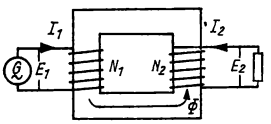


Bild 4.135. Prinzip des Transformators

Die Spannung E_2 in der zweiten Spule wird groß, wenn möglichst der gesamte von der Spule 1 erzeugte magnetische Wechselfluß durch die Spule 2 geleitet wird. Dazu wird Material mit bester magnetischer Leitfähigkeit, Spezialeisen, eingesetzt. Diese Gesetzmäßigkeiten bilden die Grundlage für den *Transformator*. Der Wechselfluß Φ, hervorgerufen durch die magnetische Urspannung $N_1 I_1$, erzeugt in beiden Spulen die elektrischen Urspannungen E_1 und E_2:

$$E_1 \sim N_1 \quad \text{und} \quad E_2 \sim N_2.$$

Hieraus folgt für den verlustlosen Transformator

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u}.$$

Wird der verlustlose Transformator auf der Sekundärseite belastet, fließt ein Strom I_2. Die elektrische Leistung auf der Sekundärseite ist $E_2 I_2$. Nach dem Erhaltungssatz der Energie muß die gleiche Leistung auf der Primärseite aufgenommen werden: $E_2 I_2 = E_1 I_1$. Somit ergibt sich

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}}.$$

Schließlich ergibt sich entsprechend dem OHMschen Gesetz aus $E_1/I_1 = X_1$ und $E_2/I_2 = X_2$ die Impedanz der Primär- und Sekundärwicklung. Hieraus folgt

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \ddot{u}^2.$$

Die drei Gleichungen beschreiben die Eigenschaften eines idealen Transformators. Es können Spannungen, Ströme und Widerstände transformiert werden.

Beispiel: Ein Umspanner soll eine Spannung von 380 kV auf 30 kV umspannen. Wie groß muß das Verhältnis der Windungszahlen $\frac{N_1}{N_2}$ sein?

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{380\ \text{kV}}{30\ \text{kV}} \approx 12{,}7 = \frac{N_1}{N_2}.$$

Auf das Wievielfache wird dabei der Strom auf der Sekundärseite gegenüber der Primärseite erhöht?

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} = I_1 \cdot 12{,}7.$$

Um das Wievielfache wird dabei die Impedanz der Sekundärseite gegenüber der Primärseite gesenkt?

$$X_2 = X_1 \frac{N_2^2}{N_1^2} = X_1 \left(\frac{1}{12{,}7}\right)^2 = X_1 \cdot 0{,}0062.$$

Transformatoren werden eingesetzt, um Strom und Spannung auf Werte umzuwandeln, zu transformieren, die für den betreffenden Elektroenergieverbraucher zweckmäßig sind. Transformatoren in der Starkstromtechnik (Leistungselektronik) werden *Umspanner* genannt, da sie die ankommende Spannung auf einen für den Verbraucher günstigen Wert umspannen. Transformatoren der Meßtechnik werden *Wandler* genannt. Sie wandeln Strom oder Spannung in einen für das anzeigende Meßgerät geeigneten Wert um. Transformatoren in der Tonfrequenztechnik werden *Übertrager* genannt. Sie übertragen die Tonfrequenz in Form elektrischer Schwingungen von einer Spule zur anderen unter Änderung der Impedanz der Stromkreise.

Tabelle 4.66: Kennwerte von Dynamoblechen

Dynamoblech	Dicke (±10%)	Verlustzahl in W/kg		Zulässige Verlustzunahme infolge Alterung
	mm	V_{10}	V_{15}	%
I normal	0,50	3,6	8,6	9,0
	0,75	—	—	9,0
	1,00	8,0	19,0	9,0
	1,50	—	—	9,0
II schwach legiert	0,5	3,0	7,4	7,5
III mittelstark legiert	0,5	2,3	5,6	6,5
IV hoch legiert	0,35	1,3	3,25	5,0
	0,50	1,7	4,0	—

Die Verlustzahlen werden bei einer magnetischen Flußdichte (Induktion) von 1 T (Tesla) (V_{10}) und 1,5 T (V_{15}) in Watt je Kilogramm Blechmasse angegeben. Die gesamten Eisenverluste eines Umspanners bei einer beliebigen Flußdichte B errechnen sich zu

$$V = V_{10} \left(\frac{B}{10\,000}\right)^2 m;$$

m Masse des aktiven Eisens.

Die Magnetisierungskennlinien der Dynamobleche sind im Bild 4.136 angegeben.

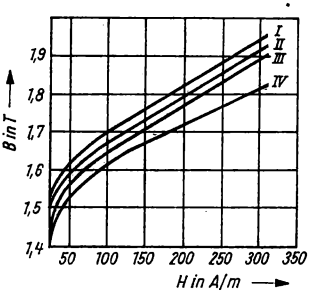


Bild 4.136. Magnetisierungskennlinien von Dynamoblech

4.4.2. Umspanner (Transformator)

4.4.2.1. Wirkungsweise der Umspanner

Umspanner wandeln ohne mechanische Bewegung elektrische Leistung in elektrische Leistung anderer Spannung und anderer Stromstärke um.
Der Wechselstrom der Primärwicklung erzeugt im aktiven Eisen einen magnetischen Wechselfluß. Dieser ruft eine gegenüber der Primärspannung um 180° verschobene Sekundärspannung hervor.
Für sinusförmige Spannung wird der Betrag des Effektivwertes

$$E_2 = 4{,}44 N_2 f B_m A \cdot 10^{-8}\ \text{V}.$$

B_m Scheitelwert der Induktion (soll unterhalb der Sättigung liegen, da sonst Verzerrung der Sinusform von E_2), A aktiver Eisenquerschnitt des Kerns.
Bei Umspannern (Transformatoren) mit getrennten Wicklungen wird die Leistung ausschließlich induktiv übertragen. Spartransformatoren übertragen nur einen Teil der Leistung induktiv, die sog. *Durchgangsleistung*. Transformatoren werden

nach der *Scheinleistung* als dem Produkt aus Strom und Spannung benannt. Es gibt in der Regel für den Umspannerbau vier Blechsorten, die sich in ihrem Siliziumgehalt unterscheiden. Daten dieser Bleche sind in Tabelle 4.66 enthalten.

4.4.2.2. Aufbau von Umspannern

Wirksames Eisen (geschlossener magnetischer Kreis) aus dünnen Blechen (Kern- und Jochbleche). Mantel- oder Kerntyp. Hochspannungswicklung = Scheibenwicklung. Niederspannungswicklung = Zylinder- oder Scheibenwicklung. Die Umspanner werden gekühlt. Größere Kessel erhalten ein Ausgleichgefäß (zur Verhütung der Kondenswasserbildung) am Deckel und ein Fahrgestell. Die Stromdurchführungen liegen im Deckel. Zur Füllung ist bestes Raffinadeöl (s. Isolieröle) erforderlich. Es muß frei sein von Salzen, Säuren, Alkali, Schwefel und Beimengungen, wie Fasern, Sand usw. Vor dem Einfüllen ist es bei 120 °C abzukochen, um Spuren von Wasser auszuscheiden.

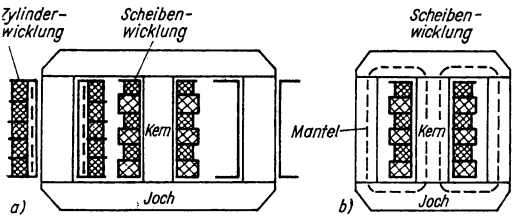


Bild 4.137. Umspanner
a) Drehstromumspanner (Kerntyp), b) Einphasenumspanner (Manteltyp)

4.4.2.3. Parallelschalten von Umspannern

Nur Umspanner gleicher Kennzahl mit gleichem Übersetzungsverhältnis und etwa gleicher Kurzschlußspannung dürfen hoch- und niederspannungsseitig auf das gleiche Netz geschaltet werden, anderenfalls treten größere Ausgleichströme auf. Bei ungleicher Kurzschlußspannung nimmt derjenige mit niederer Kurzschlußspannung die größere Belastung auf. Schutz durch Reduzieren der Nennleistung. Zulässige Abweichung der Kurzschlußspannung $\pm 10\%$, dabei soll der kleinere die größere Kurzschlußspannung haben (gewisser Überlastschutz).

Kontrolle des richtigen Anschlusses: Der Umspanner wird dreiphasig oberspannungsseitig angeschlossen, und eine Phasenleitung wird an eine Phase des Unterspannungsnetzes gelegt. Vor Anschluß der beiden letzten Unterspannungsphasenleitungen muß mit einem Spannungsmesser oder einer Glühlampe geprüft werden, daß zwischen sämtlichen Klemmen und den Anschlußpunkten keine Spannung herrscht (Bild 4.138).

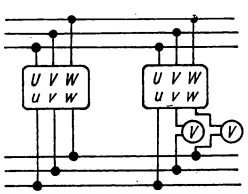


Bild 4.138. Prüfschaltung zum Parallelschalten von Umspannern

In Tabelle 4.67 sind die gebräuchlichen Schaltungen für Umspanner zusammengestellt.

Bevorzugt werden folgende Schaltungen:

Yy 0 bei kleineren Verteilungstransformatoren mit sekundär wenig belastbarem Sternpunkt,

Dy 5 bei großen Verteilungstransformatoren mit sekundär voll belastbarem Sternpunkt,

Yz 5 bei kleinen Verteilungstransformatoren mit sekundär voll belastbarem Sternpunkt,

Yd 5 bei Haupttransformatoren großer Kraftwerke und Motorstationen, die nicht zur Verteilung dienen.

Tabelle 4.67: Gebräuchliche Schaltgruppen für Umspanner

Bezeichnung: Kennzahl	Schaltgruppe	Zeigerbild OS	Zeigerbild US	Schaltungsbild [1] OS	Schaltungsbild [1] US	Übersetzung [2] U_{L_1} U_{L_2}	Bisherige Bezeichnung
Drehstrom-Leistungstransformatoren							
0	Dd0					$\frac{N_1}{N_2}$	A1
	Yy0					$\frac{N_1}{N_2}$	A2
	Dz0					$\frac{2N_1}{3N_2}$	A3
5	Dy5					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$	C1
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$	C2
	Yz5					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$	C3
6	Dd6					$\frac{N_1}{N_2}$	B1
	Yy6					$\frac{N_1}{N_2}$	B2
	Dz6					$\frac{2N_1}{3N_2}$	B3
11	Dy11					$\frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$	D1
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$	D2
	Yz11					$\frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$	D3
Einphasen-Leistungstransformatoren							
0	Ii0					$\frac{N_1}{N_2}$	E

[1]) Als Bezugsseite für die Schaltungsbilder gilt die Oberspannungsseite. Bei den Wicklungen ist gleicher Wickelsinn vorausgesetzt.

[2]) N_1 und N_2 sind Windungszahlen, U_{L_1} und U_{L_2} sind Leiterspannungen. Wird die Kennzahl der Schaltgruppe mit 30° multipliziert, erhält man den Phasenwinkel zwischen Ober- und Unterspannung.

Kurzschlußspannung ist diejenige Spannung in % der Nennprimärspannung, die nötig ist, um bei kurzgeschlossener Unterspannungswicklung den Nennprimärstrom zu erzeugen (etwa 2,9···12%).

Werden Umspanner verschiedener Kurzschlußspannungen parallel geschaltet, so kann die Lastverteilung z. B. wie folgt berechnet werden:

Umspanner 1: $S_1 = 500$ kVA; $u_{k1} = 6\%$,
Umspanner 2: $S_2 = 400$ kVA; $u_{k2} = 5{,}5\%$,
Umspanner 3: $S_3 = 315$ kVA; $u_{k3} = 6{,}5\%$,
Gesamtleistung: $\underline{1215}$ kVA

$$\frac{S}{u_k} = \frac{S_1}{u_{k1}} + \frac{S_2}{u_{k2}} + \frac{S_3}{u_{k3}};$$

$$\frac{S}{u_k} = 83{,}3\ \text{kVA} + 72{,}7\ \text{kVA} + 48{,}5\ \text{kVA} = 204{,}5\ \text{kVA},$$

$$S_1 = \frac{\frac{S_1}{u_{k1}} \cdot (S_1 + S_2 + S_3)}{\frac{S_1}{u_{k1}} + \frac{S_2}{u_{k2}} + \frac{S_3}{u_{k3}}};$$

$$S_1 = \frac{83{,}3\ \text{kVA} \cdot 1215\ \text{kVA}}{204{,}5\ \text{kVA}}; \quad S_1 = 494\ \text{kVA}.$$

In gleicher Weise wird die Berechnung für Umspanner 2 und Umspanner 3 durchgeführt, so daß sich folgende Einzelleistungen ergeben:

S_1	= 494 kVA
S_2	= 431 kVA
S_3	= 290 kVA
aufgenommene Gesamtleistung:	1215 kVA

Achtung: Umspanner 2 überlastet!
Die unterschiedliche Lastverteilung gilt auch bei Sekundärkurzschluß (Gefahr).

4.4.2.4. Bezeichnungen

Nennbetrieb NB Betrieb mit Nennprimärspannung U_1, Nennfrequenz f, Sekundärstrom I_2 und Betriebsart, die das Leistungsschild enthält.

Scheinleistung $S = UI \cdot \sqrt{3}$ in VA, kVA oder MVA.

Leistungsaufnahme P_1 an den Primärklemmen aufgenommene Wirkleistung in W, kW, MW.

Leistungsabgabe P_2 an den Sekundärklemmen abgegebene Wirkleistung.

Übersetzung $\ddot{u}$ Spannungsverhältnis der Primärwicklung zur Sekundärwicklung bei Leerlauf.

Nennprimärspannung U_1 Spannung, für die die Primärspule gebaut ist.

Nennsekundärspannung U_2 Spannung an Sekundärwicklung bei Nennlast.

Windungszahl N_1 primäre Wdgz.
Windungszahl N_2 sekundäre Wdgz. $\Big\}\ \ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}.$

Nennsekundärstrom I_2 Vollaststrom, für den die Sekundärwicklung bemessen ist.

Nennprimärstrom $I_1 = I_2 \cdot \frac{U_2}{U_1}$.

Nennleistung $P = U_2 I_2 \cdot \cos\varphi_2$. P ist verschieden von der bei NB abgegebenen Scheinleistung S.

Nennfrequenz f Frequenz, für die der Umspanner gebaut ist.

Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_2}{P_2 + V}$.

Ohne nähere Bezeichnung gilt der Wirkungsgrad η für einen sekundären Leistungsfaktor $\cos\varphi_2 = 1$. Die Abgabe P_2 bei Vollast errechnet sich aus der Nennleistung P, dem sekundären Leistungsfaktor $\cos\varphi_2$ und der prozentualen Spannungsänderung u_φ zu

$$P_2 = P \cdot \cos\varphi_2 \cdot \left(1 - \frac{u_\varphi}{100}\right) \text{ für Vollast;}$$

$$\eta \text{ in } \% \approx 100 - \frac{100\,V}{P + V}.$$

Die *Verluste* V setzen sich zusammen aus Verlusten im Eisen (linear von der Primärspannung abhängig) und aus Verlusten in der Wicklung (quadratisch vom Strom abhängig). Kaltgewalzte Bleche haben besonders geringe Verluste in magnetischer Vorzugsrichtung.

Beispiel: Der Wirkungsgrad eines 50-kVA-6000-V-Transformators bei ½ Last und $\cos\varphi_2 = 0{,}7$ ist zu errechnen. Leerlaufverlust 300 W, Kupferverlust 1250 W.

Lösung: kW-Leistung = 50 kVA · 0,5 · 0,7 = 17,5 kW. Wicklungsverlust ½ Last = 1,25 kW · $0{,}5^2$ = 0,313 kW, daher

$$\eta = 100 - \frac{100(0{,}300\ \text{kW} + 0{,}313\ \text{kW})}{17{,}5\ \text{kW} + (0{,}300\ \text{kW} + 0{,}313\ \text{kW})} = 96{,}6\%.$$

Kurzschlußspannung u_k in % derNennprimärspannung = Spannung, die entweder bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung an die Primärwicklung (Aufnahme des Nennprimärstroms) oder bei kurzgeschlossener Primärwicklung an die Sekundärwicklung vorgelegt werden müßte (Aufnahme des Nennsekundärstroms).

Nennkurzschlußstrom I_k Primärstrom, im betriebswarmen Zustand aufgenommen, wenn bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung die Nennspannung U_2 an die Primärwicklung gelegt würde. Er kann als ein Vielfaches des Nennprimärstroms I_1 ausgedrückt werden:

$\frac{I_k}{I_1} = \frac{1}{u_k}$. In % ist für nachstehendes Beispiel

$$\frac{I_k}{I_1} = \frac{1}{u_k};\ \frac{I_k}{100} = \frac{1}{3{,}56};\ I_k = \frac{1 \cdot 100}{3{,}56} \approx 28\text{fach von } I_1.$$

Leerlaufverlust P_0 in W Aufnahme bei Nennprimärspannung, Nennfrequenz und offener Sekundärwicklung. P_0 besteht aus Verlusten im Eisen, Dielektrikum und durch Stromwärme. Die Nennprimärspannung liegt dabei an der Hauptanzapfung.

Kurzschlußverlust P_k in W gesamte Stromwärmeleistung bei Nennstrom I_1 und Nennfrequenz f, die in allen Wicklungen und Ableitungen (also zwischen den Klemmen im betriebswarmen Zustand) verbraucht wird. P_k wird bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung und eingestelltem Nennstrom I_1 ermittelt.

Die *Spannungsänderung* u_φ (in % der Nennsekundärspannung) bei einem anzugebenden Leistungsfaktor $\cos\varphi$ ist die Änderung der Sekundärspannung, die bei Übergang vom Leerlauf auf Nennbetrieb auftritt, wenn Primärspannung und Frequenz unverändert bleiben.

4.4.2.5. Nennleistungen für Drehstromumspanner (50 Hz)

Die Nennleistungen sind 10, 16, 25, 40, 63, 100 kVA und das jeweilige dekadische Vielfache dieser Werte.

4.4.2.6. Anzapfungen

Transformatoren über 5 kVA erhalten fast stets 2 Anzapfungen für max. ±5%, die in spannungslosem Zustand umzuschalten sind. Stufentransformatoren für Spannungseinstellung während des Betriebs (bis ±15% und mehr) erhalten Lastumschalter, die ähnlich wie Zellenschalter das Überbrücken von 2 Stufen über einen Widerstand vornehmen und durch ein Spannungsrelais und einen Verstellmotor gesteuert werden.

4.4.2.7. Angaben auf dem Leistungsschild

Name oder Firmenzeichen, Typbezeichnung, Fertigungsnummer, Baujahr, Kurzzeichen (LT, ZT, SpT), Reihe, Nennleistung, Nennspannungen, Nennströme, Nennfrequenz, Nennkurzschlußspannung, Nennkurzschlußstrom, höchstzulässige Kurzschlußdauer, Kurzzeichen der Schaltgruppe, der Kühlungs- und Schutzart, der Betriebsart, der Isolierstoffklasse (nur bei Trockentransformatoren), Gesamtmasse sowie Typ, Reihe und Nennstrom des Stufenschalters.

4.4.2.8. Transformatorarten

Spartransformatoren (Schaltungen s. Bild 4.139) besitzen gemeinsame Hoch- und Niederspannungswicklung (in Anlagen über 250 V nur für höchstens 25% Spannungsunterschied).

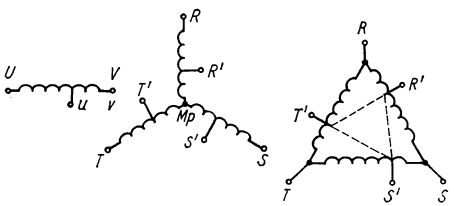


Bild 4.139. Prinzipschaltungen von Spartransformatoren

Dreh-Transformatoren (DrT) sind Transformatoren mit gegeneinander beweglichen Wicklungen. Sie werden als Zusatztransformator oder Spartransformator benutzt und sind nach Art der Asynchronmaschinen gebaut. Durch Verdrehen des Läufers wird die Größe der Sekundärspannung geändert.

Stromrichttransformatoren dienen zur Speisung von Stromrichterventilen beliebiger Schaltung. Bei Kurzschlüssen in einem Strang tritt nicht nur dort der übliche Kurzschlußstrom auf, sondern die anderen Phasen speisen zusätzlich noch Strom ein. Weiterhin entsteht durch Rückzündungen der Ventile eine hohe Kurzschlußhäufigkeit. Deshalb ist eine hohe mechanische Festigkeit vor allem der Sekundärwicklungen erforderlich. Plötzliche Stromunterbrechungen infolge des Leitfähigkeitsverlustes von Stromrichterventilen führen in den Transformatorinduktivitäten zu Überspannungen. Deshalb ist eine verstärkte Isolation erforderlich. Hilfseinrichtungen, wie Saugdrosseln, Glättungsdrosseln usw., sind oft im Ölkessel des Gleichrichtertransformators enthalten.

Ofentransformatoren erzeugen sehr hohe Sekundärströme (bis 150 kA) bei entsprechend geringen Spannungen. Die Sekundärwicklung hat sehr kleine Windungszahlen, bei großem Querschnitt Anschlüsse für Hochstromschienen. Die großen Magnetfelder führen zu erheblichen Wirbelströmen im Eisenkessel und Transformatordeckel. Deshalb werden diese oft aus unmagnetischem Material gefertigt. Stufenlastschalter gestatten eine Leistungsanpassung.

Lokomotivtransformatoren sind Einphasentransformatoren mit besonders geringer Masse und stoßunempfindlichem Aufbau; meist für $f = 16^2/_3$ Hz oder 50 Hz; zur Geschwindigkeitsregelung eine große Anzahl von Anzapfungen. Liegen die Anzapfungen an der Oberspannungswicklung, spricht man von Hochspannungssteuerung, liegen sie auf der Unterspannungsseite, von Niederspannungssteuerung. Durch Einkristallstromrichterventile gewinnen Stromrichterlokomotivtransformatoren an Bedeutung.

Schweißtransformatoren. Leerlaufspannung soll zum Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung bei Handschweißbetrieb nicht über 65 V liegen. Der Kurzschlußstrom muß einen begrenzten Wert haben.

4.4.2.9. Trocken- und Öltransformatoren

Trockentransformatoren

Trockentransformatoren enthalten kein Öl und haben deshalb keinen Ölkessel. Der Trockentransformator weist nur etwa 60% der Masse und 70% der Standfläche eines Öltransformators auf. Der Ölwegfall senkt beträchtlich die Brand- und Rauchgefahr. Geringe Masse, geringe Standfläche und Wegfall der Ölfanggrube verringern die Baukosten. Der Preis des Trockentransformators liegt höher als der des Öltransformators (vgl. Bild 4.140). Infolge der fehlenden Wärmekapazität des Öls ist der Trockentransformator nicht so stark überbelastbar wie der Öltransformator. Er ist jedoch nach Überlast schneller abgekühlt und somit schneller einsatzbereit als der Öltransformator. Statt des Buchholz- (Ölströmungs-) Schutzes sind Bimetallkontakte zu verwenden. Sein Einsatz erfolgt dort, wo erhebliche Brandgefahr besteht. Das trifft zu für Stelltransformatoren für Beleuchtungsanlagen in Theatern und Hochspannungs-Transformatoren für schlagwettergefährdete Gruben (vgl. Tabelle 4.68). Stromrichter-Drehstrom-Transformatoren für 6-Phasen-Betrieb werden von 40···400 kVA ebenfalls in trockener Ausführung angeboten.

Tabelle 4.68: Nennwerte von Hochspannungstransformatoren für schlagwettergefährdete Gruben

Größe	Einheit	Nennwert		
Nennleistung	kVA	100	200	315
Nennoberspannung	kV	(2), 3, (5) und 6		
Nennunterspannung	kV	0,400 oder 0,525		
Leerlaufverluste	W	1000	1450	1550
Kurzschlußverluste	W	1100	2000	3000
Kurzschlußspannung	%	4	4	5
Schaltgruppe		Yy0		

Öltransformatoren

Daten von Drehstrom-Öltransformatoren sind in den Tabellen 4.69 und 4.71 zusammengestellt (nach TGL 9832), vgl. Bild 4.141.

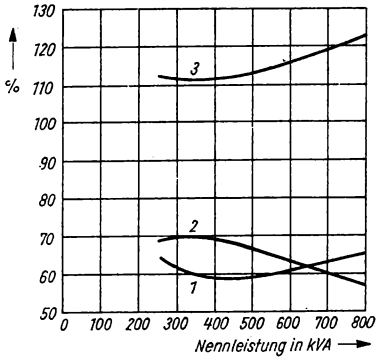


Bild 4.140. Kennlinien von Trockentransformatoren im Verhältnis zum Öltransformator
1 Masse, 2 Platzbedarf, 3 Preis; Wert vom Öltransformator ≙ 100%

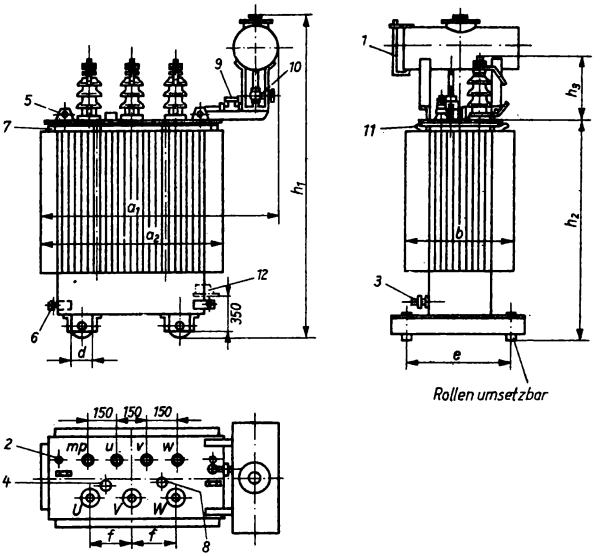


Bild 4.141. Öltransformator der Baugröße 250···1 600 kVA
1 Ölstandszeiger, 2 Thermotaschen, 3 Ölablaßvorrichtung, 4 Umsteller, 5 Tragösen, 6 Erdungsschraube, 7 Ösen zum Festzurren beim Transport, 8 Öleinfüllöffnung, 9 Buchholzrelais, 10 Absperrschieber ab 1000 kVA, 11 Traghaken, 12 Anhebestellen

Tabelle 4.69: Nennwerte von Drehstrom-Öltransformatoren

Bezeichnung eines Drehstrom-Öltransformators mit Nennleistung 400 kVA, Nennoberspannung 20 kV, Nennunterspannung 0,4 kV und Schaltgruppe Dy 5 Ausführung A[1])
Transformator 400-20/04 Dy 5-A-TGL 9832/01
Nennfrequenz: 50 Hz — Kühlungsart: Selbstkühlung (S)
Wickelmaterial: Aluminium — Aufstellung: Freiluft

Nennleistung in kVA			100	160	250	400	630	1000	1600
Nennoberspannung OS in kV			6 10 15[2]) 20 30						
Anzapfung der OS-Wicklung[3]) ± % von OS			4		5				
Nennunterspannung US in kV			0,231		—				
			0,4						
			0,525						
			—					6,3	
Schaltgruppe	US	0,231	Yy 0		—				
		0,4	Yy 5		Dy 5				
	kV	0,525	Yy 0						
		6,3	—					Yy 0	
Sternpunktbelastbarkeit[4]) in %	Yz 5, Dy 5		100						
	Yy 0		10						
Leerlaufstrom[5]) in % vom Nennstrom	A	bis 20 kV	2,5	2,3	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3
		30 kV	—	—	2,3	2,0	1,7	1,5	1,4
	B	bis 20 kV	3,2	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,7
		30 kV	—	—	2,9	2,6	2,2	1,9	1,9
Leerlaufverluste in W	A	bis 20 kV	380	550	700	1000	1450	2200	3200
		30 kV	—	—	740	1050	1550	2400	3400
	B	bis 20 kV	450	640	820	1200	1700	2600	3800
		30 kV	—	—	860	1260	1800	2800	4100
Kurzschlußverluste in W bei 75 °C	Yy 0, Dy 5		2200	2900	4400	5900	7800	11000	16000
	Yz 5		2300	3200	—	—	—	—	—
Kurzschlußspannung bei 75 °C in % von Nennspannung	Yy 0, Dy 5		3,8		6				
	Yz 5		4		—				

[1]) Die Ausführungen A und B unterscheiden sich durch Transformatorenbleche unterschiedlicher Güte.
[2]) nur für Erweiterungen bestehender Anlagen und Ersatz
[3]) durch Umsteller im spannungslosen Zustand über Deckel einstellbar
[4]) Sternpunkt der US-Wicklung herausgeführt (bis 0,525 kV)
[5]) Mittelwert der drei Phasen

4.4.2.10. Transformatorenschutz

Er soll vorbeugend Fehler erfassen und ein Abschaltkommando einleiten.

1. Überlast- und Kurzschlußschutz: bis 30 kV und 630 kVA durch Hochleistungssicherungen (vgl. Tabelle 4.70), darüber hinaus bis 1,6 MVA durch das Primärüberstromrelais. Sekundärüberstromrelais (Speisung über Stromwandler) wird angewendet bei Transformatorenleistungen über 2 MVA. Differentialschutz ist etwa ab 10 MVA Transformatorenleistung anzuwenden. Der Differentialschutz vergleicht Ober- und Unterspannungsstrom unter Beachtung des Transformatorübersetzungsverhältnisses. Der Buchholzschutz ist zusätzlich zu einer der genannten Maßnahmen ab etwa 100 kVA anzuwenden. Er spricht auf Gasblasenentwicklung und unnormale Ölströmungen an.

2. Gefahrmeldung über Fernthermometer oder über Buchholzschutz, Warnstufe.

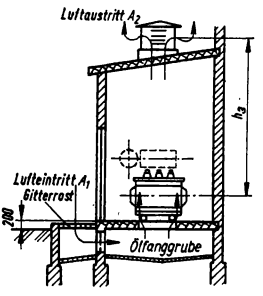


Bild 4.142. Aufbau und Belüftung von Transformatorenräumen

Tabelle 4.70: Absichern von Transformatoren

Transformator-Nennleistung kVA	Nennstrom der Sicherungseinsätze und max. Nennstrom der NH-Schmelzeinsätze in A bei Transformator-Nennspannung														
	30 kV	400 V	231 V	20 kV	400 V	231 V	15 kV	400 V	231 V	10 kV	400 V	231 V	6 kV	400 V	231 V
10													[1]		
15	[1]	36	36	[1]	36	36	[1]	36	36	[1]	36	36	6	36	36
20						63			63			63			
30			80			80	[1]		80						63
40	[1]	63	100	[1]	63	100		63	100	6	63	80	10	36	80
50			125	6		125	6		125	10		125	16	63	100
60	[1]	80	160		80	125	6	80	125	10	80	125	16		125
75		100		6		160		100	160		100			80	
100	6	125	200	10	100	200	10	125	224	16	125	200	25	125	200
125	6	125	200												
150	10	200	300	10	125	224	16	160	250	16	125	200	25	125	200
160															
200	10	200	300	10	125	224	16	160	250	16	125	200	25	125	200
250		300	355	16	224	300				25	200	300	40	160	355
315	16		425				25	300	500					224	425
400	16	300	425	16	224	300	25	300	425	40	355	500	63	300	600
500				25	355	600								355	
630	25	600	600				40	500	600	63	500	600	80	425	

[1]) durch Sicherung kein Schutz des Transformators möglich

Tabelle 4.71: Hauptabmessungen von Drehstrom-Öltransformatoren

Baugröße kVA	Nennoberspannung Reihe	Maße in mm									Masse in kg	
		a_1	a_2	h	h_1	h_2	h_3	f	d	e	gesamt	Öl
250	10	1825	1525	795	1870	1170	310	320	150	610	≈ 1540	≈ 490
	20						385				≈ 1550	
	30	1835	1505	845	1900	1200	490	400			≈ 1680	≈ 590
400	10	1915	1615	915	1950	1250	310	320			≈ 2000	≈ 610
	20						385				≈ 2020	
	30	1975	1675	955	2000	1300	490	400			≈ 2220	≈ 730
630	10	2110	1760	1040	2215	1430	310	320			≈ 2650	≈ 780
	20						385					
	30	2170	1930	1070	2255	1475	490	400			≈ 2950	≈ 915
1000	10	2340	2040	1100	2490	1710	310	320	200	820	≈ 4000	≈ 1150
	20						385					
	30	2400	2100	1120	2600	1710	490	400			≈ 4250	≈ 1250
1600	10	2400	2330	1400	2700	1840	310	320	200	820	≈ 5750	≈ 1550
	20	2440					385					
	30	2500	2460	1430	2775	1885	490	400			≈ 5950	≈ 1750

Ein Öltransformator der Baugröße 250···1600 kVA ist im Bild 4.141 dargestellt.

4.4.2.11. Lüftung von Transformatorenräumen

Nach Möglichkeit sollte die Verlustwärme der Transformatoren durch natürliche Lüftung abgeleitet werden (Bild 4.142). Die Berechnung der Zu- und Abluftquerschnitte erfolgt nach Bild 4.143. Im Diagramm ist der Luftaustritt A_2 in Abhängigkeit von der Verlustleistung P_V (Leerlaufverluste + Kurzschlußverluste) und der Höhendifferenz h_3 zwischen Lufteintritt und Luftaustritt abzulesen. Der Lufteintrittsquerschnitt errechnet sich dann aus der Formel

$A_1 = 0{,}92 \cdot A_2$ in m².

Die Minderung von A_1 und A_2 durch Einbauen von Jalousien, Drahtgewebe und Rahmen ist durch Multiplikation mit dem Faktor 1,3 zu berücksichtigen.

Eingezeichnetes Beispiel ergibt bei einer Verlustleistung $P_V = 4$ kW und einer Zughöhe $h_3 = 10$ m einen erforderlichen freien Luftaustrittsquerschnitt

$A_2 = 0{,}238$ m².

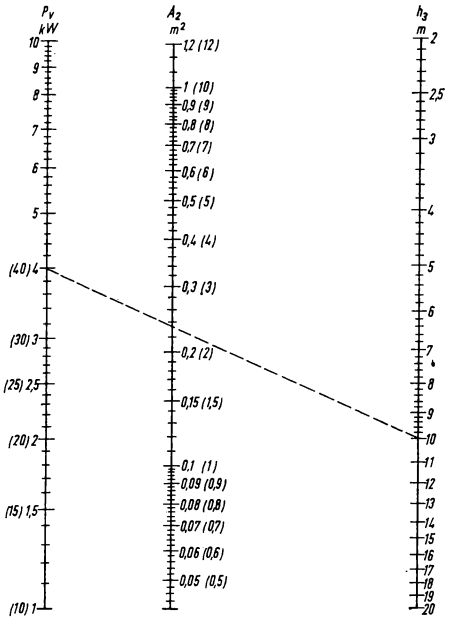


Bild 4.143. Nomogramm zur Berechnung der Kühlluftquerschnitte von Transformatorenräumen

4.4.3. Wandler

4.4.3.1. Allgemeines

Der Wandler ist ein Spezialtransformator, der Spannungen oder Ströme in gleichartige Größen umwandelt. Der Stromwandler ist ein Transformator, der sekundärseitig im Kurzschluß arbeitet. Der Sekundärstrom ist innerhalb des Meßbereichs proportional und phasentreu dem Primärstrom. Der Spannungswandler ist ein Transformator, der sekundärseitig im Leerlauf arbeitet und bei dem die Sekundärspannung innerhalb des Meßbereichs proportional und phasentreu zur Primärspannung ist.
Bei in Betrieb befindlichen Stromwandlern darf der sekundärseitige Stromkreis auch kurzzeitig nicht geöffnet werden. Anderenfalls tritt infolge starker Übersättigung des magnetisch aktiven Eisenkreises eine Überhitzung ein, die zu Wicklungsschäden und Schäden des Eisenkreises führt.
Bei Ausbau angeschlossener Meßgeräte ist der Stromwandler vorher sekundärseitig kurzzuschließen; die Möglichkeit dazu ist an der Klemmenleiste vorzusehen. Strom- und Spannungswandler sind primärseitig dauernd mit 20% überbelastbar.

4.4.3.2. Stromwandler

Nennstrom I_n (primär oder sekundär) eines Stromwandlers ist der auf dem Leistungsschild angegebene Wert des primären oder sekundären Stromes.

Nennspannung U_n (primär oder sekundär) eines Spannungswandlers ist der auf dem Leistungsschild angegebene Wert der primären oder sekundären Spannung.
Bei einpolig isolierten Spannungswandlern, die in Drehstromanlagen zwischen Leiter und Erde geschaltet sind, wird die Nennspannung in der Form $U/\sqrt{3}$ angegeben. Die Nennspannung der Wicklung für Erdschlußerfassung wird in der Form $U\sqrt{3}$ angegeben.

Nennbürde Z ist bei Stromwandlern der Scheinwiderstand in Ω, bei Spannungswandlern der Scheinleitwert in S der sekundär

Tabelle 4.72: Nennströme von Stromwandlern in A (nach TGL 14151)

a) primäre Nennströme

Reihe	Wandler nicht umschaltbar					Wandler 1:2 umschaltbar	Wandler 1:2:4 umschaltbar
0,5···30	1	10	100	1000	10000		
		15	150	1500	15000	2 · 15	
		20	200	2000	20000	2 · 25	
		30	300	3000	30000	2 · 50	
			400	4000		2 · 100	
		50				2 · 150	
			600	6000		2 · 200	
		75	750	7500		2 · 300	
60						(2 · 50)[1])	
						(2 · 200)[1])	
110							4 · 100
							4 · 150
							4 · 500
220 E							4 · 300
							4 · 500
380 E							4 · 500

b) sekundäre Nennströme

Wandler der Reihen 0,5···110: 5 A oder 1 A
Wandler der Reihen 220···380 E: 1 A für Zähl- und Meßkerne, 2 · 1 A für Schutzkerne

Nennleistung VA	Klasse	Nennüberstromzahl Reihe 0,5···380 E	0,5···30	über 30	Anwendung
(1) 1,5 2,5	0,1	< 10	–	–	Laborwandler
	0,2 (0,2 G)				Laborwandler, Verrechnungszählung
5 10	0,5 (0,5 G)				Verrechnungszählung
15 30	1		–	(> 10)	Betriebsmessung und Schutzzwecke
	3		(> 4 > 5 > 10)		
60	5 P	–	–	5 10	Betriebsmessung und Schutzzwecke
	10 P		5 10	–	

[1]) Klammerwerte nicht für Neukonstruktionen.

angeschlossenen Geräte einschl. Zuleitungen, bei dem die zulässigen Fehlergrenzen noch eingehalten werden.

Nennleistung S ist bei Stromwandlern das Produkt aus der Nennbürde und dem Quadrat des sekundären Nennstromes, bei Spannungswandlern das Produkt aus der Nennbürde und dem Quadrat der sekundären Nennspannung. Sie wird auf dem Leistungsschild in VA angegeben.

Nennüberstromzahl n bei Stromwandlern ist dasjenige Vielfache des primären Nennstromes, bei dem der Stromfehler bei Nennbürde −10% beträgt.

Thermischer Grenzstrom I_{1th} ist der auf dem Leistungsschild angegebene Effektivwert des primären Stromes in kA, dessen Wärmewirkung die Primärwicklung des Stromwandlers 1 s lang aushalten kann, ohne Schaden zu nehmen.

Dynamischer Grenzstrom I_{dyn} ist der Wert der ersten Stromamplitude in kA, deren Kraftwirkung ein Stromwandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung aushalten kann, ohne Schaden zu nehmen.

Fehlwinkel ist die Phase zwischen Primär- und Sekundärstrom bzw. -spannung und wird in Minuten angegeben. Er ist positiv, wenn Sekundärstrom bzw. -spannung voreilen.

Wandlerfehler F ist die prozentuale Abweichung des mit Nennübersetzung multiplizierten Nennstromes bzw. der Nennspannung vom Primärstrom bzw. der Primärspannung. Die Fehlergröße bestimmt die Klasse des Wandlers.

Klasseneinteilung der Wandler und Verwendungsbereich

Klasse 0,2 für genaueste Leistungsmessungen und Verrechnungszählungen sowie für Labor- und Prüffeldmessungen,

Klasse 0,5 für Verrechnungszählungen und genaue Messungen,

Klasse 1 für Betriebszählungen, Betriebsmessungen und Relais mit hoher Ansprechempfindlichkeit, z. B. Richtungsrelais,

Klasse 3 (10) für Betriebsmessungen und Schutzrelais.

Schutzerdung

Zum Zwecke der *Schutzerdung* nach TGL 200-0603 müssen Unterspannungskreise von Wandlern unmittelbar an einer Klemme des Wandlers geerdet werden. Ist beim Zusammenschalten mehrerer Wandler die Erdung jedes einzelnen Wandlers nicht möglich, so muß mindestens eine gemeinsame Erdung der vorhandenen Kreise vorgenommen werden. Bei Verwendung von Zwischenwandlern ist jeder Meßwandler einzeln zu erden.

Nennströme

Daten sind in Tabelle 4.72 zusammengestellt.

Stromwandlerarten

Stromwandler mit erweitertem Meßbereich ist ein Stromwandler mit einem über den normalen Meßbereich nach beiden Seiten erweiterten Bereich, in dem der Wandler die hierfür festgesetzten Fehlergrenzen einhält und in dem er im Dauerbetrieb die zulässigen Erwärmungsgrenzen nicht überschreitet.

Ausgleichswandler ist ein Spezialwandler zum Ausgleich von Strömen bei Differentialschutzschaltungen.

Auslösewandler ist ein Spezialwandler zur Schalterauslösung mittels Wandlerstroms bzw. zur Relaisauslösung für die HOLMGREN-Generatorschutzschaltung.

Tabelle 4.73: Daten von Spannungswandlern (nach TGL 14151)

a) primäre Nennspannungen

Reihe						
0,5	10	20	30	110	220 E	380 E
Nennspannung, primär, in V						
100	3000	15000	30000	$\left(\frac{55000}{\sqrt{3}}\right)^{1)}$	$\frac{220000}{\sqrt{3}}$	$\frac{400000}{\sqrt{3}}$
220	(5000)[1)]	20000	$\frac{30000}{\sqrt{3}}$	$\frac{110000}{\sqrt{3}}$		
380	6000					
500	10000	$\frac{15000}{\sqrt{3}}$				
660						
$\frac{100}{\sqrt{3}}$	$\frac{3000}{\sqrt{3}}$	$\frac{20000}{\sqrt{3}}$				
$\frac{220}{\sqrt{3}}$	$\left(\frac{5000}{\sqrt{3}}\right)^{1)}$					
$\frac{380}{\sqrt{3}}$	$\frac{6000}{\sqrt{3}}$		Nennspannung in V, sekundär, Meßwicklung			
$\frac{500}{\sqrt{3}}$	$\frac{10000}{\sqrt{3}}$		100	$\frac{100}{\sqrt{3}}$	$\left(\frac{100}{\sqrt{3}}\right)^{1)}$	$2 \times \frac{100}{\sqrt{3}}$	$2 \times \frac{200}{\sqrt{3}}$
$\frac{660}{\sqrt{3}}$			Nennspannung in V, sekundär, Hilfswicklung			
			$\frac{100}{3}$		$\left(\frac{100}{3}\right)^{1)}$	$2 \times \frac{100}{3}$	

b) Nennleistungen, Klassen

Nennleistung in VA					Klasse	Anwendung
Meßwicklung			Hilfswicklung			
10	25	50	$\frac{50}{3}$	$\frac{100}{3}$	0,1	Laborwandler
100	200	300			0,2	Laborwandler, Verrechnungszählung
(15	30	60)[1)]	$\left(\frac{60}{3}\right.$	$\left.\frac{120}{3}\right)^{1)}$	0,5	Verrechnungszählung
(90	120	180)[1)]			1	Betriebsmessung und Schutzzwecke

[1)] Klammerwerte nicht für Neukonstruktionen

Tabelle 4.74: Fehlergrenzen von Stromwandlern

Klasse	Stromfehler ± F_i in % bei					Fehlwinkel ± δ_i in Minuten bei				
	1,2 · I_n	1,0 · I_n	0,5 · I_n	0,2 · I_n	0,1 · I_n	1,2 · I_n	1,0 · I_n	0,5 · I_n	0,2 · I_n	0,1 · I_n
0,1	0,1	0,1	0,16	0,2	0,25	5	5	7	8	10
0,2	0,2	0,2	0,29	0,35	0,5	10	10	13	15	20
0,5	0,5	0,5	0,66	0,75	1,0	30	30	36	40	60
1 und 5 P	1,0	1,0	—	1,5	2,0	60	60	—	80	120
3 und 10 P	3,0	3,0	3,0	—	—	—	—	—	—	—

Sättigungswandler ist ein Spezialwandler mit kleiner Überstromzahl zum Schutz thermischer Überstromrelais; er ist meist zugleich Anpassungswandler.

Sperrwandler ist ein Spezialwandler für die HOLMGREN-Generatorschutzschaltung.

Stufenstromwandler ist ein Spezialwandler zur Erweiterung der Meßbereiche von Meßinstrumenten, insbesondere von Leistungsmessern, wobei der Wandler in seinem Meßbereich verengte Fehlergrenzen einhalten muß.

Summenwandler ist ein Spezialwandler zur Summierung der Ströme mehrerer Meßkreise.

Strom-Spannungs-Zwischenwandler (Spannungsreduktor) ist ein Spezialwandler für die HOLMGREN-Generatorschutzschaltung.

Strom- und Spannungswandler dürfen in Betrieb einer Umgebungstemperatur bis 30 °C, kurzzeitig 40 °C, und bis −5 °C bei Innenraum-, bis −25° C bei Außenraumausführung ausgesetzt werden.
Tabelle 4.74 enthält die zulässigen Fehlergrenzen von Stromwandlern und Tabelle 4.75 diejenigen von Spannungswandlern. Jeder neue Wandler wird auf Einhaltung dieser Grenzen geprüft.

4.4.3.3. Spannungswandler

Die Daten von Spannungswandlern enthält Tabelle 4.73.

Tabelle 4.75: Fehlergrenzen von Spannungswandlern

Klasse	Spannungsfehler ± F_u in % bei 0,8···1,2facher primärer Nennspannung	Fehlwinkel ± δ_u in Minuten
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0.5	0.5	20
1	1,0	40

Die dauernden Übertemperaturen von Wandlern dürfen die in Tabelle 4.76 angegebenen Werte nicht übersteigen.

Tabelle 4.76: Zulässige Übertemperaturen von Wandlern

Wärmebeständigkeitsklasse	alle Klassen in Öl	Klassen ohne Öl					
		Y	A	E	B	F	H
zulässige Übertemperatur in K	60	45	60	75	85	110	135

Die Anschlüsse der Primärwicklung von Stromwandlern sind mit K und L gekennzeichnet, die der Sekundärwicklung mit k und l, bei mehreren Anschlüssen mit k1, l1, k2, l2 usw. Die Anschlüsse von Spannungswandlern sind mit U und V bzw. u und v gekennzeichnet.

4.4.4. Übertrager

4.4.4.1. Arten

Übertrager sollen im Bereich von 30 Hz···20 kHz die zeitlichen Spannungsänderungen linear übertragen. Die untere Frequenz wird durch die richtige Wahl der Primärinduktivität bestimmt, während für hohe Frequenzen die Wicklungskapazität und die Streuinduktivität maßgebend sind.
Übertrager, die sekundärseitig im Leerlauf arbeiten, sind *Eingangsübertrager*, solche, die sekundärseitig belastet werden, sind *Treiberstufen* oder *Ausgangsübertrager*.
Übertrager für kleinere Ströme erhalten Ferritkerne, solche für größere Ströme geblechte Eisenkerne, um Verzerrungen durch Sättigungserscheinungen zu vermeiden.
Ferritkerne werden auch zur Übertragung von Frequenzen oberhalb 20 kHz eingesetzt (Impulsübertrager). Zur Anwendung gelangen aus Ferrit E-, I- und U-Kerne (vgl. hierzu Bild 4.144). Zwei E-Kerne können bei geschliffenen Anschlußflächen zu einem M-Kern kombiniert werden. E-Kerne (Abmessungen in Tabelle 4.77) werden aus Manifer 164 hergestellt.

4.4.4.2. Kernabmessungen

Tabelle 4.77: Abmessungen für E-Kerne aus Ferrit (Maße in mm)

Bezeichnung	*a*	*b*	*c*	*e*	*f*	*g*
E 20	20	10	3,8	6,2	5,2	3,8
E 30	30	15	5,3	9,7	7,3	6,3
E 42	42	21	6,6	14,4	12,2	8,7
E 55	55	27,5	9,1	18,4	17,3	10,2

U-Kerne mit rundem Querschnitt werden in Fernsehgeräten für Zeilentransformatoren eingesetzt. Tabelle 4.78 gibt die Maße für M-, E-, U- und I-Kerne aus Dynamoblech an.

4.4.4.3. Bemessung

Damit die Primärspule der Übertrager die Spannungsquelle bei den tiefsten zu übertragenden Frequenzen wenig belastet, wird gewählt: Übertragerwiderstand größer als Innenwiderstand der Spannungsquelle. Hieraus folgt die Leerlaufinduktivität L_{1e}

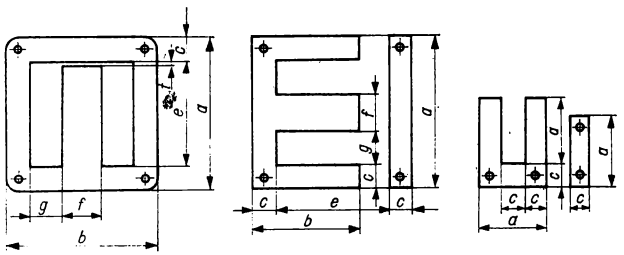


Bild 4.144. Kernblechformen für Übertrager

Tabelle 4.78: Abmessungen für verschiedene Kerne aus Dynamoblech (Maße in mm)

Kern	Kernblech	*a*	*b*	*c*	*e*	*f*	*g*	Blechdicke *s*				Luftspalt *t*				
M	M 20	20	20	3,5	13	5	4	0,05	0,1	–	–	–	0,3	–	–	–
	M 30	30	30	5	20	7	6,5	0,05	0,1	–	–	–	0,3	–	–	–
	M 42	42	42	6	30	12	9	0,05	0,1	0,35	–	(0)	–	0,5	1	–
	M 55	55	55	8,5	38	17	10,5	–	0,1	0,35	0,5	(0)	–	0,5	1	–
	M 65	65	65	10	45	20	12,5	–	0,1	0,35	0,5	(0)	–	0,5	1	–
	M 74	74	74	11,5	51	23	14	–	0,1	0,35	0,5	(0)	–	0,5	1	2
	M 85	85	85	14,5	56	29	15,5	–	0,1	0,35	0,5	(0)	–	–	1	2
	M 102	102	102	17	68	34	17	–	0,1	0,35	0,5	(0)	–	–	1	2
E/I	E 30	30	20	5	15	10	5									
	E 48	48	32	8	24	16	8									
	E 54	54	36	9	27	18	9									
	E 60	60	40	10	30	20	10			0,35	0,5					
	E 66	66	44	11	33	22	11									
	E 78	78	52	13	39	26	13									
	E 84	84	56	14	42	28	14									
	E 105	105	70	17,5	52,5	35	17,5									
	I 30	30	–	–	–	–	5									
	I 48	48	–	–	–	–	6									
	I 54	54	–	–	–	–	9									
	I 60	60	–	–	–	–	10			0,25	0,5					
	I 66	66	–	–	–	–	11									
	I 78	78	–	–	–	–	13									
	I 84	84	–	–	–	–	14									
	I 105	105	–	–	–	–	17,5									
U/I	U 30	30	40	10	–	–	–									
	U 39	39	52	13	–	–	–									
	U 48	48	64	16	–	–	–			0,35	0,5					
	U 60	60	80	20	–	–	–									
	U 72	72	96	24	–	–	–									
	U 87	87	116	29	–	–	–									
	I 30	30	–	10	–	–	–									
	I 39	39	–	13	–	–	–									
	I 48	48	–	16	–	–	–									
	I 60	60	–	20	–	–	–			0,35	0,5					
	I 72	72	–	24	–	–	–									
	I 87	87	–	29	–	–	–									

Bezeichnungsbeispiel:
Kernblech
M 55 × 0,35 × 0,5
(bedeutet Mantel-Kernblech M 55 von Blechdicke $s = 0{,}35$ mm und Luftspalt $t = 0{,}5$ mm)

der Primärspule zu

$$L_{1\sigma} = x \frac{R_{\text{Quelle}}}{\omega_u};$$

x Vielfaches entsprechend Bild 4.145.
$\omega_u = 2\pi f_u$ unterste zu übertragende Kreisfrequenz.

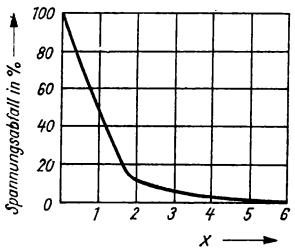


Bild 4.145. Prozentualer Spannungsverlust an der unteren Frequenzgrenze über der Hilfsgröße x

Die Windungszahl der Primärspule N_1 wird damit

$$N_1 = \sqrt{\frac{L_{1\sigma} \cdot l \cdot 10^8}{4\pi\bar{\mu} \cdot A}};$$

l Länge des Magnetflusses in cm,
$\bar{\mu}$ Permeabilität für die kleinste magnetische Feldstärke,
A aktiver Kernquerschnitt in cm².

Das Übersetzungsverhältnis ist

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R_{\text{Quelle}}}{R_{\text{Last}}}}.$$

Somit wird die Windungszahl der Sekundärspule

$$N_2 = N_1 \sqrt{\frac{R_{\text{Last}}}{R_{\text{Quelle}}}}.$$

Beispiel: Der Quellwiderstand einer Transistorstufe beträgt 420 Ω, der Lastwiderstand, gebildet durch die Schwingspule eines Lautsprechers, 6 Ω. Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis zu wählen?

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{R_{\text{Quelle}}}{R_{\text{Last}}}} = \sqrt{\frac{420\ \Omega}{6\ \Omega}} \approx 8.$$

Für einen geradlinigen Frequenzgang des Übertragers sind kleine Streuinduktivitäten durch Verschachteln beider Wicklungen und kapazitätsarme Ausführung notwendig. Hochwertige Übertrager erhalten einen Schirm aus magnetisch gut leitendem Material zur Abschirmung vor Fremdfeldern.
Der notwendige *Kernquerschnitt* in cm² ergibt sich zu

$$A \doteq 10^3 \sqrt{\frac{Sg}{f_u B s}};$$

S zu übertragende Leistung in VA,
g Verhältnis von Kupfer- zu Eisengewicht (etwa 1,0···1,5),
f_u unterste zu übertragende Frequenz in Hz,
B magnetische Flußdichte in T (T Tesla),
s Stromdichte der Wicklungen in A/mm².

Für $f_u = 50$ Hz, $B = 0{,}4$ T und $s = 0{,}5$ A/mm² wird

$$A = 3{,}3 \cdot \sqrt{S}.$$

Ausgangsübertrager übertragen die Leistung der Endstufe auf den Lautsprecher bei gleichzeitiger Anpassung. Der Gleichstrom der Endstufe (Röhre oder Transistor) bewirkt eine Gleichstromvormagnetisierung des Kerns, die zu Verzerrungen führt. Die Vormagnetisierungswirkung wird durch einen Luftspalt im Eisenkreis (0,03 mm und 0,5 mm) weitgehend aufgehoben. In Gegentaktübertragern tritt keine merkliche Vormagnetisierung auf, da beide Wicklungshälften von etwa gleich großen Strömen in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden. Dabei heben sich diese magnetischen Flüsse auf.

5. Elektrotechnische Anlagen

5.1. Allgemeine Begriffe

Die für die Entwicklung und das Errichten sowie Betreiben elektrotechnischer Anlagen notwendigen Begriffe sind in den jeweiligen Grundlagen-, Fachgrundlagen- oder Fachstandards, insbesondere in den Errichtungsstandards für elektrotechnische Anlagen – TGL 200-0600 bis TGL 200-0656 – festgelegt. In TGL 200-0600 sind alle Begriffe in unverbindlicher Form zusammengefaßt. Vor Anwendung dieser Begriffe ist zu prüfen, ob in den die Sachgebiete beschreibenden Standards verbindliche Begriffe enthalten sind. Die folgenden Begriffe stellen eine Auswahl aus den genannten Standards dar.

Abgeschlossener elektrotechnischer Betriebsraum ist ein Raum, der ausschließlich zum Betreiben elektrotechnischer Anlagen dient, ständig verschlossen ist, nur von schlüsselberechtigten Personen geöffnet, von unterwiesenen Personen betreten werden darf und von innen mit einer Klinke, von außen nur mit einem Bart- oder Sicherheitsschlüssel geöffnet werden kann.

Anlage im Freien ist eine Anlage, die den Witterungseinflüssen ungeschützt ausgesetzt ist.

Anschlußleistung ist die installierte Leistung einer Verbraucheranlage.

Ausbreitungswiderstand eines Erders ist der ohmsche Widerstand der Erde zwischen dem Erder und der Bezugserde.

Außenleiter sind Leiter, die Stromquellen mit Stromverbrauchern verbinden, aber nicht vom Mittel- oder Sternpunkt abgehen.

Aussetzbetrieb ist eine Betriebsart, bei der die angegebene zulässige Betriebszeit so kurz ist, daß die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird, und bei der die nachfolgende Betriebspause, in der das Betriebsmittel vom Netz getrennt ist, nicht lang genug ist, um das Betriebsmittel auf die Ausgangstemperatur abzukühlen. Das Belastungsspiel kann sich beliebig oft wiederholen.

Bedienungsgang ist ein Gang, von dem aus elektrotechnische Anlagen vorzugsweise bedient, z. B. geschaltet, gesteuert, geregelt oder eingestellt sowie Maßnahmen zum Herstellen und Sichern des spannungsfreien Zustandes durchgeführt werden.

Bedienungsraum ist ein Raum, der ausschließlich zur Bedienung einer Schaltanlage, z. B. Schaltwarte, Leitstelle und ähnlichem, dient.

Beharrungstemperatur (Dauertemperatur) ist die Temperatur in Grad Celsius im Gleichgewichtszustand zwischen zugeführter und abgeführter Wärme.

Berührungsschutz ist der Sammelbegriff für den Schutz gegen Berühren und den Schutz gegen zufälliges Berühren von betriebsmäßig unter Spannung stehenden Teilen.

Berührungsspannung ist die Spannung, die bei einer elektrischen Durchströmung des Menschen oder Nutztieres an diesen zwischen den Berührungspunkten auftritt.

Betreiben von elektrotechnischen Anlagen ist das Bedienen und Instandhalten von Anlagen. – *Bedienen* ist das Schalten, Einstellen, Steuern und Regeln von Anlagen, das Beobachten von Betriebsmitteln, z. B. das Ablesen von Meßwerten, weiterhin das Durchführen und Aufheben von Maßnahmen zum Herstellen und Sichern des spannungsfreien Zustandes vor Arbeitsbeginn. – *Instandhalten* ist das Warten und Instandsetzen von Anlagen, z. B. Reinigen von Anlageteilen, Räumen und Flächen, Durchführen von Prüfungen und Messungen, Auswechseln von Teilen oder Betriebsmitteln, Beseitigen von Störungen.

Betriebserdung ist die Erdung eines Punktes des Betriebsstromkreises, die für den ordnungsgemäßen Betrieb von Geräten oder Anlagen notwendig ist.

Betriebsisolierung ist die nach der Isolationsspannung bemessene Isolierung der betriebsmäßig unter Spannung stehenden Teile gegeneinander und gegen nicht betriebsmäßig unter Spannung stehende leitfähige Teile eines Betriebsmittels.

Betriebsraum ist ein Raum, in dem unter Benutzung elektrotechnischer Anlagen beliebige Arbeiten von einem Nichtfachmann durchgeführt werden.

Betriebsspannung ist die jeweils örtlich in einem Netz im ungestörten Betrieb herrschende Spannung mit Betriebsfrequenz.

Bewegliche Leitung ist eine an beiden Enden beliebig angeschlossene Leitung, deren Lage gegenüber ihrer Umgebung beim Gebrauch verändert werden kann.

Bezugserde ist der Bereich der Erde, insbesondere der Erdoberfläche, der von der betrachteten Erdungsanlage so weit entfernt ist, daß bei Stromdurchgang durch deren Erder zwischen beliebigen Punkten dieses Bereiches keine meßbaren Spannungen auftreten.

Blitzschutzanlage ist die Gesamtheit aller Einrichtungen zum gefahrlosen Auffangen und Ableiten des Blitzstroms in die Erde.

Dauerbetrieb ist eine Betriebsart, bei der die Betriebszeit mindestens so lang ist, daß die Beharrungstemperatur erreicht wird.

Dauerkurzschlußstrom ist der Effektivwert des Wechselstroms, der nach Abklingen des Ausgleichsvorgangs bestehenbleibt. Er ist abhängig von der Erregung der Generatoren. Bei Generatoren ist, sofern nichts Besonderes angegeben ist, unter Dauerkurzschlußstrom der Strom bei allpoligem Klemmenkurzschluß und Nennerregung zu verstehen.

Durchhang ist der größte lotrechte Abstand zwischen dem Leiter und der Verbindungslinie seiner beiden Aufhängepunkte.

Durchlaufbetrieb mit Aussetzbelastung ist eine Betriebsart, bei der das Betriebsmittel dauernd am Netz liegt und die angegebene zulässige Belastungszeit so kurz ist, daß die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird, und bei der die nachfolgende Belastungspause nicht lang genug ist, um die Abkühlung auf die Beharrungstemperatur im Leerlauf zu erreichen. Das Belastungsspiel kann sich beliebig oft wiederholen.

Durchlaufbetrieb mit Kurzzeitbelastung ist eine Betriebsart, bei der das Betriebsmittel dauernd am Netz liegt und die angegebene zulässige Belastungszeit so kurz ist, daß die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird, und bei der die nachfolgende Belastungspause lang genug ist, um die Abkühlung auf die Beharrungstemperatur im Leerlauf zu erreichen.

Einschaltstrom ist der größte Augenblickswert des Stroms beim Einschalten.

Elektrotechnische Anlage ist die Gesamtheit der zu einer technischen Einheit zusammengeschlossenen Betriebsmittel, die eine bestimmte Funktion, z. B. Erzeugung, Übertragung, Verteilung, Speicherung oder Umwandlung von Elektroenergie, erfüllen.

Elektrotechnischer Betriebsraum ist ein Raum, der im wesentlichen zum Betreiben elektrotechnischer Anlagen dient und in der Regel nur von unterwiesenen Personen betreten werden darf.

Elektrotechnisches Betriebsmittel ist ein in sich geschlossenes, selbständiges elektrotechnisches Bauelement, Gerät oder eine Baueinheit, die selbst wieder mehrere Betriebsmittel in sich vereinigt. Es besitzt isolierende und andere elektrische Eigenschaften. Als Betriebsmittel gelten z. B. Isolator, Kabel, Kabelgarnitur, Schaltgerät, Wandler, Transformator, Kondensator, transportable Schaltzelle, Überspannungsableiter, Stromrichter.

Erde ist die Bezeichnung für das Erdreich und für den Erdboden.

Erden ist das Herstellen einer leitenden Verbindung zwischen einem zu erdenden Anlageteil und der Erde über eine Erdungsanlage.

Erder ist ein elektrisch nicht isolierter Leiter, der direkt im Erdreich oder in einem mit dem Erdreich verbundenen elektrisch leitfähigen Stoff, z. B. Beton, eingebettet ist.

Erdschluß ist eine durch einen Fehler, auch über einen Licht bogen entstandene leitende Verbindung eines nicht geerdeten Betriebsstromkreises oder eines betriebsmäßig nicht geerdeten neutralen Leiters mit der Erde oder mit einem geerdeten Leiter.

Erdseil ist ein geerdeter Leiter, der spannungführende Leiter gegen direkte Blitzeinschläge schützt und atmosphärische Überspannungen zur Erde ableitet.

Erdung ist die Gesamtheit aller Mittel und Maßnahmen zum Erden.

Erdungsanlage ist die Gesamtheit miteinander leitend verbundener Erder einschl. der Erdungsleitungen.

Erdungsleitung ist eine Leitung, die ein Anlageteil mit einem Erder verbindet und außerhalb des Erdreiches oder isoliert im Erdreich gelegt ist. Ist in die Verbindung zwischen einem Sternpunkt- oder Außenleiter und dem Erder eine Trennstelle, eine Erdschlußdrossel oder ein anderes Gerät eingebaut, so gilt nur die Verbindung zwischen der erdseitigen Klemme des Gerätes und dem Erder als Erdungsleitung.

Erdungsspannung ist die Spannung, die bei Stromfluß durch die Erdungsimpedanz auftritt.

Explosionsgefährdeter Raum ist ein geschlossener Raum, eine im Freien liegende Betriebsanlage oder Teile eines geschlossenen Raumes oder einer im Freien liegenden Betriebsanlage, in dem sich Gase, Dämpfe oder Stäube, die explosible Gemische bilden, erfahrungsgemäß nach den örtlichen und betrieblichen Verhältnissen in gefahrdrohender Menge entwickeln, ansammeln oder ausbreiten können. Benachbarte Räume gelten ebenfalls als explosionsgefährdet, wenn zu erwarten ist, daß gefährliche Mengen solcher Stoffe in sie eindringen können. Als Beurteilungsgrundlage gelten die von der Kammer der Technik herausgegebenen Richtlinien für die Beurteilung von feuer- und explosionsgefährdeten Betriebsstätten.

Explosivstoffgefährdete Betriebsstätten sind Räume oder Teile von Räumen, im Freien liegende Betriebsanlagen oder Teile hiervon, in denen bei der Herstellung, Be- oder Verarbeitung, Aufbewahrung oder Lagerung von Explosivstoffen oder explosiven Gegenständen Zündgefahren durch elektrotechnische Anlagen entstehen können. Benachbarte Räume oder Teile derselben gelten ebenfalls als explosivstoffgefährdet, wenn zu erwarten ist, daß gefährliche Mengen solcher Stoffe in sie eindringen können.

Fehlerspannung ist die Spannung, die bei einem Isolationsfehler zwischen nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teilen oder zwischen diesen und der Bezugserde auftritt.

Fehlerspannungs-Schutzschaltung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, bei der der Betriebsstromkreis unterbrochen wird, wenn die Fehlerspannung die Auslösespannung des FU-Schutzschalters erreicht.

Fehlerstrom ist der Strom, der infolge eines Isolationsfehlers über die Fehlerstelle zum Fließen kommt.

Fehlerstrom-Schutzschaltung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, bei der der Betriebsstromkreis unterbrochen wird, wenn der Fehlerstrom den Auslösestrom des FI-Schutzschalters oder des FI-Relais erreicht.

Fester Anschluß einer Leitung ist ihre unmittelbare Verbindung mit einem elektrischen Betriebsmittel durch Schrauben, Löten, Schweißen, Nieten, Kerben, Quetschen usw.

Fest gelegte Leitung ist eine Leitung, deren Lage ohne mechanische Eingriffe nicht verändert werden kann.

Feuchter Raum ist ein Raum, in dem in der Regel eine relative Luftfeuchte über 75% bei 18°C auftritt.

Feuergefährdeter Raum ist ein Raum oder sind Teile davon, in denen leicht brennbare und/oder brennbare Stoffe in gefahrdrohender Menge eingelagert, verarbeitet oder bearbeitet werden und/oder anfallen und dadurch erfahrungsgemäß nach den örtlichen und betrieblichen Verhältnissen Brandgefahr besteht.

Freileitung ist ein oder sind mehrere auf oder an Isolatoren befestigte nichtisolierte oder umhüllte Leiter und/oder eine frei gespannte Leitung einschl. der Trag- und Befestigungsorgane.

Freischalten ist das allseitige und allpolige Trennen einer Anlage, eines Teiles einer Anlage oder eines Betriebsmittels von Teilen, die betriebsmäßig unter Spannung stehen; bei Nennspannungen über 1 kV mit Herstellung sichtbarer Schutztrennstrecken.

Fremdspannung ist eine Spannung, die in einer Leitung oder einem Betriebsmittel auftritt und nicht durch betriebsmäßige Vorgänge in dieser Leitung oder diesem Betriebsmittel verursacht wird.

Geerdeter Sternpunkt ist ein Sternpunkt, der betriebsmäßig an einer Erdungsanlage oder an einem geerdeten Anlageteil angeschlossen ist. Er ist unmittelbar geerdet, wenn kein Widerstand zwischen Sternpunkt und Erdungsanlage geschaltet ist. Er ist mittelbar geerdet, wenn ein Widerstand zwischen Sternpunkt und Erdungsanlage geschaltet ist.

Gefahrenbereich ist der innerhalb eines Raumes festgelegte Bereich, in dem sich durch die örtlichen und betrieblichen Verhältnisse Gase, Dämpfe, Nebel oder Stäube, die mit der Luft explosible Gemische bilden, in gefahrdrohender Menge ansammeln können. Diese konzentrierte Ansammlung verliert sich mit der Entfernung vom Entstehungsort entweder durch mechanische oder natürliche Entlüftungsanlagen oder je nach örtlicher Lage.

Gerät ist ein Betriebsmittel, außer Leitungen, Kabel und Schienenleiter, das bei der Erzeugung, Schaltung oder Umwandlung elektrischer Energie eine selbständige Funktion ausübt, z. B. elektrische Maschine, Schaltgerät, Stromrichter, Leistungskondensator, Meßinstrument, Heizgerät, Leuchte, Baueinheit.

Gleichrichten ist das Umformen von Wechselstrom in Gleichstrom. Die elektrische Energie fließt von der Wechselstromseite zur Gleichstromseite.

Grenztemperatur (höchstzulässige Dauertemperatur) ist die Temperatur, die höchstens zulässig ist.

Handbereich ist der räumliche Bereich, den ein Mensch mit den Händen ohne Benutzung von Hilfsmitteln von der Standfläche aus erreichen kann. Er beträgt, von der Standfläche aus gemessen, nach oben 2,50 m, in horizontalen Richtungen und nach unten 1,25 m.

Hausanschlußraum ist ein verschließbarer Raum, in dem ausschließlich die unterirdisch gelegten Energie- und Wasserversorgungsleitungen für ein oder mehrere Gebäude mit den dazugehörigen An- und Absperrvorrichtungen untergebracht sind.

Hausanschlußsicherung ist die letzte Absicherung der Anschlußleitung des Energieversorgungsbetriebes (EVB).

Heißer Raum ist ein Raum, in dem normalerweise Temperaturen von 40 °C und darüber auftreten.

Hilfsstromleitung, auch *Fernwirkleitung*, ist eine Starkstromleitung und/oder ein Kabel, über die einem Betriebsmittel Energie zum Zwecke der Betätigung dieses Betriebsmittels oder der Meldung eines Schaltzustands u. dgl. zugeführt wird (Steuerleitung, Meldeleitung).

Hochspannung ist eine Nennspannung, deren Effektivwert größer als 1 kV ist. Im Sprachgebrauch unterscheidet man außerdem zwischen Mittelspannung und Höchstspannung.

Hochstrom ist ein Strom, dessen Effektivwert über 1 kA liegt.

Höchstzugspannung ist die Zugspannung im tiefsten Punkt der Durchhanglinie der Leiter, die nach dem bei der Legung gewählten Durchhang weder bei −5 °C mit der der Berechnung zugrunde gelegten Zusatzlast noch bei −20 °C ohne Zusatzlast überschritten wird.

Informationsanlage ist eine elektrotechnische Anlage, die dem Herstellen, Erfassen, Übertragen, Verarbeiten und der Ausgabe von Informationen dient.

Informationstechnik ist die Gesamtheit aller betrieblichen, technischen, technologischen sowie wirtschaftlich-organisatorischen Einrichtungen und Prozesse zum Übermitteln von Nachrichten oder anderen Informationen durch drahtgebundene oder drahtlose Informationsanlagen.

Isolation ist der Grad der galvanischen Trennung von leitenden Teilen, die gegeneinander oder gegen Erde betriebsmäßig unter Spannung stehen.

Isolationsmittel ist ein Betriebsmittel, durch das eine Berührung von Anlageteilen und Bauteilen verschiedener Polarität untereinander und eine Berührung dieser Anlageteile durch Personen, Nutztiere und Gegenstände behindert oder ausgeschlossen wird.

Isoliermittel ist der gasförmige, flüssige oder feste Stoff, der die Isolation herstellt.

Kabel ist ein Gebilde aus einem isolierten Leiter oder mehreren voneinander isolierten Leitern mit einem Schutz gegen die Beeinträchtigung der elektrischen Funktion bei und nach Legung in Kabelgräben, Kabelkanalformsteine, Kabelkanäle oder Wasser.

Kalter Raum ist ein Raum, in dem normalerweise Temperaturen von +10 °C und darunter auftreten.

Kleinspannung ist eine Nennspannung, deren Effektivwert gleich oder weniger als 42 V Wechselspannung oder 60 V Gleichspannung ist.

Kontrollgang ist ein begehbarer Gang, ähnlich dem Bedienungsgang, der jedoch ausschließlich zur Kontrolle und Beobachtung von elektrotechnischen Anlagen dient.

Körperschluß ist eine durch einen Isolationsfehler entstandene leitende Verbindung zwischen einem betriebsmäßig unter Spannung stehenden und einem nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teil.

Kriechstrecke ist der kürzeste Weg, auf dem ein Stromübergang längs der Oberfläche einer festen Isolierung zwischen gegeneinander unter Spannung stehenden Teilen eintreten kann.

Kurzschluß ist eine leitende Verbindung von Leitern unterschiedlichen Potentials untereinander und/oder von Leitern gegen Erde, die keinem Betriebszustand entspricht.

Kurzzeitbetrieb ist eine Betriebsart, bei der die angegebene zulässige Betriebsart so kurz ist, daß die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird, und bei der die nachfolgende Betriebspause, in der das Betriebsmittel vom Netz getrennt ist, lang genug ist, um das Betriebsmittel auf die Anfangstemperatur abzukühlen.

Landwirtschaftlich genutzter Raum ist ein Raum, in dem durch die Einwirkung von Feuchtigkeit und Staub mit gleichzeitig chemisch angreifenden Dämpfen, Säuren oder Salzen erhöhte Beanspruchung für die Isolation der elektrotechnischen Anlage besteht. Durch Vorhandensein leichtbrennbarer Stoffe besteht neben der Unfallgefahr auch Brandgefahr, besonders für Nutztiere.

Leichtbrennbar sind solche Stoffe, die in Gegenwart von Sauerstoff durch eine Zündquelle mit einer bestimmten Zündenergie, z. B. die Flamme eines Zündholzes, innerhalb von 10 s zum Glimmen oder Brennen mit offener Flamme gebracht werden können und nach Entfernen der Zündquelle von selbst weiterglimmen oder weiterbrennen. Dazu zählen brennbare Gase, Dämpfe, Flüssigkeiten, Stäube sowie auch von Natur aus feste oder fest gepackte Stoffe.

Leistungsfaktor ist das Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung.

Leiter ist ein für die Fortleitung elektrischer Energie bestimmtes Gebilde oder Aufbauelement. — Man unterscheidet Leiter nach der Anzahl der Einzeldrähte als eindrähtig, mehrdrähtig, vieldrähtig, feindrähtig, feinstdrähtig.

Leiterspannung ist die Spannung zwischen einem Außenleiter und der Erde.

Leitung ist ein Gebilde aus einem isolierten Leiter oder mehreren voneinander isolierten Leitern mit einem Schutz gegen die Beeinträchtigung der elektrischen Funktion, jedoch nicht geeignet für die Legung in Kabelgräben, Kabelformsteine oder Wasser.

Luftstrecke ist die kürzeste als Fadenmaß gemessene Entfernung zwischen zwei leitenden Teilen in der Luft.

Maschennetz ist ein geschlossenes Netzgebilde aus mehreren sich kreuzenden Leitungen, die in den Kreuzungspunkten miteinander verbunden und gesichert sind. — Die Kreuzungspunkte nennt man Knotenpunkte, das geschlossene Gebilde zwischen den Knotenpunkten eine Masche und jedes Leitungsstück eine Maschenleitung.

Masse ist die Gesamtheit aller leitfähigen Teile von Betriebsmitteln und Anlagen, die unter normalen Bedingungen von den spannungführenden Teilen isoliert sind.

Medizinisch genutzter Raum ist ein Raum, der bestimmungsgemäß von medizinischen Fachkräften zur Untersuchung oder Behandlung von Menschen oder Tieren benutzt wird. Dazu gehören auch medizinische Bäder und Massageräume.

Näherung ist die Annäherung eines betriebsmäßig spannungführenden Teiles einer elektrotechnischen Anlage an ein leitendes Teil derselben oder einer anderen elektrotechnischen Anlage. — Es wird unterschieden: *Eigennäherung* ist eine Näherung von Teilen, die betriebsmäßig miteinander auf beliebigem Weg galvanisch verbunden sind. *Fremdnäherung* ist eine Näherung von Teilen an Teile derselben oder einer anderen Anlage, die betriebsmäßig nicht miteinander galvanisch verbunden sind.
Im *Blitzschutz* wird unterschieden:

Eigennäherung ist die Annäherung von Teilen einer Blitzschutzanlage untereinander, so daß die Gefahr eines Überschlags besteht.

Fremdnäherung ist die Annäherung von Teilen einer Blitzschutzanlage zu vorhandenen Metallteilen oder elektrotechnischen Anlagen, z. B. Starkstromanlagen, so daß die Gefahr eines Überschlags besteht.

Nasser Raum ist ein Raum, dessen Wände infolge betrieblicher oder natürlicher Umstände normalerweise naß sind oder aus betrieblichen Gründen des öfteren abgespritzt werden.

Nebenanlage ist eine Anlage, die nicht unmittelbar zur elektrotechnischen Anlage gehört, jedoch zu deren Betrieb notwendig ist.

Nennbetrieb ist der Betrieb bei Nennspannung, Nennstrom und Nennfrequenz.

Nenngröße ist eine physikalische Größe, nach der ein Betriebsmittel oder eine Anlage benannt wird und auf die bestimmte Betriebseigenschaften bezogen werden.

Nennspannung ist diejenige Spannung, nach der ein Betriebsmittel, eine Anlage oder ein Netz benannt wird.

Nennstrom ist der Strom, nach dem ein Betriebsmittel oder eine Anlage benannt wird und auf den bestimmte Betriebseigenschaften bezogen werden.

Netz ist die Gesamtheit der galvanisch miteinander verbundenen Anlagenteile gleicher Nennspannung. Als miteinander verbunden gelten ferner auch Anlagenteile, die durch Kondensatoren gekoppelt sind, sofern diese zur Leistungsübertragung dienen. Werden Teile eines Netzes getrennt voneinander betrieben, so gelten diese Teile als verschiedene Netze.

Neutraler Leiter, auch *Mittelleiter* genannt, ist ein Leiter, der vom Sternpunkt eines Drehstromsystems oder vom Mittelpunkt eines Gleichstromsystems ausgeht.

Nichtbrennbar sind solche Stoffe, die in Gegenwart von Sauerstoff beim Einwirken einer Zündquelle, gleich welcher Zündenergie, weder entflammen noch glimmen oder verkohlen.

Niederspannung ist eine Nennspannung, deren Effektivwert größer als 42 V und nicht größer als 1 000 V ist.

Nulleiter ist ein Schutzleiter bei Anwendung der Schutzmaßnahme Nullung.

Nullung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, bei der die nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teile an den Nulleiter angeschlossen sind und bei der der fehlerbehaftete Außenleiter oder der gesamte Betriebsstromkreis unterbrochen wird, wenn der Fehlerstrom den Abschaltstrom der Überstromschutzeinrichtung erreicht.

Obere Betriebsspannung ist die höchste, dauernd zulässige Spannung, die an den Klemmen eines Betriebsmittels auftreten darf. Bis zu diesem Wert müssen die Nennwerte des Betriebsmittels, z. B. Nennausschaltvermögen, erfüllt sein. Sie darf höchstens gleich der Isolationsspannung sein.

Ortsfest sind Betriebsmittel und Anlagen, wenn sie infolge ihrer Beschaffenheit oder der mechanischen Befestigung vom Hersteller bei üblicher Verwendung nicht für eine Ortsveränderung vorgesehen sind.

Ortsfeste Leitung ist eine Leitung, die auf einer festen Unterlage so angebracht ist, daß sich ihre Lage nicht verändert.

Ortsveränderlich sind Betriebsmittel oder Anlagen, die vom Hersteller bei üblicher Verwendung für einen Wechsel ihres Einsatzortes im spannungsfreien oder im spannungführenden Zustand vorgesehen sind.

Parallelbetrieb ist das eingangs- und ausgangsseitige Zusammenschalten von Betriebsmitteln oder Anlagen derart, daß sie zwangsläufig Energie über eine gemeinsame Zuführung erhalten und an denselben Verbraucher und/oder dieselbe Anlage weitergeben, auch wenn ein Betriebsmittel oder eine Anlage ausfällt.

Phase ist eine im Sprachgebrauch übliche Bezeichnung für die Außenleiter.

Prüfung ist der Nachweis der mechanischen und elektrischen Funktionstüchtigkeit einer elektrotechnischen Anlage sowie die Kontrolle der Erfüllung aller einschlägigen Bestimmungen und Anordnungen.

Raum ist ein durch Bauteile (Wände, Decken) abgegrenztes Bauwerk, Bauwerksteil oder ein durch andere Maßnahmen abgeteiltes Gebiet im Freien.

Raum mit hoher Unfallgefahr ist ein Raum, in dem durch

1. erhöhte Temperatur (heißer Raum) und dadurch hervorgerufene Schweißbildung oder
2. Feuchtigkeit (feuchter oder nasser Raum) oder
3. leitende Umgebung (Steinfußboden, Kesselwände, Metallkonstruktionen) im Handbereich der elektrotechnischen Anlagen oder
4. leitenden Staub (staubiger Raum) oder
5. enge Raumverhältnisse (enger Raum) oder
6. eine ungeschützte elektrotechnische Anlage (Prüffeld, abgeschlossener elektrotechnischer Betriebsraum) die Möglichkeit des Überbrückens gegeneinander Spannung führender Teile durch den Menschen besteht oder der Übergangswiderstand infolge der Feuchtigkeit oder einer großflächigen Berührung vermindert wird.

Reihe, verbunden mit einer Ziffer oder Zahl, ist die im Sprachgebrauch angewandte Kurzbezeichnung zum Betriebsmittel, welche die Nennspannung entsprechend der angegebenen Ziffer oder Zahl in Kilovolt ausdrückt.

Ringleitung ist eine elektrotechnische Leitung, deren Anfang und Ende über getrennte Sicherungen an demselben Speisepunkt angeschlossen sind.

Rückleiter sind Leiter, die Rückstrom führen können. Dazu gehören Fahrschienen von Geräten, die mittels Schleifleitungen eingespeist werden, und die dazu gehörenden Leitungen und Schienen sowie bei Gleichstromanlagen die Leiter, die nicht über Kontakte geführt werden und deren Minus- oder Pluspol direkt mit dem Gerät verbunden ist.

Rückspannung ist eine Spannung, die an den Eingangsklemmen eines Betriebsmittels als Folge einer Verbindung seiner Ausgangsklemmen mit anderen Betriebsmitteln auftritt.

Schaltanlage ist eine Verteilungsanlage, deren Schaltgeräte es ermöglichen, die abgehenden Hauptstromleitungen elektrisch mit der Sammelschiene zu verbinden oder von ihr zu trennen.

Schiene ist ein massiver, nichtisolierter Leiter, der infolge seiner Form oder seines Querschnitts eine hohe Festigkeit gegen Formänderung hat. Er kann farbig gekennzeichnet sein.

Schlagweite ist die kürzeste, in gasförmigen Isoliermitteln mit einem gespannten Faden gemessene Entfernung zweier nichtisolierter, gegeneinander unter Spannung stehender leitender Teile. Bei mehrteiligen Isolatoren und Isolatorenketten gilt als Schlagweite die Summe der zwischen den einzelnen Armaturen ermittelten Fadenmaße, sofern nicht die Schlagweite zwischen den Endarmaturen kleiner ist.

Schleifleitung ist der betriebsmäßig unter Spannung stehende Teil einer Schleifleitungsanlage sowie zugehörige Mittel-, Null- oder Schutzleiter.

Schleifleitungsanlage ist die Gesamtheit der zur Stromabnahme an Fördergeräten dienenden nichtisolierten Leiter und aller Einrichtungen, die zu deren Befestigung dienen, wie Maste, Leitungsträger, Isolatoren, Spannvorrichtungen, ferner Schalter und Überspannungsschutzeinrichtungen auf den Strossen.

Schrittspannung ist die Spannung, die bei einer elektrischen Durchströmung des Menschen oder Nutztieres zwischen den Füßen auftritt.

Schutzabstand ist der Abstand zwischen unter Spannung stehenden Teilen und dem Berührungsschutz dienenden Schutzvorrichtungen. Als Schutzabstand gelten auch die vorgeschriebenen Mindesthöhen über Gängen.

Schutzart kennzeichnet die konstruktiven, elektrotechnischen und wärmetechnischen Maßnahmen am Betriebsmittel, die das Entstehen einer Explosion von Gas- oder Dampf-Luft-Gemischen ausschließen.

Schutzbereich ist ein Bereich, der zum Schutz gegen Berührung und/oder zufälliges Berühren spannungführender Teile vorgeschrieben ist.

Schutzerdung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung, die durch unmittelbare Erdung eines nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden Teils eines Betriebsmittels oder einer Anlage erreicht wird.

Schutz gegen Berühren ist ein Schutz, der Menschen und Nutztiere daran hindert, betriebsmäßig unter Spannung stehende Teile zu berühren oder sich diesen gefahrbringend zu nähern.

Schutzgrad kennzeichnet die Art des Berührungs-; Fremdkörper- und Wasserschutzes.

Schutzisolierung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, die das Auftreten einer Fehlerspannung an den berührbaren Teilen durch eine zusätzlich zur Betriebsisolierung angeordnete Schutzisolierung oder durch die verstärkte Ausführung der Betriebsisolierung verhindert.

Schutzklasse elektrischer Betriebsmittel oder -geräte ist die Bezeichnung von Klassen, die Schutzmaßnahmen oder die Einbeziehung in Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung bei der Ausführung der Betriebsmittel oder -geräte kennzeichnen.

Schutzkleinspannung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, die das Auftreten einer zu hohen Berührungsspannung dadurch verhindert, daß die Betriebsmittel mit unter bestimmten Bedingungen erzeugten Spannungen betrieben werden, die einen vorgeschriebenen Wert nicht überschreiten.

Schutzleiter ist ein Leiter, an den zur Durchführung einer Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung die nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teile der Betriebsmittel angeschlossen sind oder angeschlossen werden dürfen.

Schutzleitungssystem ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, die das Auftreten einer zu hohen Berührungsspannung dadurch verhindert, daß kein Leiter des Betriebsstromkreises unmittelbar geerdet ist und daß die nicht zu den Betriebsstromkreisen gehörenden leitfähigen Teile der Betriebsmittel untereinander sowie mit den der Berührung zugänglichen zusammenhängenden leitfähigen Konstruktionselementen, Rohrleitungssystemen, Kabelmänteln u. dgl. über einen Schutzleiter verbunden sind.

Schutzmaßnahme ist eine oder sind mehrere Maßnahmen gegen elektrische Einwirkungen zum Schutz von Mensch und Nutztier.

Schutztrennung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, die das Auftreten einer Berührungsspannung dadurch verhindert, daß die betriebsmäßig stromführenden Leiter des Betriebsstromkreises von denen des speisenden Elektroenergiesystems galvanisch getrennt und gegen Erde elektrisch isoliert sind und daß im Betriebsstromkreis nur ein Gerät angeschlossen ist.

Signalanlagen sind Anlagen zur Auslösung und zum Empfang von optischen oder akustischen Zeichen, die zum Herbeirufen von Hilfe und zur Anzeige von Zustandsänderungen und Fehlern dienen.

Spezifischer Erdwiderstand ist der spezifische elektrische Widerstand des Erdreiches. Er wird vorzugsweise in Ω m angegeben. Sein Zahlenwert entspricht damit dem Widerstand in Ohm eines Würfels Erdreich von 1 m Kantenlänge zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen dieses Würfels.

Standortisolierung ist eine Isolierung des Standorts, bei welcher der Mensch durch seinen Standort gegen Erde und gegen die im Handbereich befindlichen, mit Erde in Verbindung stehenden leitfähigen Teile isoliert ist, z. B. bei Arbeiten an Oberleitungen der Straßenbahn.

Starkstromanlage ist eine Anlage, die dem Erzeugen, Umwandeln, Speichern, Fortleiten, Verteilen und Anwenden elektrischer Energie zum Verrichten einer Arbeit, z. B. in Form von mechanischer Arbeit zur Wärme- und Lichterzeugung, oder bei elektrischen Vorgängen dient. — Es wird unterschieden zwischen

Starkstromanlage bis 1 000 V Wechselspannung und Nennfrequenz bis 500 Hz oder bis 1 500 V Gleichspannung und

Starkstromanlage über 1 kV Wechselspannung und Nennfrequenz bis 500 Hz oder über 1,5 kV Gleichspannung.

Starkstrominstallation ist die Gesamtheit der in oder an einem Bauwerk angebrachten Betriebsmittel, z. B. Schaltgeräte, Abzweigungen, Leitungen, die zur Energieversorgung der in diesem Bauwerk befindlichen Betriebsmittel oder Anlagen dienen.

Starre Sternpunkterdung liegt vor, wenn alle Sternpunkte unmittelbar geerdet sind.

Staubfreier Raum ist ein Raum, in dem weder durch betriebliche noch durch atmosphärische Umstände ein Staubanfall auftritt.

Staubiger Raum ist ein Raum, in dem durch betriebliche oder atmosphärische Umstände ein Staubanfall auftritt. — Es wird unterschieden zwischen:

geringer Staubanfall, ohne Beeinträchtigung der Betriebssicherheit,

starker Staubanfall, mit Beeinträchtigung der Betriebssicherheit.

Steuererder ist ein Erder, der zur Potentialsteuerung dient.

Steuerleitung ist eine Leitung (auch Kabel), über die einem Betriebsmittel Energie zum Zwecke der Betätigung dieses Betriebsmittels zugeführt wird.

Stromkreis ist der Weg des Stromes von einem Erzeugungs- oder Umsetzmittel über beliebige leitende Stoffe zurück zu demselben Erzeugungs- oder Umsetzmittel. Im Sprachgebrauch bedeutet der Begriff Stromkreis den Teil eines Stromkreises von einem Pol eines Verteilers zurück zum anderen Pol dieses Verteilers.

Stromrichten ist das Umsetzen eines Stromes in einen Strom mit einer anderen Erscheinungsform, z. B. umrichten, wechselrichten, gleichrichten.

Stromrichteranlage ist die Zusammenfassung der gemeinsam als Stromrichter wirkenden Teile, die in ihrem Aufbau selbständig sind und erst an ihrem Aufstellungsort ihrer Bestimmung gemäß elektrisch zusammengeschaltet werden. Dabei kann z. B. der Stromrichtertransformator getrennt vom Stromrichtersatz aufgestellt sein.

Stromschiene ist ein starrer Leiter zur Stromabgabe an die Fahrzeuge, der neben oder zwischen den Fahrschienen isoliert gelegt ist.

Strossenleitung ist eine isolierte Leitung, die frei beweglich verlegt ist und entsprechend dem Fortschritt der Arbeiten der Geräte in ihrer Lage verändert werden kann, ohne jedoch den Bewegungen dieser unmittelbar zu folgen.

Thermische Festigkeit ist die Festigkeit gegen Zerstörung durch Stromwärme.

Transportabel sind ortsveränderliche Betriebsmittel oder Anlagen, wenn die Ortsveränderung in komplettem Zustand durch fremde Transportmittel erfolgt.

Trenn-Fehlerstrom-Schutzschaltung ist eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen, die das Auftreten einer zu hohen Berührungsspannung durch galvanische Trennung der Betriebsstromkreise vom speisenden Elektroenergiesystem verhindert und die beim Auftreten eines bestimmten Fehlerstroms den Betriebsstromkreis unterbricht.

Trenntransformator ist ein Volltransformator zur Erfüllung der Anforderungen der Schutzmaßnahme »Schutztrennung«.

Trockener Raum ist ein Raum, in dem normalerweise kein Kondenswasser auftritt und die relative Luftfeuchte 75% bei 18 °C nicht übersteigt.

Verbraucheranlage ist die Gesamtheit aller elektrotechnischen Anlagen und Betriebsmittel, die hinter einer Übergabestation, einem Zähler oder einer anderen, dem gleichen Zweck dienenden Einrichtung liegen.

Zeitweise feuchter Raum ist ein Raum, der in der Regel den Bedingungen eines trockenen Raumes genügt, jedoch gelegentlich eine relative Luftfeuchte über 75% bei 18 °C aufweist.

Zelle ist eine auf dem Boden stehende Konstruktion aus geeigneten Baumaterialien, die mindestens einseitig, jedoch nicht allseitig einen Schutzgrad aufweist.

5.2. Leitungen, Kabel, Freileitungen, Armaturen

5.2.1. Starkstromleitungen

Als wichtigste Standards sind zu beachten:

TGL 200-0613	Leitungen in elektrotechnischen Anlagen
TGL 21 804	Starkstromleitungen für feste Legung
TGL 21 805	Starkstromleitungen für ortsveränderliche Betriebsmittel
TGL 24 450	Starkstromleitungen für besondere Zwecke
TGL 21 590	Klemmanschlüsse
TGL 200-3762	Verbindungsgeräte für Nennspannungen bis 1 000 V

5.2.1.1. Auswahl der Leitungen

Leitungen sind so auszuwählen, daß sie den im Betrieb zu erwartenden mechanischen, elektrischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen sowie der Einwirkung von Feuchtigkeit und Strahlung, z. B. UV-Strahlen, standhalten. Der Einsatz von Leitungen ist unzulässig, wenn dafür ein Legeverbot entsprechend Tabelle 5.1 besteht. Metallmäntel, Beidrähte, Tragorgane und Schirme von Leitungen dürfen nicht als betriebsmäßig stromführende Leiter verwendet werden.

5.2.1.2. Leitermindestquerschnitte

Die Leitermindestquerschnitte sind entsprechend den elektrischen Bedingungen, z. B. thermische Belastung, Spannungsabfall, Leiterimpedanz, thermische und mechanische Kurzschlußfestigkeit, den im Betrieb zu erwartenden mechanischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen sowie der Art der Verbindung gemäß Tabelle 5.2 festzulegen.

5.2.1.3. Schutz gegen zu hohe Erwärmung

Leitungen dürfen nur so hoch belastet werden, daß die Leitergrenztemperaturen nicht überschritten werden. Bei der Berechnung der thermischen Kurzschlußstromfestigkeit von Leitungen sind als *höchstzulässige Leitergrenztemperaturen bei Kurzschluß* zugrunde zu legen:

für Leitungstrossen	150 °C,
für Leitungen mit Plast- oder Gummiisolierung	180 °C,
für Leitungen mit Silikongummi- oder Glasseidenisolierung	300 °C.

Wegen der Vorbelastung der Leitungen ist von der Betriebstemperatur auszugehen, die sich bei der Nennumgebungstemperatur des Erzeugnisses, z. B. Bauelement, Baugruppe, Gerät, Anlage, und dem größtmöglichen Betriebsstrom ergibt. Die in den Tabellen 5.3 und 5.4 genannten Dauerstrombelastbarkeitswerte beziehen sich auf Leitungen mit Plastisolierung, Leitergrenztemperatur 70 °C bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C, auf Leitungen mit Gummiisolierung, Leitergrenztemperatur 60 °C bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C, wenn die angegebenen Dauerstrombelastbarkeitswerte mit dem Faktor 0,95 multipliziert werden, und auf Leitungen mit Silikongummi- oder Glasseidenisolierung, Leitergrenztemperatur 180 °C bei einer Umgebungstemperatur von 55 °C.

Tabelle 5.1: Legeverbot für Leitungen

Leitungsart	Legeverbot							
	in Erde oder in unzugänglichen Trassen außerhalb von Bauwerken	in flüssigen Medien	in feuchten oder nassen Räumen oder im Freien	in oder unter Putz	auf Putz, Pritschen, Tragbügeln, Haken	in Betonkanälen, Beton- oder Tonrohren	auf Holz, Karton, Span- oder Faserplatten	wenn die Leitung unmittelbar berührt werden kann
Plast-, Sonderplast- oder Gummiaderleitung, Sondergummiaderleitung ohne Mantel, Silikongummiaderleitung, Aderleitung, glasseideisoliert, Schaltdraht und -litze, plast- oder silikongummiisoliert	×	×	×[1]	×[1]	×[1]	×	×	×[2]
Sondergummiaderleitung mit Mantel ungeschirmt	×	×	–	×[1]	–	×	–	×[2]
Sondergummiaderleitung mit Mantel geschirmt	×	×		×[1]	–	×	–	–
Stegleitung, Sonderstegleitung	×[1]	×	×	–[5]	×		×	×
Plastmantelleitung in flacher Ausführung, Fm-Mantelleitung, Leuchtröhrenleitung, geschirmt			–	–	–	–	–	–
Leuchtröhrenleitung, ungeschirmt	×		×[1]	×[1]	×[1]		×	×[2]
Flache Gummimantelleitung (Illuminationsleitung)	×		–	×	×	×	–	–
Heizleitung ungeschirmt			×	–	×	×	×	×[2]
Heizleitung geschirmt	–		–	–	×	–	×	–
Zwillings- und Drillingsleitung, besonders leichte Plastschlauchleitung, flache leichte Plastschlauchleitung, Gummischlauchleitung mit Textilgeflecht		×		×	×	×		–[6]
Runde leichte Plastschlauchleitung, leichte Gummischlauchleitung, Fm-Plastschlauchleitung					×	×	×	–
Mittlere Plastschlauchleitung		×[3]	–[7]		×[4]	×	–	–
Mittlere Gummischlauchleitung, Fm-Gummischlauchleitung		×[3]	–		×[1]		–	–
Silikongummischlauchleitung	×		–		–			–
Plastschlauchleitung mit Tragorgan	×		–		–	–	–	–
Starke Gummischlauchleitung, Bergwerk-Gummischlauchleitung, Leitungstrossen	×[4]	×[3]	–		–		–	–
Schweißleitung			–		–	–		–
Hochspannungs-Röntgenleitung mit Plastmantel					–	×		–
Hochspannungs-Röntgenleitung mit Gummimantel			–		–	×	–	–

× Legeverbot, – Legung zulässig;

[1]) Legeverbot, außer in Rohren oder Kanälen; [2]) Legeverbot, außer in Baueinheiten und in Kleinspannungsanlagen; [3]) Legeverbot, außer in Wasser; [4]) Legeverbot, außer im Bergbau, auf Baustellen und für ortsveränderliche Anlagen; [5]) Legung zulässig, außer in feuchten oder nassen Räumen oder im Freien; [6]) Legung zulässig, außer als Verlängerungsleitung; [7]) Legung zulässig, bei ortsveränderlicher Legung jedoch nur bis −5 °C, bei Nachweis der Gebrauchsfähigkeit bis −12 °C zulässig

Tabelle 5.2: Leitermindestquerschnitte

Legungsart/Einsatzgebiet	Leiternennquerschnitt Kupfer mm²	Aluminium mm²
Leitungen in Installationsanlagen	1,5	2,5
zwischen Hausanschlußkästen und Verrechnungszähleinrichtung	nach TGL 190-240/02	
zwischen Verrechnungszähleinrichtung und Wohnungsverteiler	4	6
zwischen Installationsfernschaltern und Tastern	0,2	2,5
Leitungen, die der Steuerung, Regelung, Überwachung und dem Schutz von Starkstromanlagen dienen	0,35	2,5
Leitungen mit hoher Stoß- und/oder Schwingbeanspruchung, Einsatzgruppe G III und höher nach TGL 200-0057/04		
eindrähtig	2,5	10
viel- oder feindrähtig	1	—
an Fahrkörben von Aufzügen	nach TGL 200-0634/01	
auf Schienenfahrzeugen und gleislosen Elektrofahrzeugen	nach TGL 200-0632/02	
Leitungen auf Schiffen	1	—
Leitungen bei direktem Anschluß an Sammelschienen oder an Hauptverteilungsleitungen		
in Schalt- und Verteilungsanlagen	2,5	4
in Stromrichtern	nach TGL 200-0608/04	
Leitungen in Baueinheiten	0,35	2,5
für fabrikfertige Baugruppen, die in die Baueinheiten montiert werden	0,2	2,5
Leitungen in Sekundärstromkreisen von Stromwandlern	2,5	—
bei einem sekundären Nennstrom von 1 A und Anschluß von Betriebsmeßgeräten		
innerhalb von Baueinheiten	1	—
außerhalb von Baueinheiten	1,5	—
bei Anschluß von Verrechnungsmeßeinrichtungen in Stromrichtern	nach TGL 200-0608/04	
Leitungen zum Anschluß ortsveränderlicher Betriebsmittel der Schutzklasse II oder III nach TGL 21 366, deren Länge 2 m nicht überschreitet und deren Steckverbinder fest an die Leitung angeformt sind (Geräteanschlußleitung, Anschlußleitung)		
mit einem Nennstrom bis 1 A	0,1	—
bis 2,5 A	0,35	—
mit einem Nennstrom bis 2,5 A	0,5	—
bis 10 A	0,75	—
Leitungen mit Kupplungs- oder Tischsteckdose (Mehrfachsteckdose) und Kupplungsstecker (Verlängerungsleitung) mit einem Nennstrom bis 10 A	0,75	—
Hauseinführungsleitungen	16	25
Schutzleiter und Potentialausgleichleitungen	nach TGL 200-0602/03	
Erdungsleitungen	nach TGL 200-0603/02	

Tabelle 5.3: Dauerstrombelastbarkeitswerte und höchstzulässiger Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung für Leitungen mit Kupferleiter

Leiternennquerschnitt	Dauerstrombelastbarkeit			Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung		
mm²	A			A		
	Anzahl der betriebsmäßig stromführenden Leitungen oder Adern					
	1	2	3[1])	1	2	3[1])
0,2	7,0	—	—	6	—	—
0,25	8,5	—	—	6	—	—
0,35	10	—	—	10	—	—
0,5	12	10	9	10	10	6
0,75	16	13	12	16	10	10
1	20	17	15	20	16	10
1,5	26	22	20	25	20	20
2,5	36	31	27	36	25	25
4	50	43	38	50	40	36
6	63	54	50	63	50	50
10	86	74	64	80	63	63
16	117	101	87	100	100	80
25	155	133	116	125	125	100
35	192	165	144	160	160	125
50	240	206	180	224	200	160
70	300	259	225	300	250	224
95	365	314	274	355	315	250
120	425	366	319	425	355	315
150	480	413	360	425	400	355
185	542	466	406	500	425	400
240	640	551	480	630	500	425
300	735	633	551	630	630	500

[1]) Werte gelten auch für Drehstrom-4-Leitersysteme mit 4. neutralem Leiter.

Beachte die Strombelastbarkeitsfaktoren nach den Tabellen 5.5···5.8.

Tabelle 5.4: Dauerstrombelastbarkeitswerte und höchstzulässiger Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung für Leitungen mit Aluminiumleiter

Leiternennquerschnitt	Dauerstrombelastbarkeit			Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung		
mm²	A			A		
	Anzahl der betriebsmäßig stromführenden Leitungen oder Adern					
	1	2	3[1])	1	2	3[1])
2,5	27	23	20	25	20	20
4	37	32	28	36	32	25
6	50	43	37	50	40	36
10	67	57	50	63	50	50
16	90	77	67	80	63	63
25	120	103	90	100	100	80
35	148	127	111	125	125	100
50	187	161	140	160	160	125
70	231	200	173	224	200	160
95	282	243	212	250	224	200
120	328	283	246	315	250	224
150	376	325	283	355	315	250
185	430	370	322	425	355	315
240	502	432	376	500	425	355
300	578	497	433	500	425	425

[1]) Werte gelten auch für Drehstrom-4-Leitersysteme mit 4. neutralem Leiter.

Beachte die Strombelastbarkeitsfaktoren nach den Tabellen 5.5···5.8.

5.2.1.4. Strombelastbarkeitsfaktoren

Bei gleichzeitiger und dauernder Strombelastung von mehr als 3 einadrigen Starkstromleitungen (gebündelt, in Rohr oder Leitungskanal) und von mehr als 3 Adern in einer mehradrigen Starkstromleitung sind die Strombelastbarkeitswerte der Tabelle 5.3 oder 5.4 für eine Ader mit den Strombelastbarkeitsfaktoren der Tabelle 5.5 zu multiplizieren.

Tabelle 5.5: Strombelastbarkeitsfaktoren für mehr als 3 einadrige Leitungen (gebündelt, in Rohr oder Leitungskanal) und mehr als 3 Adern in einer mehradrigen Leitung

Anzahl der einadrigen Leitungen oder Adern	Strombelastbarkeitsfaktor
4	0,68
5	0,62
6	0,58
7	0,55
8	0,53
9	0,50
10	0,48
15	0,42
20	0,38
25	0,35
30	0,33
35	0,31
40	0,30
45	0,29
50	0,28

Bei Häufung von gleichzeitig belasteten mehradrigen Starkstromleitungen sind die Strombelastbarkeitswerte der Tabelle 5.3 oder 5.4 mit den Strombelastbarkeitsfaktoren der Tabelle 5.6 zu multiplizieren.
Bei Nachinstallationen an gehäuft gelegten Starkstromleitungen sind die Strombelastbarkeitswerte der bereits vorhandenen Leitungen entsprechend den Strombelastbarkeitsfaktoren der Tabelle 5.5 und/oder 5.6 zu reduzieren.
Die Strombelastbarkeitswerte der Tabelle 5.3 oder 5.4 sind bei Umgebungstemperaturen

- dauernd anders als 25 °C für Starkstromleitungen mit einer Leitergrenztemperatur bei ungestörtem Betrieb von 60 bis 90 °C mit den Strombelastbarkeitsfaktoren der Tabelle 5.7,
- über 55 °C für Starkstromleitungen mit einer Leitergrenztemperatur bei ungestörtem Betrieb von 180 °C mit den Strombelastbarkeitsfaktoren der Tabelle 5.8

zu multiplizieren.

Tabelle 5.7: Strombelastbarkeitsfaktoren in Abhängigkeit konstanter Umgebungstemperaturen für Leitungen mit einer Leitergrenztemperatur bei ungestörtem Betrieb von 60 °C bis 90 °C

Umgebungstemperatur	Strombelastbarkeitsfaktoren für Leitungen mit einer Leitergrenztemperatur von			
°C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
5		1,25		
10		1,19		
15		1,13		
20		1,07		
25		1,0		
30	0,92	0,94	0,95	0,96
35	0,83	0,88	0,89	0,91
40	0,74	0,82	0,83	0,87
45	0,63	0,75	0,77	0,82
50	0,51	0,67	0,71	0,77
55	0,36	0,58	0,64	0,72
60	–	0,47	0,56	0,66
65	–	0,30	0,48	0,59
70	–	–	0,40	0,52
75	–	–	0,31	0,44
80	–	–	–	0,36
85	–	–	–	0,28

Tabelle 5.8: Strombelastbarkeitsfaktoren in Abhängigkeit konstanter Umgebungstemperatur für Leitungen mit einer Leitergrenztemperatur von 180 °C

Umgebungstemperatur °C	Strombelastbarkeitsfaktor
55	1,00
60	0,98
70	0,94
80	0,90
90	0,85
100	0,80
110	0,75
120	0,69
130	0,63
140	0,56
150	0,49
160	0,40
170	0,28
175	0,20

Tabelle 5.6: Strombelastbarkeitsfaktoren bei Häufung von mehradrigen Leitungen

Anzahl der mehradrigen Leitungen	Strombelastbarkeitsfaktoren bei				
	Bündellegung frei in Luft oder auf Putz	Legung in Rohr oder Leitungskanal		direkter Nebeneinanderanordnung auf Putz	Neben- und Übereinanderanordnung auf Pritschen oder in Baueinheiten
		auf Putz	unter Putz		
2	0,89	0,81	0,77	0,89	0,89
3	0,80	0,75	0,67	0,80	0,80
4	0,73	0,69	0,60	0,73	0,73
5	0,69	0,65	0,54	0,71	0,69
6	0,66	0,62	0,50	0,70	0,66
7	0,63	0,60	0,48	0,69	0,64
8	0,61	0,58	0,45	0,69	0,62
9	0,59	0,56	0,43	0,68	0,60
10	0,57	0,55	0,41	0,68	0,58
15	0,50	0,49	0,36	0,66	0,55
20	0,47	0,46	0,32	0,64	0,52
25	0,44	0,43	0,29	0,62	0,51
30	0,42	0,41	0,27	0,60	0,49
35	0,40	0,40	0,25	0,59	0,48
40	0,39	0,39	0,24	0,58	0,47

Tabelle 5.9: Berechnungsformeln für Kupferleitungen

Stromart	Spannungsverlust in V	Querschnitt in mm²	Leistungsverlust in %	Querschnitt in mm²
Gleichstrom und Zweileiter-Wechselstrom bei induktionsfreier Belastung	$U_v = \varrho \cdot \frac{2lI}{A}$	$A = \varrho \cdot \frac{2lI}{U_v}$	$P_{\%} = \varrho \cdot \frac{200lP}{AU^2}$	$A = \varrho \cdot \frac{200lP}{P_{\%}U^2}$
	$U_v = \frac{lI}{28A}$ [1])	$A = \frac{lI}{28U_v}$ [1])	erforderliche Spannung:	$U = \sqrt{\varrho \cdot \frac{200lP}{AP_{\%}}}$
	$U_v = \varrho \cdot \frac{2lP}{AU}$	$A = \varrho \cdot \frac{2lP}{U_vU}$		
Drehstrom	$U_v = \varrho \cdot \frac{1{,}73lI \cos\varphi}{A}$	$A = \varrho \cdot \frac{1{,}73lI \cos\varphi}{U_v}$	$P_{\%} = \frac{\varrho \cdot 100lP}{AU^2 \cos^2\varphi}$	$A = \frac{\varrho \cdot 100lP}{P_{\%}U^2 \cos^2\varphi}$
	$U_v = \varrho \cdot \frac{lP}{AU}$	$A = \varrho \cdot \frac{lP}{U_vU}$	bei $\cos\varphi = 0{,}8$:	
			$P_{\%} = \frac{2{,}8lP}{AU^2}$ [1])	$A = \frac{2{,}8lP}{P_{\%}U^2}$ [1])
			bei $\cos\varphi = 1$:	
			$P_{\%} = \frac{1{,}8lP}{AU^2}$ [1])	$A = \frac{1{,}8lP}{P_{\%}U^2}$ [1])
			erforderliche Spannung:	$U = \sqrt{\varrho \cdot \frac{100lP}{AP_{\%} \cos^2\varphi}}$

[1]) Formelfaktoren für Aluminium s. Tabelle 5.10.

Bei gleichzeitiger und dauernder Strombelastung mehrerer Fernmeldeleitungen im Bündel, Rohr oder Leitungskanal sowie mehrerer Adern in einer mehradrigen Fernmeldeleitung sind die Strombelastbarkeitswerte der Tabelle 5.3 für eine Ader wie folgt zu multiplizieren: bis 5 Adern oder Leitungen mit dem Strombelastbarkeitsfaktor 0,6 und bis 10 Adern oder Leitungen mit dem Strombelastbarkeitsfaktor 0,3.
Der Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtungen ist beim Anwenden von Strombelastbarkeitsfaktoren auf der Grundlage der neuerrechneten Strombelastbarkeit der Leitungen festzulegen. Dabei muß der Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtungen unter dem Wert der neuen Strombelastbarkeit der Leitungen liegen.

Beispiel: Eine 7adrige plastisolierte Leitung mit Kupferleiter und einem Leiternennquerschnitt von 1,5 mm² soll bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 35 °C betrieben werden. Wie hoch ist die Strombelastbarkeit der Leitung?

Lösung: Strombelastbarkeit nach Tabelle 5.3 für eine Ader 26 A. Strombelastbarkeitsfaktor bei 7 Adern gemäß Tabelle 5.5 ist 0,55, Strombelastbarkeitsfaktor bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C nach Tabelle 5.7 ist 0,88 (Leitergrenztemperatur 70 °C). Tatsächliche Strombelastbarkeit 26 A · 0,55 × 0,87 ≈ 12 A. Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung 10 A.

5.2.1.5. Leitungsberechnungen

Verwendete *Formelzeichen:*

- ϱ spezifischer Widerstand in Ω für 1 m Länge und 1 mm² Leiterquerschnitt,
- l Streckenlänge in m (einfache Länge),
- l_1 $2l$ für Gleich- und Wechselstrom (Hin- und Rückleitung),
- U Nennspannung (Außenleiterspannung) in V (nicht zwischen Außen- und Neutralem Leiter),
- U_v Spannungsverlust in V,
- $U_{\%}$ Spannungsverlust in % von U,
- P zu übertragende Leistung in W,
- P_v Leistungsverlust in W,
- $P_{\%}$ Leistungsverlust in % von P; bei Gleichstrom und induktionsfreiem Wechselstrom ist U_v proportional P_v, bei Drehstrom ist $P_{\%}$ größer infolge Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung,
- P_w Produktwert $I \cdot l$,
- I Leiterstromstärke in A,
- A Querschnitt der Leitung in mm².

Eine *Zusammenstellung der Berechnungsformeln* für Kupferleitungen bietet Tabelle 5.9. Dabei sind die gebräuchlichsten Formeln umrandet. Die Faktoren der für Aluminium gültigen Formeln sind denen des Kupfers in Tabelle 5.10 gegenübergestellt. Für den spezifischen Widerstand ϱ sind in Tabelle 5.11 Angaben enthalten. Drehstromleitungen sind vor allem auf Leistungsverluste zu berechnen, auf Spannungsverlust nur Installationsleitungen von mehr als $l = 100$ m und Freileitungen.
In Tabelle 5.12 sind die Produktwerte zur Leitungsberechnung angegeben.

Tabelle 5.10: Formelfaktoren für Aluminium

Anstelle	28	2,8	1,8	für Kupfer
setze ein	17,5	4,5	2,9	für Aluminium

Tabelle 5.11: Spezifischer Widerstand ϱ der Leitungen bei 20 °C in Ω · mm² · m⁻¹

Kupfer	Aluminium
0,0175	0,028

Ableitung der Formeln für Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom

a) Gleichstrom und induktionsfreier Zweileiter-Wechselstrom

$U_v = \varrho \cdot \frac{l_1 P}{AU}$; $U_v = \varrho \cdot \frac{2lUI}{AU}$; $U_v = \varrho \cdot \frac{2lI}{A}$;

da auch $U_v = \frac{U_{\%}U}{100}$, gilt Gleichung $\frac{U_{\%}U}{100} = \varrho \cdot \frac{2lI}{A}$;

$U_{\%} = \varrho \cdot \frac{100 \cdot 2lI}{AU}$ oder $U_{\%} = \varrho \cdot \frac{200lI}{AU}$;

da $I = \frac{P}{U}$ und $U_{\%} = P_{\%}$, wird $P_{\%} = \varrho \cdot \frac{200lP}{AU^2}$.

Tabelle 5.12: Produktwerte zur Leitungsberechnung

Querschnitt A	Gleichstrom- oder induktionsfreier Zweileiter-Wechselstrom Spannungsverlust U_v							für l = 1000 m
	4 V	6 V	8 V	10 V	12 V	14 V	16 V	
mm²	Streckenlänge × Stromstärke Produktwert $l \times I$							Ω
1,5	171	257	343	428	514	600	685	11,67
2,5	286	428	571	714	857	1000	1140	7,000
4	457	685	914	1140	1370	1600	1830	4,375
6	685	1030	1370	1740	2060	2400	2740	2,917
10	1140	1710	2280	2860	3430	4000	4570	1,750
16	1830	2740	3650	4570	5480	6400	7310	1,094
25	2860	4280	5710	7140	8570	10000	11400	0,700
35	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	0,500
50	5710	8570	11400	14300	17100	20000	22800	0,350
70	7990	12000	16000	20000	24000	28000	32000	0,250
95	10900	16300	21700	27100	32600	38000	43400	0,184
120	13700	20600	27400	34300	41100	48000	54800	0,146
150	17100	25700	34300	42800	51400	60000	68500	0,117
185	21200	31800	42400	53000	63600	74200	84800	0,095
240	27400	41100	54800	68500	82200	95900	109600	0,073
300	34200	51400	68500	85600	102500	120000	137000	0,058

b) Drehstrom

Leistung $P = 1{,}73UI\cos\varphi$; also ist

$$U_v = \varrho \cdot \frac{l \cdot 1{,}73UI\cos\varphi}{AU}; \quad U_v = \varrho \cdot \frac{1{,}73lI\cos\varphi}{A}.$$

Aus den Formeln:

$$P_v = \frac{P_{\%}P}{100}; \; P_v = I^2R; \; R_v = \frac{\varrho l_1}{A}; \; I = \frac{P}{1{,}73 \cdot U\cos\varphi}; \; l_1 = 3l$$

wird $$\frac{P_{\%}P}{100} = \frac{P^2}{3U^2\cos^2\varphi} \cdot \frac{\varrho \cdot 3l}{A}$$

$$P_{\%} = \frac{100P^2 \cdot \varrho \cdot 3 \cdot l}{P \cdot 3U^2\cos^2\varphi A} = \frac{\varrho \cdot 100lP}{AU^2\cos^2\varphi}.$$

Der Leistungsverlust ist also infolge der Phasenverschiebung größer als bei induktionsfreier Belastung.

Tabelle 5.13: Umrechnungstabelle

Stromart und Art der Leitung	Werkstoff	Querschn. A in mm²				
		10	25	50	70	95
		16	35			
Drehstrom[1])	Umrechnungsfaktor					
induktiv belastete Niedersp.-Freileitungen $\cos\varphi = 0{,}8$	Kupfer	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5
	Alum.	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
dgl. Installationsleitungen	Kupfer			0,70		
	Alum.			1,13		
induktionsfrei belastet (Glühlampen) $\cos\varphi = 1$	Kupfer			0,87		
	Alum.			1,40		
Gleichstrom oder Zweileiter-Wechselstrom						
induktionsfrei belastet alle Leitungen	Kupfer			1		
	Alum.			1,61		

[1]) Niederspannungs-Freileitungen 450 mm Leiterabstand

Die nach Tabelle 5.12 errechneten Werte des Spannungsverlustes U_v und des Querschnittes A sind mit den Umrechnungsfaktoren der Tabelle 5.13 zu multiplizieren, die errechneten Werte der Streckenlänge l und Stromstärke I durch die Umrechnungsfaktoren zu dividieren.

Beispiele zur Leitungsberechnung

1. In einer induktionsfrei belasteten Zweileiter-Wechselstrom-Cu-Leitung mißt man in l = 1500 m Entfernung eine Stromstärke I = 8 A. Ermittle den Spannungsverlust U_v!

Lösung: Produktwert $l \cdot I$ = 1500 m · 8 A = 12000 m · A steht in Tabelle 5.12 neben A = 70 mm² unter Spannungsverlust U_v = 6 V. — Bei l = 2750 m wären $l \cdot I$ = 2750 m × 8 A = 22000 m · A und U_v = 11 V (Mittel zwischen 10 und 12 V); bei l = 5000 m wären $l \cdot I$ = 5000 m · 8 A = 40000 m · A = 2 · 20000 m · A und U_v = 2 · 10 V = 20 V.

2. Der Spannungsverlust in einer Gleichstrom-Cu-Leitung von A = 50 mm² und l = 143 m Streckenlänge beträgt U_v = 10V. Stromstärke?

Lösung: Für A = 50 mm² und U_v = 10 V zeigt die Tabelle $l \cdot I$ = 14300 m · A. Dann ist $I \cdot l/l$ = 14300 m · A/143 m = 100 A = I.

3. Wie groß wären $l \cdot I$ und I nach Beispiel 2 bei U_v = 12,5 V?

Lösung: Für U_v = 12 V zeigt die Tabelle $l \cdot I$ = 17100 m · A. Dann ist für U_v = 12,5 V der Produktwert $l \cdot I$ = 17100 m · A × 12,5 V/12 V = 17812,5 m · A, und 17812,5 m · A/143 m = 124 A = I.

4. Der Spannungsverlust einer Gleichstrom-Cu-Leitung darf bei l = 330 m Streckenlänge und I = 32 A Belastung U_v = 24 V betragen. Berechne A!

Lösung: Da die Tabelle U_v nur bis 16 V angibt, U_v aber proportional I ist, rechnet man mit halben Größen l = 16 A und U_v = 12 V oder mit Viertelgrößen I = 8 A und U_v = 6 V und erhält $l \cdot I$ = 330 m · 16 A = 5280 m · A für U_v = 12 V bzw. 330 m · 8 A = 2640 m · A für U_v = 6 V. Die Tabelle zeigt die Werte 5480 bzw. 2740 und A = 16 mm². Wir wählen A = 16 mm².

5. Wie lang ist eine Aluminium-Kabelstrecke für Zweileiter-Wechselstrom bei induktionsfreier Belastung von I = 10 A, A = 2,5 mm² und U_v = 8 V Spannungsverlust?

Lösung: Nach Tabelle 5.12 ist $l \cdot I$ = 571 m · A. Eine Cu-Leitung würde demnach $l = l \cdot I/I$ = 571 m · A/10 A ≈ 57 m lang sein. Für Aluminium beträgt der Wert der Umrechnung 1,61 und l = 57 m/1,61 ≈ 35,4 m.

Tabelle 5.14: Strombelastbarkeitswerte, Leistungs- und Spannungsverluste je 100 m *Leitungslänge für Leitungen mit Kupferleiter*[1])

Leiternennquerschnitt in mm²	Strombelastbarkeit in A	Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung in A			Gleichstrom-Nennspannung		Einphasen-Wechselstrom-Nennspannung in V			Drehstrom-Nennspannung in V								
							220			380			500			660		
					V		cos φ			cos φ			cos φ			cos φ		
					220	600	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6
0,75	16	16	Belastung	in kW	3,52	9,6	3,52	2,82	2,11	10,5	8,4	6,3	13,8	11,0	8,3	18,3	14,6	11,0
			Leistungsverlust	P_v in kW	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
				$P_{\%}$ in %	33,9	12,4	33,9	42,2	56,4	17,0	21,3	28,4	13,0	16,3	21,6	9,8	12,3	16,3
			Spannungsverlust	U_v in V	74,7	74,7	74,7	59,8	44,8	64,5	51,6	38,6	64,5	51,6	38,6	64,5	51,6	38,6
				$U_{\%}$ in %	33,9	12,4	33,9	27,2	20,4	17,0	13,6	10,2	13,0	10,3	7,7	9,8	7,84	5,88
1	20	20	Belastung	in kW	4,4	12,0	4,4	3,52	2,64	13,2	10,5	7,9	17,3	13,8	10,4	22,8	18,2	13,7
			Leistungsverlust	P_v in kW	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
				$P_{\%}$ in %	31,8	11,7	31,8	39,8	53,0	16,0	20,0	26,6	12,1	15,2	20,2	9,2	11,5	15,3
			Spannungsverlust	U_v in V	70,1	70,1	70,1	56,1	42,1	60,5	48,4	36,4	60,5	48,4	36,4	60,5	48,4	36,4
				$U_{\%}$ in %	31,8	11,7	31,8	25,5	19,1	16,0	12,8	9,6	12,1	9,7	7,3	9,2	7,32	5,5
1,5	26	25	Belastung	in kW	5,72	15,6	5,72	4,57	3,43	17,1	13,7	10,3	22,5	18,0	13,5	29,7	23,8	17,8
			Leistungsverlust	P_v in kW	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36
				$P_{\%}$ in %	27,6	10,1	27,6	34,6	46,1	13,8	17,2	22,9	10,5	13,1	17,5	7,95	9,9	13,3
			Spannungsverlust	U_v in V	60,7	60,7	60,7	48,6	3,64	52,6	42,0	31,5	52,6	42,0	31,5	52,6	42,0	31,5
				$U_{\%}$ in %	27,6	10,1	27,6	22,1	16,6	13,8	11,0	8,3	10,5	8,4	6,3	7,95	6,37	4,78
2,5	36	36	Belastung	in kW	7,92	21,6	7,92	6,33	4,75	23,7	19,0	14,2	31,2	25,0	18,7	4,12	33,0	24,7
			Leistungsverlust	P_v in kW	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
				$P_{\%}$ in %	22,9	8,4	22,9	28,6	38,2	11,5	14,3	19,2	8,7	10,9	14,5	6,6	8,24	11,0
			Spannungsverlust	U_v in V	50,4	50,4	50,4	40,3	30,2	43,7	35,0	26,2	43,7	35,0	26,2	43,7	35,0	26,2
				$U_{\%}$ in %	22,9	8,4	22,9	18,3	13,7	11,5	9,2	6,9	8,7	7,0	5,2	6,6	5,3	4,0
4	50	50	Belastung	in kW	11,0	30,0	11,0	8,8	6,6	32,8	26,2	19,7	43,3	34,6	26,0	57,2	45,7	34,3
			Leistungsverlust	P_v in kW	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27
				$P_{\%}$ in %	19,9	7,3	19,9	24,9	33,2	10,0	12,5	16,6	7,6	9,45	12,6	5,73	7,16	9,54
			Spannungsverlust	U_v in V	43,8	43,8	43,8	35,1	26,3	37,9	30,3	22,7	37,9	30,3	22,8	37,9	30,3	22,8
				$U_{\%}$ in %	19,9	7,3	19,9	15,9	11,9	10,0	8,0	6,0	7,6	6,1	4,6	5,73	4,6	3,44
6	63	63	Belastung	in kW	13,8	37,8	13,8	11,0	8,3	41,4	33,2	24,8	54,5	43,6	32,7	72,0	57,6	43,2
			Leistungsverlust	P_v in kW	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46
				$P_{\%}$ in %	16,7	6,1	16,7	21,1	28,0	8,4	10,4	14,0	6,4	7,94	10,6	4,82	6,01	8,03
			Spannungsverlust	U_v in V	36,8	36,8	36,8	29,4	22,1	31,8	25,4	19,1	31,8	25,4	19,1	31,8	25,4	19,1
				$U_{\%}$ in %	16,7	6,1	16,7	13,4	10,0	8,4	6,7	5,0	6,4	5,1	3,8	4,82	3,85	2,89
10	86	80	Belastung	in kW	18,9	51,6	18,9	15,1	11,3	56,6	45,3	34,0	74,4	59,6	44,7	98,3	78,6	59,0
			Leistungsverlust	P_v in kW	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88
				$P_{\%}$ in %	13,7	5,0	13,7	17,2	23,0	6,8	8,55	11,4	5,2	6,51	8,68	3,95	4,93	6,57
			Spannungsverlust	U_v in V	30,2	30,2	30,2	24,2	18,1	26,0	20,8	15,6	26,0	20,8	15,6	26,0	20,8	15,6
				$U_{\%}$ in %	13,7	5,0	13,7	11,0	8,2	6,8	5,4	4,1	5,2	4,2	3,1	3,95	3,16	2,38

[1]) Strombelastbarkeitswerte nach Tabelle 5.3

Tabelle 5.14 (Fortsetzung)

Leiternennquerschnitt in mm²	Strombelastbarkeit in A	Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung in A			Gleichstrom-Nennspannung		Einphasen-Wechselstrom-Nennspannung in V			Drehstrom-Nennspannung in V								
							220			380			500			660		
					V		cos φ			cos φ			cos φ			cos φ		
					220	600	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6
16	117	100	Belastung	in kW	25,8	70,2	25,8	20,6	15,5	76,9	61,5	46,2	101	80,8	60,6	134	107	80,4
			Leistungsverlust P_v	in kW	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	4,49	4,49	4,49	4,49	4,49	4,49	4,49	4,49	4,49
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	11,6	4,3	11,6	14,6	19,4	5,8	7,3	9,73	4,4	5,56	7,42	3,36	4,2	5,58
			Spannungsverlust U_v	in V	25,6	25,6	25,6	20,3	15,4	22,2	17,8	13,3	22,2	17,8	13,3	22,2	17,8	13,3
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	11,6	4,3	11,6	9,3	7,0	5,8	4,6	3,5	4,4	3,5	2,6	3,36	2,69	2,02
25	155	125	Belastung	in kW	35,0	93,0	35,0	28,0	21,0	102	81,6	61,2	134	107	80,4	177	142	106
			Leistungsverlust P_v	in kW	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	10,1	3,8	10,1	12,6	16,8	4,9	6,13	8,17	3,76	4,67	6,22	2,83	3,52	4,72
			Spannungsverlust U_v	in V	22,2	22,2	22,2	17,8	13,3	18,8	15,0	11,3	18,8	15,0	11,3	18,8	15,0	11,3
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	10,1	3,8	10,1	8,1	6,1	4,9	3,9	2,9	3,76	3,0	2,3	2,83	2,28	1,71
35	192	160	Belastung	in kW	42,2	115	42,2	33,8	25,3	126	101	75,6	166	133	100	220	176	132
			Leistungsverlust P_v	in kW	3,39	3,69	3,69	3,69	3,69	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	8,7	3,2	8,7	10,9	14,6	4,4	5,48	7,31	3,3	4,16	5,53	2,53	3,14	4,18
			Spannungsverlust U_v	in V	19,2	19,2	19,2	15,3	11,5	16,6	13,3	10,0	16,6	13,3	10,0	16,6	13,3	10,0
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	8,7	3,2	8,7	7,0	5,2	4,4	3,5	2,6	3,3	2,6	2,0	2,53	2,03	1,52

Tabelle 5.15: Strombelastbarkeitswerte, Leistungs- und Spannungsverluste je 100 m *Leitungslänge für Leitungen mit Aluminiumleiter*[1])

Leiternennquerschnitt in mm²	Strombelastbarkeit in A	Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung in A			Gleichstrom-Nennspannung		Einphasen-Wechselstrom-Nennspannung in V			Drehstrom-Nennspannung in V								
							220			380			500			660		
					V		cos φ			cos φ			cos φ			cos φ		
					220	600	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6
2,5	27	25	Belastung	in kW	5,94	16,2	5,94	4,75	3,56	17,8	14,2	10,7	23,4	18,7	14,0	30,8	24,6	18,5
			Leistungsverlust P_v	in kW	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	27,8	10,2	27,8	34,8	46,3	13,9	17,4	23,2	10,6	13,3	17,7	8,0	10,0	13,3
			Spannungsverlust U_v	in V	61,0	61,0	61,0	48,8	36,6	52,8	42,3	31,7	52,8	42,3	31,7	52,8	42,3	31,7
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	27,8	10,2	27,8	22,2	16,7	13,9	11,1	8,3	10,6	8,5	6,4	8,0	6,4	4,8

[1]) Strombelastbarkeitswerte nach Tabelle 5.4

Tabelle 5.15 (Fortsetzung)

Leiternennquerschnitt in mm²	Strombelastbarkeit in A	Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung in A			Gleichstrom-Nennspannung		Einphasen-Wechselstrom-Nennspannung in V			Drehstrom-Nennspannung in V								
							220			380			500			660		
					V		cos φ			cos φ			cos φ			cos φ		
					220	600	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6	1	0,8	0,6
4	37	36	Belastung	in kW	8,14	22,2	8,14	6,52	4,88	24,4	19,5	14,6	32,0	25,6	19,2	42,2	33,8	25,3
			Leistungsverlust P_v	in kW	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	23,7	8,7	23,7	29,6	39,5	11,9	14,9	19,8	9,0	11,3	15,0	6,84	8,55	11,4
			Spannungsverlust U_v	in V	52,1	52,1	52,1	41,7	31,2	45,2	36,2	27,2	45,2	36,2	27,2	45,2	36,2	27,2
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	23,7	8,7	23,7	19,0	14,2	11,9	9,5	7,1	9,0	7,2	5,4	6,84	5,5	4,1
6	50	50	Belastung	in kW	11,0	30,0	11,0	8,8	6,6	32,9	26,3	19,7	43,3	34,6	26,0	57,1	45,7	34,2
			Leistungsverlust P_v	in kW	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52	3,52
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	21,4	7,8	21,4	26,8	35,7	10,7	13,4	17,9	8,1	10,1	13,5	6,18	7,74	10,3
			Spannungsverlust U_v	in V	47,1	47,1	47,1	37,7	28,2	40,7	32,5	24,4	40,7	32,5	24,4	40,7	32,5	24,4
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	21,4	7,8	21,4	17,1	12,8	10,7	8,6	6,4	8,1	6,5	4,9	6,18	4,9	3,7
10	67	50	Belastung	in kW	14,7	40,2	14,7	11,8	8,82	44,1	35,2	26,4	58,0	46,4	34,8	76,5	61,2	45,8
			Leistungsverlust P_v	in kW	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	17,1	6,3	17,1	21,4	28,5	8,6	10,8	14,4	6,5	8,1	10,8	4,97	6,2	8,3
			Spannungsverlust U_v	in V	37,6	37,6	37,6	30,1	22,6	32,7	26,2	19,6	32,7	26,2	19,6	32,7	26,2	19,6
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	17,1	6,3	17.1	13,7	10,3	8,6	6,9	5,2	6,5	5,2	3,9	4,97	4,0	3,0
16	90	80	Belastung	in kW	19,8	54,0	19,8	15,8	11,9	59,2	47,4	35,5	77,8	62,3	46,7	103	82,4	61,8
			Leistungsverlust P_v	in kW	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27	4,27
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	14,4	5,3	14,4	18,0	24,0	7,2	9,0	12,0	5,5	6,9	9,2	4,17	5,2	6,9
			Spannungsverlust U_v	in V	31,6	31,6	31,6	25,3	19,0	27,4	22,0	16,5	27,4	22,0	16,5	27,4	22,0	16,5
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	14,4	5,3	14,4	11,5	8,6	7,2	5,8	4,3	5,5	4,4	3,3	4,17	3,3	2,5
25	120	100	Belastung	in kW	26,4	72,0	26,4	21,2	15,9	78,8	63,1	47,3	104	83,2	62,4	137	110	82,2
			Leistungsverlust P_v	in kW	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	12,3	4,5	12,3	15,4	20,5	6,2	7,7	10,3	4,7	5,9	7,8	3,55	4,4	5,9
			Spannungsverlust U_v	in V	27,0	27,0	27,0	21,6	16,2	23,6	18,9	14,2	23,6	18,9	14,2	23,6	18,9	14,2
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	12,3	4,3	12,3	9,8	7,4	6,2	5,0	3,7	4,7	3,8	2,8	3,55	2,8	2,1
35	148	125	Belastung	in kW	32,6	88,8	32,6	26,1	19,6	97,3	77,8	58,4	128	102	76,8	169	135	101
			Leistungsverlust P_v	in kW	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	10,9	4,0	10,9	13,6	18,2	5,4	6,7	9,0	4.1	5,1	6,8	3,14	3,9	5,2
			Spannungsverlust U_v	in V	24,0	24,0	24,0	19,2	14,4	20,5	16,4	12,3	20,5	16,4	12,3	20,5	16,4	12,3
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	10,9	4,0	10,9	8,7	6,5	5,4	4,3	3,2	4,1	3,3	2,5	3,14	2,5	1,9
50	187	160	Belastung	in kW	41,2	112	41,2	33,0	24,7	123	98,4	73,8	162	130	97,2	214	171	129
			Leistungsverlust P_v	in kW	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
			Leistungsverlust $P_{v\%}$	in %	9,6	3,5	9,6	12,0	16,0	4,8	6.0	8,0	3,7	4,6	6,2	2,78	3,5	4,6
			Spannungsverlust U_v	in V	21,1	21,2	21,1	16,9	12,7	18,2	14,6	10,9	18,2	14,6	10,9	18,2	14,6	10,9
			Spannungsverlust $U_{v\%}$	in %	9,6	3.5	9,6	7,7	5,8	4,8	3,8	2,9	3,7	3,0	2,2	2,78	2,2	1,7

6. Ein Drehstrom-Cu-Kabel mit $\cos\varphi = 1$ und $A = 70\ \text{mm}^2$ sowie $l = 1200\ \text{m}$ ist mit $I = 100\ \text{A}$ belastet. Wie groß ist der Spannungsabfall U_v?

Lösung: $l \cdot I = 1200\ \text{m} \cdot 100\ \text{A} = 120000\ \text{m} \cdot \text{A}$, Tabelle 5.12 reicht also nicht aus. Man findet unter 6 V den Wert $12000\ \text{m} \cdot \text{A} \triangleq 60\ \text{V}$. Nach Tabelle 5.13 ist dieser Wert für Cu und Drehstrom mit 0,87 zu multiplizieren. Also ist $U_v = 60\ \text{V} \cdot 0{,}87 \approx 52\ \text{V}$.

7. In einer Installationsleitung für einen Drehstrommotor mit einer Stromstärke $I = 60\ \text{A}$ ist bei 380 V 2% Spannungsverlust zulässig. Wie stark wird A für eine Al-Leitung bei $l = 40\ \text{m}$?

Lösung: $U_v = 0{,}02 \cdot 380\ \text{V} = 7{,}6\ \text{V} \approx 8\ \text{V}$; $l \cdot I = 40\ \text{m} \times 60\ \text{A} = 2400\ \text{m} \cdot \text{A}$. Der nächstliegende Tabellenwert ist $l \cdot I = 2280\ \text{m} \cdot \text{A}$, wofür man $A = 10\ \text{mm}^2$ Querschnitt findet, der aber bei Rohrverlegung nur mit 46 A belastet werden darf. Es ist daher $16\ \text{mm}^2$ zu wählen. Für Drehstrom und Aluminium ist dieser Wert nach Tabelle 5.13 mit 1,13 zu multiplizieren. $A = 16\ \text{mm}^2 \cdot 1{,}13 = 18{,}1\ \text{mm}^2$, erhöht auf $25\ \text{mm}^2$.

8. Wieviel Glühlampen zu je 40 W können bei 220 V an einer 30 m langen, in Rohr gelegten Al-Leitung von $2{,}5\ \text{mm}^2$ bei 2 V Spannungsverlust gleichzeitig betrieben werden?

Lösung: Stromstärke einer Lampe ist 40 W/220 V = 0,18 A. Nach Tabelle 5.12 ist $l \cdot I = 286\ \text{m} \cdot \text{A}$ für 4 V; für 2 V beträgt der Wert $143\ \text{m} \cdot \text{A}$, und $I = 143\ \text{m} \cdot \text{A}/30\ \text{m} = 4{,}75\ \text{A}$. Für Al nach Tabelle 5.13 ist 4,75 A/1,61 = 2,96 A oder 2,96 A/0,18 A $\approx$ 16 Glühlampen zu je 40 W.

In den Tabellen 5.14 und 5.15 sind Strombelastbarkeitswerte für Cu- und Al-Leiter zusammengestellt.
Die Werte in den Tabellen 5.14 und 5.15 gelten für *eine* betriebsmäßig stromführende Ader von plast-, silikongummi- oder glasseidenisolierten Leitungen. Sie können näherungsweise auch für gummiisolierte Leitungen verwendet werden. Erfordern die Betriebs- und/oder Legungsverhältnisse das Anwenden der Strombelastbarkeitsfaktoren der Tabellen 5.5···5.8, so ist der Spannungsverlust für 100 m Leitungslänge durch Multiplizieren der Werte aus Tabelle 5.14 oder 5.15 mit den Strombelastbarkeitsfaktoren zu ermitteln, der Leistungsverlust in kW dagegen durch Multiplizieren mit dem Quadrat der Strombelastbarkeitsfaktoren der Tabellen 5.5···5.8.

Beispiel: Die Betriebs- und Legungsverhältnisse für eine Leitung mit Kupferleiter und einem Leiternennquerschnitt von $0{,}75\ \text{mm}^2$ bei einer Einphasen-Wechselstrom-Nennspannung von 220 V und $\cos\varphi = 0{,}8$ erfordern das Anwenden eines Strombelastungsfaktors nach Tabelle 5.5 von 0,58 und nach Tabelle 5.7 von 0,94. Wie groß sind Belastung, Leistungs- und Spannungsverlust bei 100 m Leitungslänge?

Belastung	P	$= 2{,}82\ \text{kW} \cdot 0{,}58 \cdot 0{,}94 = 1{,}54\ \text{kW}$
Leistungsverlust	P_v	$= 1{,}19\ \text{kW} \cdot 0{,}58^2 \cdot 0{,}94^2 = 0{,}35\ \text{kW}$
	$P_{\%}$	$= 42{,}2\% \cdot 0{,}58 \cdot 0{,}94 = 23{,}0\%$
Spannungsverlust	U_v	$= 59{,}8\ \text{V} \cdot 0{,}58 \cdot 0{,}94 = 32{,}6\ \text{V}$
	$U_{\%}$	$= 27{,}2\% \cdot 0{,}58 \cdot 0{,}94 = 14{,}8\%$

Bei Einphasen-Wechselstrom und Drehstrom mit $\cos\varphi = 1$ sowie bei Gleichstrom stehen Leistungs- und Spannungsverluste im gleichen Verhältnis, nämlich $P_{\%} = U_{\%}$. Ist $\cos\varphi < 1$, verhält sich der Leistungsverlust zum Spannungsverlust wie

$$\frac{P_{\%}}{U_{\%}} = \frac{1}{\cos^2\varphi}$$

(gilt nur bei einfachen endbelasteten Leitungssystemen).

Daraus folgt bei bekanntem Spannungsverlust

$$P_{\%} = \frac{U_{\%}}{\cos^2\varphi}.$$

Beispiel: Eine Leitung mit Kupferleiter soll mit 50 A belastet werden. $A = 4\ \text{mm}^2$, Nennstrom der Überstromschutzeinrichtung 50 A. Für $l = 45\ \text{m}$ und eine Gleichstrom- und Wechselstrom-Nennspannung von 220 V sowie eine Drehstrom-Nennspannung von 380 V betragen bei

Gleichstrom und Einphasen-Wechselstrom $\cos\varphi = 1$

Belastung	P	$= 11{,}0\ \text{kW}$
Leistungsverlust	P_v	$= 0{,}45 \cdot 2{,}19\ \text{kW} = 0{,}99\ \text{kW}$
	$P_{\%}$	$= 0{,}45 \cdot 19{,}9\% = 9\%$
Spannungsverlust	U_v	$= 0{,}45 \cdot 43{,}8\ \text{V} = 19{,}8\ \text{V}$
	$U_{\%}$	$= 0{,}45 \cdot 19{,}9\% = 9\%$

Drehstrom $\cos\varphi = 1$

Belastung	P	$= 32{,}8\ \text{kW}$
Leistungsverlust	P_v	$= 0{,}45 \cdot 3{,}27\ \text{kW} = 1{,}47\ \text{kW}$
	$P_{\%}$	$= 0{,}45 \cdot 10{,}0\% = 4{,}5\%$
Spannungsverlust	U_v	$= 0{,}45 \cdot 37{,}9\ \text{V} = 17{,}0\ \text{V}$
	$U_{\%}$	$= 0{,}45 \cdot 10{,}0\% = 4{,}5\%$

Beispiel: Wie hoch ist eine 5adrige Leitung mit Kupferleiter bei gemeinsamer Legung mit 6 weiteren mehradrigen Leitungen in einem Leitungskanal auf Putz belastbar? $l = 100\ \text{m}$, $A = 10\ \text{mm}^2$. Alle Adern sind betriebsmäßig stromführend. Wie groß ist der Leistungsverlust a) bei 220 V Einphasen-Wechselstrom, b) bei 380 V Drehstrom, $\cos\varphi$ jeweils 0,8?

Lösung: a) Nach Tabelle 5.14 ist die Leitung mit 15,1 kW belastbar. Da alle Adern betriebsmäßig Strom führen, ist ein Strombelastungsfaktor von 0,62 gemäß Tabelle 5.5 und ein Faktor von 0,60 (6 + 1 = 7 Leitungen) nach Tabelle 5.6 für die Bündellegung im Leitungskanal zu beachten. Tatsächliche Belastung $15{,}1\ \text{kW} \cdot 0{,}62 \cdot 0{,}60 = 5{,}62\ \text{kW}$.

$P_v = 2{,}59\ \text{kW} \cdot 0{,}62^2 \cdot 0{,}60^2 = 0{,}36\ \text{kW} \triangleq 6{,}4\%$.

b) Belastung nach Tabelle 5.15 ist 45,3 kW. Tatsächliche Belastung $45{,}3\ \text{kW} \cdot 0{,}62 \cdot 0{,}60 = 16{,}9\ \text{kW}$.

$P_v = 3{,}88\ \text{kW} \cdot 0{,}62^2 \cdot 0{,}60^2 = 0{,}54\ \text{kW} \triangleq 3{,}2\%$.

5.2.1.6. Überstrom-Schutzeinrichtungen

Leitungen sind gegen unzulässig hohe Erwärmung, die durch Überlastung oder durch Kurzschluß auftreten kann, mit Überstrom-Schutzeinrichtungen zu schützen. Ausnahmen sind in Sonderfällen zulässig. In Sekundärstromkreisen von Stromwandlern, in Schutzleitern, Erdungs- und Potentialausgleichleitungen sind Überstrom-Schutzeinrichtungen unzulässig. Die Überlastschutzeinrichtung ist an beliebiger Stelle der Leitung, die Kurzschlußschutzeinrichtung am Anfang der Leitung, in Energieflußrichtung gesehen, anzuordnen. Kurzschlußschutzeinrichtungen sind nach Tabelle 5.16 zu bemessen, wenn zusätzlich Überlastschutzeinrichtungen vorhanden sind.

Tabelle 5.16: Auswahl der Überstrom-Schutzeinrichtungen gegen die Auswirkungen von Kurzschlußströmen

Art der Überstrom-Schutzeinrichtung	Erhöhung des Nennstromes I_n der Überstrom-Schutzeinrichtung (als nach Tabelle 5.3 oder 5.4 angegeben, unter Beachtung der Strombelastbarkeitsfaktoren)	Mindestdauerkurzschlußstrom, bezogen auf den Nennstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung, die dem Kurzschlußschutz dient
Schmelzsicherungen; thermische oder verzögerte magnetische Überstromauslösung; elektronische Schutzeinrichtungen, z. B. für Stromrichter (Strombegrenzungsregelung)	um eine Stufe um zwei Stufen um drei Stufen	$3 \cdot I_n$ $4 \cdot I_n$ $5 \cdot I_n$
Unverzögerte magnetische Überstromauslösung	bis zum 14fachen Strombelastbarkeitswert	$1{,}3 \cdot I_n$

Leuchtenstromkreise mit Lampensockeln bis E 27 dürfen bis 25 A gesichert werden, in Wohnbauten bis 16 A. Steckdosenstromkreise dürfen entsprechend den Strombelastbarkeitswerten der Leitungen nach Tabelle 5.3 oder 5.4 unter Berücksichtigung der Strombelastbarkeitsfaktoren und entsprechend dem Nennstrom der Steckdosen gesichert werden.

5.2.1.7. Kennzeichnung von Leitungen

Zur Erleichterung des Anschlusses und der Fehlersuche sowie zum Kenntlichmachen von Leiterfunktionen werden Leitungen vom Hersteller mit Farben oder Zahlen entsprechend Tabelle 5.17 oder Tabelle 5.18 gekennzeichnet.

Tabelle 5.17: Aderkennzeichnung von Starkstromleitungen für feste Legung[1])

Anzahl der Adern	Leitungen mit Schutzleiter (Buchstabe »J«)	Leitungen ohne Schutzleiter (Buchstabe »O«)
2	gnge/sw	bl/sw
3	gnge/bl/sw	bl/sw/br
4	gnge/bl/sw/br	—

[1]) gnge grün-gelb, bl blau, sw schwarz, br braun

Tabelle 5.18: Aderkennzeichnung von Starkstromleitungen für ortsveränderliche Betriebsmittel[1])

Anzahl der Adern	Kennzeichnung durch Farben		Kennzeichnung durch Zahlen
	Leitungen mit Schutzleiter (Buchstabe »J«)	Leitungen ohne Schutzleiter (Buchstabe »O«)	Leitungen mit oder ohne Schutzleiter
2	—	sw/bl	—
3	gnge/br/bl	sw/bl/br	—
4	gnge/sw/bl/br	sw/bl/br/sw	—
5	gnge/sw/bl/br/sw	—	—
≧ 6	Richtungsader in äußerer Lage: gnge Zählader in jeder Lage: bl übrige Adern: sw Zähl- und Richtungsadern müssen unmittelbar nebeneinander liegen	Richtungsader in äußerer Lage: br	Schutzleiter: gnge übrige Adern: sw und durch Zahlen gekennzeichnet, mit Zahl »1« beginnend

[1]) gnge grün-gelb, bl blau, sw schwarz, br braun

Für den neutralen Leiter ohne Schutzfunktion ist vorzugsweise die blau und für den Schutzleiter die grün-gelb gekennzeichnete Ader oder Aderleitung zu verwenden (s. 5.3.7.).
Kennzeichnung von Fernmeldeleitungen s. 5.2.4.

5.2.1.8. Legung von Leitungen

Leitungen sind so zu legen, daß die auftretenden äußeren Einwirkungen zu keiner unzulässigen Beeinträchtigung der Gebrauchseigenschaften der Leitung führen. An besonders gefährdeten Stellen, z. B. Fußbodendurchführungen, ist ein zusätzlicher mechanischer Schutz vorzusehen, z. B. durch Verkleidungen oder Legung in oder unter Putz. Als zusätzlicher mechanischer Schutz für einzeln gelegte einadrige Leitungen innerhalb eines Drehstromsystems sind nur Leitungen aus unmagnetischem Werkstoff zulässig.
Der Schutzgrad der Betriebsmittel darf durch das Einführen der Leitung nicht gemindert werden. An den Austrittsstellen aus Rohren und Kanälen sind die Leitungen gegen Abscheren zu sichern und die Innenkanten der Rohre und Kanäle zu entgraten. Werden Leitungen unmittelbar hinter Durchbrüchen gebogen, sind die im Leitungsbogen liegenden Kanten zu runden.
Die Zugbelastung von Leitungen darf, bezogen auf den Gesamtquerschnitt der Leiter, die Werte nach Tabelle 5.19 nicht überschreiten.
Tabelle 5.20 enthält die untere Grenze der Eigentemperatur der Leitungen beim Legen, beim Umtrommeln usw.

Tabelle 5.19: Höchste dauernd zulässige Zugbelastung von Leitungen

Leitungen	Ausführung	Höchste dauernd zulässige Zugbelastung MPa
Mit Nennspannungen bis 1000 V	Aluminiumleiter	10
	Kupferleiter	20
Mit Nennspannungen über 1 kV	—	10
Ohne Tragorgan, die dauernd auf- und abgewickelt oder über Umlenk- oder Führungsrollen geleitet werden	allgemein	
	in runder Ausführung ab 7 Adern in Lagenverseilung	5
	in runder Ausführung in Bündelverseilung, z. B. starke Gummischlauchleitung in Bündelverseilung	10 jedoch nicht mehr als 1150 N Gesamtkraft
Mit Tragorgan		nach dem Erzeugnisstandard der Leitung

Tabelle 5.20: Zulässige untere Grenze der Eigentemperatur der Leitungen beim Legen, beim Umtrommeln und bei sonstiger mechanischer Beanspruchung

Leitungsart		Untere Grenze der Eigentemperatur der Leitung °C
Leitungen mit Isolierhülle und/oder Mantel aus Plast, ausgenommen Plastaderleitung mit erhöhter Wärmebeständigkeit und Plastschlauchleitung mit Tragorgan		−5
Plastaderleitung mit erhöhter Wärmebeständigkeit		+4
Plastschlauchleitung mit Tragorgan		−30
Kältebeständige Starkstromleitungen	für feste Legung	−15
	für ortsveränderliche Legung	−40
Starkstromleitungen mit Isolierhülle und/oder Mantel aus Gummi, außer Bergwerk-Gummischlauchleitung		−30
Bergwerk-Gummischlauchleitung		−20
Starkstromleitungen mit Isolierhülle und/oder Mantel aus Silikongummi oder Glasseide		−50
Heizleitungen		+4

Biegeradien

Die kleinsten zulässigen Biegeradien von Leitungen sind aus Tabelle 5.21 ersichtlich. Dabei hat die Biegung für Leitungen in runder Ausführung nach Tabelle 5.21, Bild a), für Leitungen in flacher Ausführung nach Bild b), für Plastmantelleitungen in flacher Ausführung auch nach Bild c), für Stegleitungen nach den Bildern b)···d) zu erfolgen.
Plastmantelleitungen in flacher Ausführung dürfen vor Einführungen in Betriebsmittel auch über die flache Kante gebogen werden [s. Bild e)], wenn dabei die Adern in ihrer parallelen Lage verbleiben und ein Biegeradius von mindestens 5*b* beachtet wird.
Legen von ein- und mehradrigen sowie verseilten einadrigen Leitungen, Zusammenlegen von Sicherungskreisen, Anschluß- und Leiterverbindungen s. Abschnitt 5.4.

Tabelle 5.21: Kleinste zulässige Biegeradien

Leitungsart	Leiternennquerschnitt mm²	Kleinster Biegeradius r bei: fester Legung und einmaligem Biegen	Kleinster Biegeradius r bei: mehrmaligen unmittelbar aufeinanderfolgenden Biegungen	Art der Biegung
Plast- und Sonderplastaderleitungen	bis 25	$1d$		a)
	35 und 50	$2d$		
	> 50	$4d$		
Gummiaderleitungen	bis 50	$2d$		
	> 50			
Sondergummiaderleitungen, Plastmantelleitungen		$4d$		b)
Fernmeldemantelleitungen		$5d$		
Flache Plastmantelleitungen		$2h$		
Schlauchleitungen allgemein		$4d$	$10d$	c)
Schlauchleitungen in Aufzugsanlagen			$15d$	
Flache Schlauchleitungen	beliebig	$4h$	$8h$	
Stegleitungen		$2h/2b$		d)
Sonderstegleitungen		$2h$	–	
Leuchtröhrenleitungen, Leitungstrossen		$4d$	$10d$	
Illuminationsleitungen		$2d$		e)
Leuchtenleitungen		$1d$	–	
Heizleitungen		$5d/5h$		
Schweißleitungen		–	$5d$	

5.2.2. Starkstromkabel

Als wichtigste *Standards* sind zu beachten:

TGL 200-0612 Kabel in elektrotechnischen Anlagen
TGL 200-1750 Starkstromkabel
TGL 200-1653 Starkstromkabelgarnituren

5.2.2.1. Auswahl der Kabel

Den hohen Anforderungen, die an moderne Energieübertragungssysteme gestellt werden, kann man rationell nur mit Kabeln mit erhöhten Gebrauchseigenschaften, wie sie PVC- und polyäthylenisolierte Kabel aufweisen, gerecht werden. Besondere Bedeutung kommt dabei den Kabeln mit einer Isolierung aus hochreinem alterungsstabilisiertem Hochspannungspolyäthylen in unvernetzter (*PE-Kabel*) oder vernetzter (*VPE-Kabel*) Ausführung zu. Diese Kabel haben vor allem gegenüber den Massekabeln wesentlich verbesserte Eigenschaften, z. B. hinsichtlich der elektrischen Festigkeit, dielektrischen Verluste, Strombelastbarkeit, Leitergrenztemperatur, Legung (keine Masseabwanderung, zulässig für alle Höhendifferenzen), Wartung und Lebensdauer. Optimale Kennwerte erreichen dabei die VPE-Kabel:

Dielektrische Verluste, z. B. bei 30-kV-Kabeln 0,05% der Leiterverluste bei Vollast (Massekabel 1%, PVC-Kabel 20%),
Leitergrenztemperatur bei Dauerlast 90 °C,
Leitergrenztemperatur bei Kurzschluß 250 °C,
Strombelastbarkeit um etwa 30% höher als bei Massekabeln,
zulässiger Erdschlußstrom 100 A bis 300 A,
Lebensdauer über 50 Jahre.

Die Vernetzung bei VPE-Kabeln erfolgt entweder chemisch durch Zugabe von Hilfsstoffen zum Isoliermaterial und Anwendung hoher Temperaturen und Drücke oder durch Einwirkung einer energiereichen Strahlung. Dabei entstehen Quer-

verbindungen zwischen den Polymerketten, und das Polyäthylen geht in einen hochelastischen Zustand, das VPE, über. Die Auswahl der Kabel hat nach den betrieblichen Forderungen der Kabelanlagen sowie den örtlichen und elektrischen Verhältnissen, denen ein Kabel zur Gewährleistung eines dauerhaften Betriebs ausgesetzt ist, zu erfolgen.
Starkstromkabel kommen in Anlagen aller Spannungsebenen zur Anwendung. Ihr Aufbau ist von den örtlichen Betriebs- und Legeverhältnissen abhängig. Die Kabel müssen in ihrem Aufbau TGL 200-1750 entsprechen.

Vor *Auswahl eines Kabels* sind folgende Fragen zu klären:

1. Welche Stromart?
(Gleichstrom, Einphasenwechselstrom, Drehstrom)
2. Welche Spannung?
(U verkettete Spannung zwischen zwei Hauptleitern, U_0 Spannung zwischen Hauptleitern und Erde bzw. Metallmantel)
3. Welche Leistung soll übertragen werden?
(S in kVA bzw. MVA)
4. Liegen besondere Belastungsverhältnisse vor, z. B. intermittierende Last?
5. Wie groß ist der Belastungsstrom?
(Dauerlast, Spitzenlast und deren Dauer)
6. Wo wird das Kabel gelegt?
(in Erde, in Innenräumen, in begehbaren oder nicht begehbaren Kabelkanälen, im Freien, in Bergwerken unter Tage, in Flüssen und Seen, auf Brücken)
7. Treten innerhalb der Kabeltrasse Höhenunterschiede auf, wie groß sind diese und welche Steigung besitzen sie?
(allmählich ansteigendes bzw. abfallendes Gelände, Legung im Gebirge mit Steilstrecken, Mastaufführungen, Hochführung innerhalb von Gebäuden, Schachteinhängungen)
8. Besteht Korrosionsgefahr für das Kabel, und was ist die vermutliche Ursache?
(chemische Korrosion: säurehaltiger Boden, aggressive Dämpfe oder Tropfwasser;
elektrolytische Korrosion; vagabundierende Ströme, z. B. durch Gleichstrombahnen)
9. Wird das Kabel direkt in Erde gelegt oder in Rohre?
10. Liegt Einzellegung vor, oder sind belastete Parallelkabel vorhanden?
11. Wieviel Kabel liegen in Erde nebeneinander, und wie groß ist der lichte Abstand voneinander?
12. Welche Bodenverhältnisse liegen vor?
(trockener Sand, nachgiebiges Gelände, Sumpf- oder Lehmboden)
13. Mit welcher Umgebungstemperatur ist zu rechnen?
(durchschnittlich, maximal)
14. Ist bei Legung der Kabel in Innenräumen (Kabelkanal) eine künstliche Belüftung vorgesehen?
15. Wie werden die Kabel gelegt?
(auf durchgehende oder unterbrochene Register, auf Kabelbrücken, auf dem Boden, mit Schellen an der Wand oder unter der Decke, mit Abstand oder bei gegenseitiger Berührung)
16. Ist bei Legung im Freien mit direkter Sonnenbestrahlung zu rechnen?
17. Sind die Kabel Erschütterungen ausgesetzt?
(Brückenlegung, Luftkabel, Einführung in Trafoendverschlüsse)
18. Werden die Kabel großen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt?
(Zug, Stoß, Schlag oder dgl.)
19. Werden die Kabel in tropischen Gegenden gelegt?
20. Welche Klimaschutzart ist erforderlich?
21. Ist mit tierischen Schädlingen zu rechnen?
22. Welche Lieferlängen sind erforderlich?
23. Wie groß sind der Kurzschlußstrom und die Abschaltzeit?
24. Wie groß ist bei 1-kV-Kabeln der zulässige Spannungsabfall?

5.2.2.2. Bemessung der Kabel

Die Nennspannung der Kabel ist entsprechend der Betriebsspannung auszuwählen. Die maximal zulässige Betriebsspannung ist aus Tabelle 5.22 zu entnehmen.

Es ist in *Drehstromanlagen*: $U = U_0 \cdot \sqrt{3} = U_0 \cdot 1{,}7321$, in *Gleichstromanlagen* bei isolierten Hauptleitern, einem geerdeten Hauptleiter und in *Einphasen-Wechselstromanlagen* mit einem geerdeten Hauptleiter: $U = U_0$;

U Nennspannung zwischen den Hauptleitern,
U_0 Nennspannung zwischen einem Hauptleiter und Erde.

Kabel sind so zu bemessen, daß sie den mechanischen und thermischen Kurzschlußbeanspruchungen standhalten. Die Berechnung des *Stoßkurzschlußstroms* I_s hat nach 5.3.5. zu erfolgen.
Die thermische Kurzschlußfestigkeit einer Kabelanlage ist so zu bemessen, daß die *Leitergrenztemperaturen* nach Tabelle 5.23 bei einem in Energieflußrichtung am Anfang des Kabels gelegenen Kurzschluß nicht überschritten werden. Die Berechnung hat nach 5.3.5. zu erfolgen. Ausnahmen gelten bei Erweiterung bestehender Kabelanlagen und bei sehr kurzen Ausschaltzeiten.
Das Bemessen der Kabel auf *Strombelastbarkeit* hat so zu erfolgen, daß ihre Erwärmung durch den Betriebsstrom an keiner Stelle die Leitergrenztemperaturen nach Tabelle 5.23 übersteigt.

Tabelle 5.22: Nenn- und Betriebsspannungen

Spannungsart		Maximal dauernd zulässige Betriebsspannung in kV bei der Nennspannung U				
		1 kV	10 kV	20 kV	30 kV	110 kV
Wechselspannung	ungeerdete Hauptleiter gegeneinander	1,2	12,0	24,0	36,0	123,0
	ungeerdete Hauptleiter gegen geerdete Hauptleiter, konzentrische Leiter oder Schirm, Erde	0,7	6,9	13,8	20,8	–
Gleichspannung	ungeerdete Hauptleiter gegeneinander	1,8	13,8	–	–	–
	ungeerdete Hauptleiter gegen geerdete Hauptleiter, konzentrische Leiter oder Schirm, Erde	1,8	6,9	–	–	–

Tabelle 5.23: Leitergrenztemperaturen

Kabelart		Kurzzeichen für die Isolierhülle	Leitergrenztemperatur		
			Dauerlast °C	wechselnde Last °C	Kurzschluß °C
Plastkabel	1 kV	Y	70	70	180
		2Y	70	70	120
	10···30 kV	2Y	70	70	165
	10···30 kV	2Yv	90	90	250
	1 kV		80	80	200
Massekabel	10 kV		55	65	165
	20 kV		55	65	145
	30 kV		45	60	130
Ölkabel	110 kV		70	70	130

Die in den Tabellen 5.24···5.33 genannten *Strombelastbarkeitswerte* sind auf die angegebene Nennspannung bezogen und gelten bei Einzellegung in Erde mit einem thermischen Bodenwiderstand von 100 K · cm · W^{-1}, einer Umgebungstemperatur von 20 °C, einer Legetiefe von 0,7 m bei Masse- und Plastkabeln und 1,0 m bei Ölkabeln sowie bei wechselnder Belastung (WB). Bei Legung in Luft gelten die Werte für Einzellegung und offene Kabellage ohne Beeinflussung durch fremde Wärmequellen, bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C sowie bei wechselnder Belastung. Wechselnde Belastung ist die Belastung, bei der auf einen maximal 10stündigen Vollastbetrieb eine mindestens gleichlange Periode mit höchstens 80% der mit dem in den Tabellen angegebenen Faktor DB multiplizierten Strombelastbarkeitswerte folgt.

Tabelle 5.24: Strombelastbarkeit von ein- und mehradrigen 1-kV-Plastkabeln

Leiternennquerschnitt	Strombelastbarkeit für WB in A							
	1adrig[1])		2adrig		3- und 4adrig		5adrig	
mm²	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium								
2,5	39	27	30	24	24	21	24	21
4	50	37	38	32	32	29	32	29
6	64	50	48	42	41	37	41	37
10	85	67	63	57	54	51	54	51
16	110	88	82	75	70	67	70	67
25	150	120	110	102	95	91	95	91
35	178	145	–	–	115	108	–	–
50	220	180	–	–	146	134	–	–
70	275	225	–	–	180	171	–	–
120	375	325	–	–	235	225	–	–
185	465	420	–	–	295	290	–	–
240	545	500	–	–	340	340	–	–
300	610	570	–	–	385	390	–	–
400	735	710	–	–	–	–	–	–
500	835	815	–	–	–	–	–	–
Kupfer								
1,5	36	26	27	24	23	21	23	21
2,5	50	36	36	39	31	28	31	28
4	64	50	50	44	42	37	42	37
6	80	63	65	56	53	50	53	50
10	110	86	87	77	70	64	70	64
16	145	114	112	100	91	86	91	86
25	195	155	150	132	123	119	123	119
35	230	187	–	–	150	140	–	–
50	280	235	–	–	187	172	–	–
70	350	290	–	–	230	220	–	–
120	480	415	–	–	300	290	–	–
185	595	535	–	–	375	370	–	–
240	700	640	–	–	435	435	–	–
300	780	730	–	–	485	495	–	–
400	945	910	–	–	–	–	–	–
500	1070	1050	–	–	–	–	–	–
Faktor DB	0,80	1	0,80	1	0,80	1	0,80	1

[1]) einzeln betriebenes einadriges Kabel

Tabelle 5.25: Strombelastbarkeit von vieladrigen 1-kV-Plastkabeln (Steuerkabeln) in Abhängigkeit von der Aderzahl

Anzahl der belasteten Adern	Umrechnungsfaktor für die Belastbarkeitswerte der Tabelle 5.24	
	für einadrige Kabel in Erde	für einadrige Kabel in Luft
7	0,38	0,46
10	0,34	0,40
14	0,30	0,36
19	0,26	0,32
24	0,24	0,29
30	0,22	0,26
37	0,21	0,24

Tabelle 5.26: Strombelastbarkeit von einadrigen 1-kV-Plastkabeln in Drehstromsystemen

Leiternennquerschnitt	Strombelastbarkeit für WB in A			
			○ ○ ○	
mm²	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium				
50	155	145	175	175
70	190	180	210	215
120	260	255	285	310
185	325	335	355	400
240	375	400	410	475
300	420	460	460	540
400	500	565	545	670
500	560	650	610	765
Kupfer				
50	200	185	220	225
70	245	230	270	280
120	330	330	365	395
185	410	430	450	510
240	475	510	525	605
300	535	585	585	690
400	625	710	685	850
500	695	810	765	965
Faktor DB	0,72	1	0,72	1

Tabelle 5.27: Strombelastbarkeit von einadrigen 10-, 20- und 30-kV-Plastkabeln in Drehstromsystemen

Leiternennquerschnitt	Strombelastbarkeit für WB in A							
	Polyäthylen (PE)-Kabel				Vernetztes Polyäthylen (VPE)-Kabel			
			○ ○ ○				○ ○ ○	
mm²	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium								
50	155	165	165	185	175	190	185	210
70	185	200	195	220	210	235	225	260
120	250	275	260	305	290	330	300	360
185	320	360	325	395	365	425	370	465
240	380	445	380	480	425	510	430	555
300	425	495	420	545	475	570	475	620
400	480	580	460	625	540	670	520	715
500	535	660	510	700	605	760	570	800
Kupfer								
50	195	210	205	230	225	245	235	275
70	235	250	245	280	270	300	280	330
120	320	350	325	385	370	420	380	460
185	405	455	400	490	460	540	460	580
240	480	560	455	600	540	645	520	690
300	530	620	505	665	595	720	570	760
400	585	715	535	745	665	830	615	860
500	650	805	575	835	735	930	660	955
Faktor DB	0,76	1	0,77	1	0,67	1	0,68	1

Tabelle 5.2&: Strombelastbarkeit von ein- und mehradrigen 1-kV-Massekabeln

Leiternennquerschnitt	Strombelastbarkeit für WB in A					
	1adrig[1])		2adrig		3- und 4adrig	
mm²	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium						
2,5	–	–	34	28	31	25
4	–	–	42	35	40	32
6	–	–	54	45	51	41
10	–	–	70	59	67	56
25	–	–	120	100	110	94
50	240	210	–	–	165	145
70	290	265	–	–	190	175
120	410	375	–	–	260	250
185	525	490	–	–	330	330
240	600	575	–	–	385	390
300	690	670	–	–	430	450
400	840	835	–	–	510	555
500	950	960	–	–	–	–
Kupfer						
1,5	–	–	30	25	30	23
2,5	–	–	40	35	40	31
4	–	–	55	45	51	42
6	–	–	70	58	65	52
10	–	–	95	85	87	71
25	–	–	160	145	142	120
50	305	275	–	–	210	190
70	375	340	–	–	245	225
120	530	480	–	–	335	320
185	675	630	–	–	420	420
240	770	740	–	–	490	495
300	885	860	–	–	545	565
400	1080	1070	–	–	640	695
500	1220	1200	–	–	–	–
Faktor DB	0,75	1	0,74	1	0,74	1

[1]) einzeln betriebenes einadriges Kabel

Tabelle 5.29: Strombelastbarkeit von mehradrigen 10-, 20- und 30-kV-Massekabeln (Gürtelkabel, H-Kabel, Mehrmantelkabel)

Leiternennquerschnitt	Strombelastbarkeit für WB in A					
	10 kV		20 kV		30 kV	
mm²	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium						
25	90	85	–	–	–	–
50	140	125	140	135	–	–
70	160	150	160	160	–	–
120	220	210	220	220	210	210
185	280	275	280	280	265	270
240	325	325	325	335	310	315
300	375	380	370	380	355	370
400	440	455	435	465	420	450
500	495	525	490	540	460	500
Kupfer						
25	125	110	–	–	–	–
50	175	180	180	170	–	–
70	210	190	210	205	–	–
120	285	270	280	280	270	265
185	360	350	355	360	340	345
240	415	415	415	430	390	400
300	475	480	465	485	450	470
400	545	570	545	580	520	565
500	610	645	605	665	570	615
Faktor DB	0,83	0,88	0,86	0,88	0,90	0,90

Tabelle 5.30: Strombelastbarkeit von drei im Dreieck angeordneten unbewehrten einadrigen 1-, 10-, 20 und 30-kV-Massekabeln mit Bleimante lin Drehstromsystemen

Leiternennquerschnitt	Strombelastbarkeit für WB in A							
	1 kV		10 kV		20 kV		30 kV	
mm²	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium								
50	170	175	–	–	–	–	–	–
70	205	215	–	–	–	–	–	–
120	280	300	245	255	240	255	225	240
185	355	390	310	330	305	330	285	305
240	410	465	360	390	355	390	330	360
300	465	535	405	450	400	450	370	410
400	550	660	475	550	475	550	440	505
500	615	755	535	630	530	625	495	575
Kupfer								
50	220	220	–	–	–	–	–	–
70	265	275	–	–	–	–	–	–
120	360	385	315	330	310	325	280	305
185	455	500	395	425	390	420	365	390
240	520	590	455	500	455	495	420	460
300	585	680	510	570	510	570	470	520
400	690	825	595	690	595	685	550	630
500	760	935	665	780	655	775	615	710
Faktor DB	0,67	1	0,77	0,88	0,77	0,88	0,85	0,85

Tabelle 5.31: Strombelastbarkeit von drei einzeln nebeneinander liegenden unbewehrten einadrigen 1-, 10-, 20- und 30-kV-Massekabeln mit Bleimantel in Drehstromsystemen

Leiternennquerschnitt	Strombelastbarkeit für WB in A							
	1 kV		10 kV		20 kV		30 kV	
mm²	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium								
50	190	205	–	–	–	–	–	–
70	225	250	–	–	–	–	–	–
120	310	355	265	295	260	290	240	270
185	390	465	330	380	325	380	305	345
240	440	540	380	445	375	445	345	405
300	495	625	425	515	420	510	385	455
400	580	770	495	625	490	625	450	560
500	640	875	550	720	540	705	500	640
Kupfer								
50	240	260	–	–	–	–	–	–
70	290	320	–	–	–	–	–	–
120	395	455	335	380	330	370	305	340
185	490	590	415	480	415	480	385	440
240	555	685	475	565	475	565	435	510
300	620	785	530	645	525	645	475	575
400	715	965	610	780	605	780	555	700
500	780	1085	670	890	660	870	605	795
Faktor DB	0,67	1	0,78	0,88	0,77	0,88	0,86	0,86

Tabelle 5.32: Strombelastbarkeit von drei im Dreieck angeordneten einadrigen 1-, 10-, 20- und 30-kV-Massekabeln mit Aluminiummantel in Drehstromsystemen

Leiternennquerschnitt mm²	Strombelastbarkeit für WB in A							
	1 kV		10 kV		20 kV		30 kV	
	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium								
50	170	170	–	–	–	–	–	–
70	205	210	–	–	–	–	–	–
120	280	300	240	250	240	250	225	235
185	350	385	300	325	300	325	280	300
240	400	455	345	380	345	380	320	350
300	450	515	385	430	390	435	350	390
400	525	630	450	520	450	520	415	475
500	575	710	500	590	495	585	460	535
Kupfer								
50	220	220	–	–	–	–	–	–
70	265	270	–	–	–	–	–	–
120	355	380	310	320	305	320	285	300
185	445	485	380	410	380	410	355	380
240	505	570	435	475	435	480	400	435
300	560	645	480	535	480	540	435	485
400	645	775	545	630	545	640	505	580
500	695	855	600	705	590	705	550	645
Faktor DB	0,67	1	0,77	0,88	0,77	0,88	0,85	0,85

Tabelle 5.33: Strombelastbarkeit von drei einzeln nebeneinander liegenden einadrigen 1-, 10-, 20- und 30-kV-Massekabeln mit Aluminiummantel in Drehstromsystemen

Leiternennquerschnitt mm²	Strombelastbarkeit für WB in A							
	1 kV		10 kV		20 kV		30 kV	
	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft	Erde	Luft
Aluminium								
50	185	200	–	–	–	–	–	–
70	220	245	–	–	–	–	–	–
120	295	345	250	285	245	280	230	260
185	360	435	300	355	305	360	280	330
240	400	500	340	415	340	415	315	375
300	435	564	370	465	375	470	340	420
400	495	685	420	550	420	555	390	505
500	525	755	455	620	450	615	425	565
Kupfer								
50	235	255	–	–	–	–	–	–
70	280	310	–	–	–	–	–	–
120	365	430	310	355	305	350	280	325
185	435	540	365	440	370	440	340	410
240	480	610	405	500	410	510	375	460
300	515	680	430	555	440	570	400	500
400	570	810	480	650	485	660	450	600
500	600	875	515	720	515	720	480	660
Faktor DB	0,67	1	0,78	0,88	0,77	0,88	0,86	0,86

Strombelastbarkeitswerte für Ölkabel s. TGL 20-0612/03.

Bei Vorliegen anderer Bedingungen sind die Strombelastbarkeitswerte in den Tabellen 5.24···5.33 mit den *Minderungsfaktoren* der Tabellen 5.34···5.40 zu multiplizieren. Die zulässige Strombelastbarkeit ist dann

$$I_{zul} = I_T(F_{DB})\,(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5)\,K_6 \cdot K_7.$$

Dabei ist zu beachten, daß von den beiden Klammerwerten stets nur der kleinere Wert zu berücksichtigen ist.

I_{zul} zulässige Strombelastbarkeit,
I_T Strombelastbarkeitswert nach Tabellen 5.24···5.33,
F_{DB} Faktor zur Berücksichtigung des Dauerbetriebes nach Tabellen 5.24···5.33,
K_1 Faktor zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur nach Tabelle 5.34,
K_2 Faktor zur Berücksichtigung der Abweichung vom spezifischen thermischen Erdbodenwiderstand nach Tabelle 5.35, $K_2 = K_{2.1} \cdot K_{2.2}$,
K_3 Faktor zur Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Legung in Betonrohren oder Kabelkanalformsteinen nach Tabelle 5.36,
$K_4 = 0{,}9$; dieser Faktor ist nur bei Verwendung von Kabelschutzhauben zu berücksichtigen,
$K_5 = 0{,}85$; dieser Faktor ist nur bei 1-kV-Kabeln mit einer Legetiefe von 0,45 m zu berücksichtigen,
K_6 Faktor zur Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Häufung in Erde nach Tabelle 5.37 oder 5.38,
K_7 Faktor zur Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Häufung in Luft nach Tabelle 5.39 oder 5.40.

Folgende Umstände müssen bei der *Auswahl der Kabel bezüglich der Belastbarkeit* berücksichtigt werden:

1. der von der Art und dem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens abhängige thermische Bodenwiderstand;
2. in der Nähe liegende belastete Kabel, Heizleitungen u. dgl.,
3. die Wärmestauung durch Luftpolster unter Schutzbedekkungen, in Kanälen, Rohren oder Rohrblöcken.

Tabelle 5.34: Faktor K_1, Berücksichtigung der Umgebungstemperatur

Umgebungstemperatur °C		Plastkabel		Massekabel Nennspannung		
		PVC und PE[1])	VPE[1])	1 kV	10 kV 20 kV	30 kV
0	Erde	1,18	1,14	1,15	1,20	1,22
	Luft	1,25	1,28	1,20	1,28	1,31
5	Erde	1,13	1,11	1,12	1,15	1,17
	Luft	1,20	1,20	1,17	1,22	1,25
10	Erde	1,08	1,07	1,08	1,10	1,12
	Luft	1,15	1,14	1,13	1,18	1,20
15	Erde	1,04	1,03	1,04	1,05	1,06
	Luft	1,10	1,09	1,08	1,12	1,14
20	Erde	1	1	1	1	1
	Luft	1,05	1,04	1,04	1,06	1,07
25	Erde	0,94	0,96	0,96	0,94	0,93
	Luft	1	1	1	1	1
30	Erde	0,90	0,92	0,91	0,88	0,87
	Luft	0,94	0,96	0,95	0,93	0,93
35	Erde	0,84	0,89	0,87	0,82	0,79
	Luft	0,88	0,92	0,91	0,86	0,84
40	Erde	0,78	0,85	0,82	0,74	0,71
	Luft	0,82	0,88	0,85	0,79	0,75
45	Erde	0,71	0,80	0,76	0,66	0,61
	Luft	0,74	0,89	0,80	0,71	0,65
50	Erde	0,63	0,75	0,71	0,58	0,50
	Luft	0,67	0,78	0,74	0,61	0,53
55	Erde	0,55	0,70	0,65	0,47	0,36
	Luft	0,58	0,74	0,67	0,50	0,38

[1]) PVC Polyvinylchlorid, PE Polyäthylen, VPE vernetztes Polyäthylen

Die angegebenen Faktoren in Tabelle 5.36 beziehen sich auf die angegebenen Tabellenwerte für die Kabellegung in Erde. Sie gelten für unbewehrte Betonrohre bzw. Kabelkanal-Formsteine mit einem lichten Innendurchmesser von 15 cm und 2 cm Wanddicke in waagerechter Anordnung bei gegenseitiger Berührung in Erde. Einzelne Rohrstrecken bis zu 6 m Länge brauchen nicht berücksichtigt zu werden.

Tabelle 5.35: Faktor zur Berücksichtigung der Abweichung vom spezifischen thermischen Erdbodenwiderstand ($K_2 = K_{2.1} \cdot K_{2.2}$)

Spezifischer thermischer Erdbodenwiderstand K · cm · W^{-1}		70	100	120	150	200	300
Nennquerschnitt des Leiters in mm² Aluminium, Kupfer		Faktor $K_{2.1}$					
Für alle Kabel außer einadrige Kabel mit Al-Mantel oder konzentrischem Leiter aus Aluminium	Für einadrige Kabel mit Al-Mantel oder konzentrischem Al-Leiter						
bis 25	400···1000	1,10	1	0,96	0,87	0,79	0,70
50···120	185···300	1,13	1	0,93	0,85	0,78	0,68
185···300	50···120	1,14	1	0,93	0,84	0,76	0,66
400···1000	bis 25	1,15	1	0,92	0,84	0,75	0,65
Kabeltyp, Nennspannung in kV		Faktor $K_{2.2}$					
Plastkabel							
1 kV	einadrig	1	1	1	0,99	0,97	0,93
	mehradrig	0,98	1	1	1	1	1
10 kV	einadrig	0,98	1	1	0,98	0,97	0,96
	mehradrig	0,98	1	1	1,01	1,03	1,04
20 kV	einadrig	0,98	1	1	0,98	0,97	0,97
30 kV	einadrig	0,98	1	1	0,98	0,97	0,97
Massekabel							
1 kV	einadrig	1	1	1	0,98	0,97	0,96
	mehradrig	1,01	1	1	1	1	1
10 kV	einadrig	0,99	1	1	1	0,98	0,97
	mehradrig	0,99	1	1	1,01	1,01	1,04
20 kV	einadrig	0,99	1	1	1	1	0,98
	mehradrig	0,98	1	1,01	1,02	1,03	1,03
30 kV	einadrig	0,98	1	1	1	1	0,98
	mehradrig	0.97	1	1,02	1,02	1,03	1,03

Tabelle 5.36: Faktor K_3, Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Legung in Betonrohren oder Kabelkanal-Formsteinen (s. S. 331 unten)

Kennwert	Faktor K_3 für mehradrige Kabel oder im Dreieck gebündelte einadrige Kabel in Rohren									
Anzahl der Rohre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Umrechnungsfaktor	0,80	0,72	0,68	0,65	0,63	0,61	0,60	0,59	0,58	0,57

	Faktor K_3 für einadrige Kabel		
Anzahl der Rohre	3	6	9
Anzahl der Systeme	1	2	3
Umrechnungsfaktor	0,85	0,76	0,72

Tabelle 5.37: Faktor K_6, Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Häufung in Erde für mehradrige Kabel (lichter Abstand der waagerecht angeordneten Kabel etwa 7 cm)

Anzahl der Kabel im Graben		2	3	4	5	6	8	10
Kabeltyp	Nennspannung kV	Faktor K_6						
Plastkabel, mehradrig, oder einadrige Gleichstromkabel	1	0,85	0,75	0,66	0,62	0,58	0,54	0,50
	10	0,83	0,74	0,65	0,62	0,58	0,53	0,51
Massekabel, mehradrig, oder einadrige Gleichstromkabel	1	0,82	0,73	0,65	0,61	0,58	0,53	0,51
	10 und 20	0,82	0,73	0,64	0,61	0,58	0,53	0,50
	30	0,81	0,73	0,64	0,60	0,56	0,52	0,48

Tabelle 5.38: Faktor K_6, Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Häufung in Erde für einadrige Kabel (lichter Abstand der einzelnen Kabel etwa 7 cm; lichter Abstand der einzelnen Systeme gemäß Darstellung in cm; Kabel in Dreieckanordnung mit gegenseitiger Berührung)

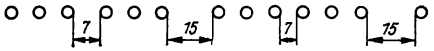
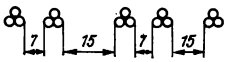
Kabelanordnung und Anzahl der Systeme im Graben										
	2	3	4	6	8	2	3	4	2	3
Kabeltyp	Nennspannung kV	Faktor K_6								
Plastkabel	1	0,84	0,77	0,66	0,56	0,53	0,84	0,78	0,69	0,68	0,62
	10, 20 und 30	0,85	0,80	0,68	0,58	0,56	0,85	0,79	0,70	0,71	0,64
Massekabel	1	0,82	0,76	0,63	0,53	0,50	0,82	0,75	0,66	0,67	0,60
	10 und 20	0,83	0,78	0,65	0,56	0,53	0,83	0,75	0,67	0,68	0,61
	30	0,85	0,79	0,68	0,58	0,57	0,85	0,78	0,70	0,70	0,64

Tabelle 5.39: Faktor K_7, Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Häufung in Luft für mehradrige Kabel und einzeln betriebene einadrige Kabel

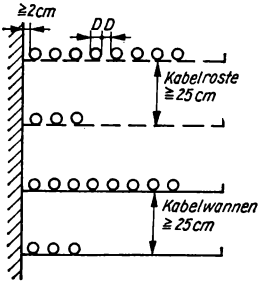
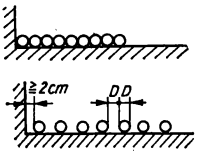
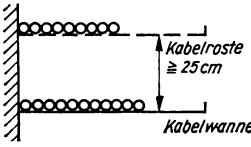
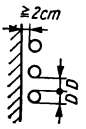
Anzahl der Kabel nebeneinander		Anordnung der Kabel	1	2	3	6	9
Kabel, auf Kabelrosten oder in Kabelwannen liegend	Anzahl der Roste/ Wannen		Faktor K_7				
Bei Kabeln, in Kabelwannen liegend, sind nebenstehende Faktoren zusätzlich mit 0,90 zu multiplizieren.	1		1	0,99	0,98	0,96	0,94
	2		0,98	0,97	0,94	0,92	0,90
	3		0,97	0,96	0,93	0,91	0,89
	6		0,96	0,95	0,91	0,89	0,87
Kabel, auf dem Boden liegend			0,92	0,87	0,82	0,78	0,75
			0,90	0,89	0,88	0,86	0,85
Kabel, auf Kabelrosten oder in Kabelwannen liegend	Anzahl der Roste/ Wannen		Faktor K_7				
Bei Kabeln, in Kabelwannen liegend, sind nebenstehende Faktoren zusätzlich mit 0,97 zu multiplizieren.	1		0,95	0,90	0,85	0,81	0,77
	2		0,93	0,84	0,79	0,75	0,72
	3		0,89	0,80	0,75	0,72	0,68
	6		0,87	0,78	0,74	0,70	0,67
Anzahl der Kabel übereinander			1	2	3	6	9
Kabel, an der Wand übereinander angeordnet			1	0,93	0,89	0,87	0,85

Tabelle 5.39 (Fortsetzung)

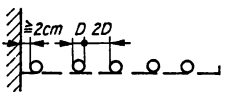
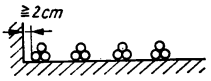
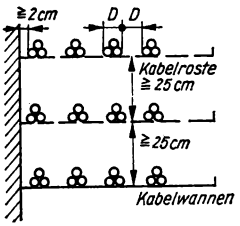
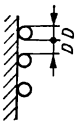
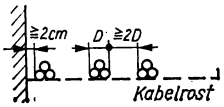
Anzahl der Kabel nebeneinander	Anordnung der Kabel	1	2	3	6	9
Kabel, an der Wand übereinander angeordnet, bei gegenseitiger Berührung		0,95	0,80	0,74	0,70	0,68
Kabelanordnung, bei der eine Reduktion der Belastbarkeit nicht erforderlich ist						

Tabelle 5.40: Berücksichtigung der Belastbarkeitsminderung bei Häufung in Luft für einadrige Kabel in Drehstromsystemen

Anzahl der Systeme nebeneinander		Anordnung der Kabel	1	2	3
Kabel, auf Kabelrosten oder in Kabelwannen liegend	Anzahl der Roste/ Wannen	siehe Tabelle 5.39	Faktor K_7		
Bei Kabeln in Kabelwannen sind nebenstehende Faktoren zusätzlich mit 0,92 zu multiplizieren.	1		1	0,98	0,96
	2		0,96	0,95	0,94
	3		0,95	0,94	0,93
	6		0,93	0,92	0,91
Kabel, auf dem Boden liegend		siehe Tabelle 5.39	0,84	0,82	0,80
		siehe Tabelle 5.39	0,92	0,90	0,89
			0,90	0,88	0,87
Kabel, auf Kabelrosten oder in Kabelwannen liegend	Anzahl der Roste/ Wannen		Faktor K_7		
Bei Kabeln in Kabelwannen sind nebenstehende Faktoren zusätzlich mit 0,90 zu multiplizieren.	1		1	0,98	0,97
	2		0,98	0,97	0,94
	3		0,97	0,95	0,93
	6		0,96	0,94	0,91
Anzahl der System e übereinander			1	2	3
Kabel, an der Wand übereinander angeordnet		siehe Tabelle 5.39	0,92	0,89	0,87
			0,87	0,84	0,82
Kabelanordnung, bei der eine Reduktion der Belastbarkeit nicht erforderlich ist				–	

In Tabelle 5.41 sind die durchschnittlichen Erdbodentemperaturen in °C für das Gebiet der DDR angegeben.

Tabelle 5.41: Durchschnittliche Erdbodentemperaturen in °C für das Gebiet der DDR

Legetiefe	Monat											
m	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
0,45	5	5	5	10	15	20	25	20	20	15	10	5
0,70	5	5	5	10	15	20	20	20	20	15	10	5
1,00	5	5	5	10	15	15	20	20	15	15	10	5

Berechnungsbeispiel: Für das Übertragen einer Leistung von 1,9 MVA bei einer Betriebsspannung von 6 kV Drehstrom und wechselnder Belastung (WB) werden einadrige Plastkabel auf PE-Basis benötigt. Die Kabel sollen neben zwei auf einem einzelnen Kabelrost liegenden Drehstromsystemen gelegt werden, wobei der Kabelzwischenraum = Kabeldurchmesser sein soll. Die Umgebungstemperatur beträgt 30 °C.

Lösung: $I = \frac{S}{\sqrt{3}\,U} = \frac{1{,}9 \cdot 10^6\ \text{VA}}{6 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}\ \text{V}} \approx 183\ \text{A}$

Auftretende *Minderungsfaktoren*

1. $K_1 = 0{,}94$ für erhöhte Umgebungstemperatur von 30 °C und Plastkabel auf PE-Basis (s. Tabelle 5.34).
2. $K_7 = 0{,}96$ für Legung von drei Drehstromsystemen nebeneinander auf einem Kabelrost mit einem Zwischenraum = Kabeldurchmesser (s. Tabelle 5.40).

Gesamtminderungsfaktor $K_g = K_1 K_7 = 0{,}94 \cdot 0{,}96 \approx 0{,}902$.

Nach Tabelle 5.27 beträgt die Strombelastbarkeit bei dem Querschnitt 70 mm² für Aluminium 220 A. Durch die angegebenen Legungsverhältnisse und den Kabelaufbau vermindert sich die Strombelastbarkeit auf 220 A · 0,902 ≈ 198 A. Es wird deshalb ein Kabel des Typs

NA2YHCaY 1 × 70 rm 10 kV — TGL 200-1750

gewählt.

Ohmscher Widerstand, induktiver Widerstand, Betriebskapazität

Ohmsche Leiterwiderstände von Kabeln sind in Tabelle 5.42 zusammengestellt, induktive Widerstände s. Bild 5.1., Betriebskapazitäten s. Bild 5.2.
Die Erdkapazität eines Leiters gegen den Metallmantel bzw. den konzentrischen Leiter entspricht bei 3adrigen Kabeln ohne Aderschirm etwa 50···60% der Betriebskapazität, so daß bei der Berechnung des Erdschlußstromes nur 50···60% des Ladestromes einer Ader eingesetzt werden dürfen.

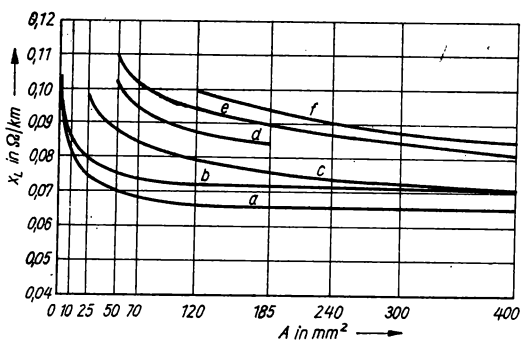


Bild 5.1. Induktiver Widerstand von 3adrigen Plast- und Massekabeln (X_L je Leiter), Richtwerte

a 1-kV-Massekabel, b 1-kV-Plastkabel,
c 10-kV-Massekabel, d 10-kV-Plastkabel,
e 20-kV-Massekabel, f 30-kV-Massekabel

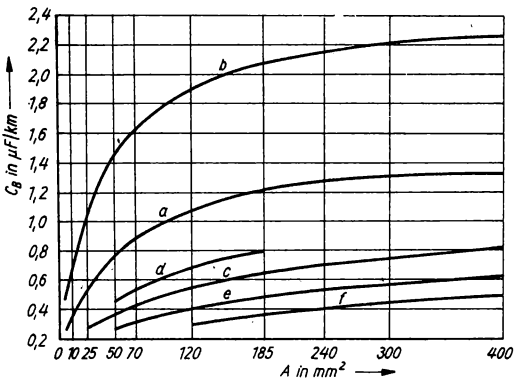


Bild 5.2. Betriebskapazität von 3adrigen Plast- und Massekabeln, Richtwerte

a 1-kV-Massekabel, b 1-kV-Plastkabel, c 10-kV-Massekabel, d 10-kV-Plastkabel, e 20-kV-Massekabel, f 30-kV-Massekabel

Tabelle 5.42: Ohmsche Leiterwiderstände von Kabeln

Leiternennquerschnitt	Maximaler Leiterwiderstand je km bei 20 °C in Ω			
	einadrige Kabel		mehradrige Kabel	
mm²	Aluminium-Leiter	Kupfer-Leiter	Aluminium-Leiter	Kupfer-Leiter
1	–	–	–	18,1
1,5	–	11,9	–	12,1
2,5	11,8	7,14	12,0	7,28
4	7,39	4,47	7,54	4,56
6	4,91	2,97	5,01	3,03
10	2,94	1,77	3,00	1,81
16	1,85	1,12	1,89	1,14
25	1,17	0,708	1,20	0,722
35	0,851	0,514	0,868	0,524
50	0,628	0,379	0,641	0,387
70	0,435	0,262	0,443	0,268
120	0,248	0,150	0,253	0,153
185	0,161	0,0972	0,164	0,0991
240	0,122	0,0740	0,125	0,0754
300	0,0976	0,0590	0,100	0,0601
400	0,0763	0,0461	0,0778	0,0470
500	0,0605	0,0366	0,0617	0,0373

Temperaturkoeffizienten für Aluminium und Kupfer s. 1.9.2.1.

5.2.2.3. Schutz der Kabel

Kabel sind durch Schutzeinrichtungen gegen Überlast und Kurzschluß zu schützen, wenn dadurch keine Gefahren für Menschen und/oder Einrichtungen entstehen können, z. B. im Sekundärkreis von Stromwandlern, im Erregerkreis elektrischer Maschinen, in Schutzleitern. Schutz von Plastkabeln bei Einsatz als Leitungen in Installationsanlagen s. 5.2.1.6.

Überlastschutz

Schutzeinrichtungen gegen Überlast sind auf den ermittelten Strombelastbarkeitswert des zu schützenden Kabels einzustellen (unter Berücksichtigung der Minderungen gemäß Tabellen 5.34···5.40). Abweichungen davon sind zulässig, wenn durch geeignete Maßnahmen ein Überschreiten der Leitergrenztemperaturen für Dauerbetrieb nach Tabelle 5.23 verhindert wird.
Parallelgeschaltete Kabel dürfen über eine gemeinsame Schutzeinrichtung gegen Überlast betrieben werden, wenn die Schutzeinrichtung auf die Summe der für die einzelnen Kabel (unter Berücksichtigung der Minderungen nach Tabellen 5.34···5.40) ermittelten Strombelastbarkeitswerte eingestellt sind. Parallel-

schaltung von Kabeln unterschiedlicher Impedanz ist zu vermeiden. Werden Kabel unterschiedlicher Längen, Leiterquerschnitte, Bauarten oder Leiterwerkstoffe parallelgeschaltet, so ist durch Art oder Einstellung der Schutzeinrichtung ein Überschreiten der Leitergrenztemperaturen für Dauerbetrieb nach Tabelle 5.23 infolge der impedanzbedingten Stromaufteilung zu verhindern.

Kurzschlußschutz

Die Ansprechstromstärke elektromechanischer oder elektronischer Schutzeinrichtungen gegen Kurzschluß ist so zu wählen, daß der Betrieb angeschlossener Verbraucher gewährleistet und die Einhaltung der Forderungen nach 5.2.2.2. gesichert ist.

Schmelzsicherungen

Die Nennstromstärke von Schmelzsicherungen darf über dem Strombelastbarkeitswert des zu schützenden Kabels liegen und ist so zu wählen, daß der Betrieb angeschlossener Verbraucher gewährleistet und die Einhaltung der Forderungen nach 5.2.2.2. gesichert ist.

5.2.2.4. Kennzeichnung von Kabeln

Starkstromkabel mit einer Nennspannung von 1 kV werden vom Hersteller mit einer Aderkennzeichnung durch Farben, Zahlen oder Buchstaben nach TGL 200-1750/02 versehen. Für Kabel anderer Nennspannungen ist eine Aderkennzeichnung nicht vorgeschrieben. 1-kV-Kabel mit einer grün-gelb oder mit dem Buchstaben »J« gekennzeichneten Ader erhalten in der Kurzbezeichnung ein J. 1-kV-Kabel ohne eine grün-gelb oder ohne eine mit dem Buchstaben »J« gekennzeichnete Ader erhalten ein O.

5.2.2.5. Legung von Kabeln

Für die Legung von Kabeln *in Erde und im Freien* sind vorzugsweise Kabel mit Plastmantel ohne Bewehrung, mit Plastschutzhülle oder mit Schutzhülle aus getränkten Faserstoffen zu verwenden.
Für Kabel *in Räumen* sind vorzugsweise solche ohne Schutzhülle aus getränkten Faserstoffen zu verwenden. Kabel mit Schutzhülle aus getränkten Faserstoffen sind zulässig, wenn nach der Legung eine Imprägnierung gegen Brennbarkeit nach TGL 200-0837 erfolgt.
Für das Legen von Kabeln *bei Höhenunterschieden* sind massearme Kabel sowie Plastkabel zu bevorzugen.
Kabel in Erde sind so tief zu legen, daß Schäden, z. B. durch Verkehr, Schachtarbeiten, land- bzw. forstwirtschaftliche Arbeiten, nicht eintreten können. Die *Mindestlegetiefe* ist Tabelle 5.43 zu entnehmen.

Tabelle 5.43: Mindestlegetiefe von Kabeln

Nennspannung	Kabelart	Legetiefe in m		
		bebautes Gelände	freies Gelände	
		mit Abdeckung	mit Abdeckung	ohne Abdeckung
bis 1000 V	mit konzentrischem Leiter oder Metallmantel	0,45[1])	0,7[1])	
	ohne konzentrischen Leiter oder ohne Metallmantel	0,45	0,7	1,0
über 1 kV	Masse- und Plastkabel	0,7		
	Ölkabel	1,0		–

[1]) Anstelle der Abdeckung ist vorzugsweise Warnband nach TGL 23425/02 zu verwenden.

Der *Übergang des Kabels in ein Gebäude* hat durch besondere Aussparungen oder durch in Mauerdurchbrüche eingelegte Formteile, z. B. Tonrohre, Asbestzementrohre, Kabelformsteine, zu erfolgen. Ins Gebäudeinnere hinein sollen die Formteile ansteigend gelegt werden. Sie sind mit nichtbrennbarem Material gasdicht abzudichten. Die Abdichtung mittels Zementbeimischung ist nicht zulässig.
Kabel mit Nennspannungen über 1 kV dürfen nicht gemeinsam mit Kabeln, die dem Schutz, der Überwachung, der Betätigung von Anlagen oder der Informationsübertragung dienen, auf eine Kabelpritsche oder Konsole gelegt werden. Bei Anordnung nebeneinander sind die Kabel z. B. auf gegenüberliegende Kanalseiten zu legen oder mit Bauteilen, die einen Feuerwiderstand von mindestens $fw = 0{,}25$ besitzen, abzuschirmen. Bei Anordnung übereinander sind die Kabel mit Nennspannungen über 1 kV vorzugsweise auf die oberen Pritschen oder Konsolen zu legen und mit Bauteilen, die einen Feuerwiderstand von mindestens $fw = 0{,}25$ besitzen, abzuschirmen.
Werden Kabel in Kabelkanal-Formsteinen nach TGL 23385 oder Schutzrohren in Erde gelegt, so soll die lichte Weite der Züge und Rohre mindestens dem 1,5fachen Kabelaußendurchmesser entsprechen. Das Legen von einzelnen Einleiterkabeln eines Drehstromsystems in Stahlrohren ist unzulässig.
Kabel sind so zu befestigen, daß keine ihre Betriebseigenschaften gefährdende Deformierung eintritt. Die Abstände für Auflage und Befestigung von Mehrleiterkabeln dürfen nicht größer als 1 m sein, bei senkrechter Befestigung von Metallmantelkabeln ist ein Abstandsmaß bis zu 3 m zulässig. Die Abstände für Auflagen und Befestigungen von Einleiterkabeln sind in Abhängigkeit vom Stoßkurzschlußstrom, dem Leiterquerschnitt und der Legungsart entsprechend TGL 200-0612/02 festzulegen. Die Auflagebreite der Befestigungselemente soll gleich dem Kabelaußendurchmesser sein. Bei einzeln gelegten einadrigen Kabeln dürfen die Befestigungselemente keinen geschlossenen magnetischen Kreis bilden.
Kabel sind so zu transportieren, zu lagern und zu legen, daß ihre Betriebseigenschaften nicht verschlechtert werden. Die Kabelenden sind so zu verkappen, daß Kabelimprägniermasse nicht auslaufen und Feuchtigkeit nicht eindringen kann.
Kabel dürfen bei einer Eigentemperatur $< 4\,°C$ nicht gelegt oder einer Biegebeanspruchung ausgesetzt werden. Das Anwärmen der Kabel bis zur zulässigen Leitergrenztemperatur (s. Tabelle 5.23) ist zulässig. Für die Legung der Kabel sind die Mindestbiegeradien nach Tabelle 5.44 zu beachten.

Tabelle 5.44: Mindestbiegeradien von Kabeln

Mantelart	Legung Lage	Mindestbiegeradius[1])	
		Legung manuell oder teilmechanisiert	Legung vollmechanisiert
Bleimantel, Al-Wellmantel	während der Legung oder Biegung	$20d_a$[2])	$15d_a$
	Ziehen über Schablone und endgültige Lage	$15d_a$	$15d_a$
Glatter Al-Mantel	während der Legung oder Biegung	$25d_a$	$20d_a$
	Ziehen über Schablone und endgültige Lage	$20d_a$	$20d_a$
Plastmantel	während der Legung oder Biegung	$15d_a$	$10d_a$
	Ziehen über Schablone und endgültige Lage	$10d_a$	$10d_a$

[1]) d_a Kabelaußendurchmesser in mm
[2]) Im Spitzenzug gezogene Kabel mit Bleimantel dürfen während der Legung in Kurven den Biegeradius von $30d_a$ nicht unterschreiten.

Für das Legen der Kabel gelten die nach Tabelle 5.45 zu ermittelnden maximalen Zugkräfte. Bei mechanischem Kabelzug ist die Zugkraft unter Beachtung der Trasse, z. B. Winkelpunkte, zu wählen.

Tabelle 5.45: Zulässige Zugkräfte[1])

Kabelart	Maximale Zugkraft in N	
	Ziehen an den Leitern	Ziehen mit Ziehstrumpf
Bleimantelkabel ohne Bewehrung	$29A$[2])	$59d_a$
mit Stahlbandbewehrung	$39A$[2])	
Al-Mantelkabel ohne Bewehrung	$29A$[2])	$135d_a$
mit Stahlbandbewehrung	$39A$[2])	
Plastmantel ohne Bewehrung, mit Stahlbandbewehrung, konzentrischem Mittelleiter, konzentrischem Schirm	$39A$	$118d_a$
Kabel mit Stahlrunddrahtbewehrung	$29A$[2])	$49zd^2$
	$39A$[3])	

[1]) d_a Kabelaußendurchmesser in mm, d Durchmesser eines Bewehrungsdrahtes in mm, z Anzahl der Bewehrungsdrähte, A Querschnitt aller Leiter in mm²
[2]) bei Papierisolierung
[3]) bei Plastisolierung

5.2.2.6. Leiterverbindungen

Leiterverbindungen müssen die gleiche thermische und mechanische Belastbarkeit wie das Kabel besitzen. Die Leiter können durch Löten, Schweißen, Klemmen oder Pressen verbunden werden. Die Spannungsfestigkeit der Isolierung muß der der Isolierung des Kabelleiters gleichwertig sein. Der *Übergang des Kabelleiters zu Leitern* offener Leitungssysteme hat über druckfeste Schraubverbindungen mit Kabelschuhen, Laschen oder Klemmen zu erfolgen. Dabei sind Aluminiumverbindungen gegen Korrosion zu schützen.
Der Übergang von Kabeln zu offenen Leitungssystemen hat über *Endverschlüsse* zu erfolgen. Diese müssen den mechanischen und elektrischen Schutz des Kabelendes, den Schutz gegen das Eindringen von Feuchtigkeit in die Isolierung des Kabels und gegen das Austreten von Imprägniermasse dauerhaft gewährleisten. Ihre Auswahl hat unter Berücksichtigung des Anwendungsortes, z. B. Innenraum, Freiluft, des Übergangs auf Freileitung und des Kabeltyps nach TGL 200-1653 zu erfolgen. Bei plastisolierten Kabeln einer Nennspannung bis 1000 V ist eine Endenabdichtung nur erforderlich, wenn mit dem Eindringen von Wasser in das Kabel zu rechnen ist. Der montierte Endverschluß darf die elektrische Wertigkeit des Kabels nicht mindern.

5.2.3. Starkstromfreileitungen

Als wichtigste Standards sind zu beachten:
TGL 200-0614 Starkstrom-Freileitungen,
TGL 21226 Freileitungen, Drähte, Seile,
TGL 20435 Elektrische Isolatoren.

5.2.3.1. Schutz gegen zufälliges Berühren

Die Isolatoren und die Leiter sind so anzubringen, daß sie ohne besondere Hilfsmittel weder vom Erdboden noch von Dächern, Ausbauten, Fenstern und anderen von Menschen regelmäßig betretenen Stätten aus zugänglich sind. Der *Abstand zwischen den Leitern und dem Erdboden* muß bei Freileitungen bis 1000 V mindestens 5 m und bei Freileitungen über 1 kV mindestens 6 m bei größtem Durchhang betragen. Bei Nennspannungen über 110 kV ist der Mindestabstand additiv um $\frac{U_n - 110}{150}$ zu vergrößern.
Bei Hausanschlußleitungen darf dieser Abstand auf 4 m verringert werden, wenn die Freileitungen auf dem Grundstück des angeschlossenen Gebäudes verlaufen und das Unterfahren mit Fahrzeugen unmöglich ist. Bei Verwendung von Luftkabeln darf dieser Abstand auf 2,5 m verringert werden.
Der Abstand zwischen den Leitern einer Freileitung und Bäumen muß bei Freileitungen bis 1000 V mindestens 1,25 m und bei Freileitungen über 1 kV mindestens 2,5 m betragen, unabhängig davon, ob die Bäume zur Ausführung von Arbeiten, z. B. Pflege, Einbringung der Ernte, bestiegen werden oder nicht. Bei Verwendung von Luftkabeln darf der Abstand allseitig auf 0,2 m verringert werden. Bei Nennspannungen über 110 kV ist der Mindestabstand additiv um $\frac{U_n - 110}{150}$ zu vergrößern.
In Tabelle 5.46 sind die wichtigsten *lotrechten Mindestabstände* angegeben.
Der lotrechte Mindestabstand bei Normalbedingungen zwischen einem Leiter und einem Fremdobjekt ist bei Ruhelage und Größtdurchhang sowie bei jeder Ausschwingung bis zur Größtausschwingung einzuhalten. Bei Sonderbedingungen ist der lotrechte Mindestabstand zwischen einem Leiter und einem Fremdobjekt bei ungleicher Eislast der Spannfelder und Ruhelage sowie nach dem Bruch *eines* Isolators von Isolatorenketten aus mehreren Strängen bei Ruhelage und Größtdurchhang einzuhalten.

Tabelle 5.46: Lotrechte Mindestabstände

Fremdobjekt	Lotrechter Mindestabstand zwischen Fremdobjekt und Leiter						
	bei Normalbedingungen und Nennspannung				bei Sonderbedingungen und Nennspannung		
	bis 1000 V	über 1 kV bis 110 kV	220 kV	380 kV	1 kV bis 110 kV	220 kV	380 kV
	m	m	m	m	m	m	m
Freies Gelände mit geringen Unebenheiten sowie über freiem Gelände in Ortschaften	5	6	6,8	7,8	—	—	
Autobahnen, Fernverkehrsstraßen, Landstraßen, Fahrwege	6	7	7,8	8,8	5	5,8	6,8
Bäume im freien Gelände oder in Ortschaften	1,25	3	3,8	4,8	—	—	—
Gebäude aller Art, gewerbliche und industrielle Anlagen, Schornsteine	2,5	3,6[1])	4,4	5,4	3	3,8	4,8
Antennen		2[2])	2,8	3,8	1,5	2,3	3,3

Tabelle 5.46 (Fortsetzung)

Fremdobjekt	Lotrechter Mindestabstand zwischen Fremdobjekt und Leiter						
	bei Normalbedingungen und Nennspannung				bei Sonderbedingungen und Nennspannung		
	bis 1000 V	über 1 kV bis 110 kV	220 kV	380 kV	1 kV bis 110 kV	220 kV	380 kV
	m	m	m	m	m	m	m
Starkstrom-Freileitungen mit Nennspannungen bis 1000 V und über 1 kV	1	2	2,8	3,8	1,5	2,3	3,3
Schienengebundene Bahnen mit Fahrleitung	3	3	3,8	4,8	2	2,8	3,8
Schienengebundene Anschluß- und Werkbahnen sowie Bahnen der Nahverkehrsbetriebe ohne Fahrleitung	7	7	7,8	8,8	6	6,8	7,8
Schienengebundene Bahnen der Deutschen Reichsbahn ohne Fahrleitung	7	7	7,8	8,8	7	7,8	8,8
wie vor, jedoch für Elektrifizierung vorgesehen	—	12,5	13,3	14,3	—	—	—
Wasserstraßen der Wasser- und Binnenschiffahrt (Maße über höchstem schiffbarem Wasserstand)	12,5	12,5	13,3	14,3	11,5	12,3	13,3
wie vor bei Oder, Elbe und Küstenflüssen	17,5	17,5	18,3	19,3	16,5	17,3	18 3
wie vor bei umgelegtem Mast	10	10	10,8	11,8	—	—	—
Seilschwebebahnen für Personenbeförderung und Sessellifte, Schleppliftanlagen	3	3	3,8	4,8	3	3,8	4,8
Seilschwebebahnen ohne Personenbeförderung	2	2	2,8	3,8	2	2,8	3,8
Informationsfreileitungen, einschl. Informationsluftkabel mit eigenen Masten	1	2	2,8	3,8	1,5	2,3	3,3

[1]) über 1 kV bis 30 kV: 3 m
[2]) über 1 kV bis 30 kV: 1,5 m

5.2.3.2. Leiter

Als Leiter sind Seile nach TGL 21226/03 zu verwenden. Die in Tabelle 5.47 angegebenen Nennzugspannungen dürfen nicht überschritten werden. Die Seilzugspannung an den Befestigungspunkten darf beim Auftreten der der Berechnung zugrunde gelegten Nennzugspannung den Wert der höchstzulässigen Nennzugspannung um nicht mehr als 5% überschreiten.

Tabelle 5.47: Festwerte der Leiter für die mechanische Bemessung

Art des Leiters		Höchstzulässige Nennzugspannung MPa	Dauerzugspannung MPa
Kupferseil		190	300
Aluminiumseil		80	120
Aluminium-Stahl-Seil	1,7	190	368
mit Querschnitts-	4,3	115	240
verhältniszahl	5,7···6,0	110	208
	7,7	100	189
Stahlseil	St I	160	320
	St II	280	560
	St III	450	900

Das 2fache der der Berechnung zugrunde gelegten Eislast darf den Leiter an den Befestigungspunkten höchstens bis zur Dauerzugspannung nach Tabelle 5.47 beanspruchen.
Der Leiterquerschnitt ist so festzulegen, daß durch den Dauerstrom die Leitertemperaturen von

70 °C für Kupferseile
80 °C für Aluminium- und Aluminium-Stahl-Seile

nicht überschritten werden. Die zulässigen Mindestquerschnitte sind in Tabelle 5.48 festgelegt. Nennwerte der Dauerstrombelastbarkeit s. TGL 21226/03. Die Berechnung der thermischen Kurzschlußfestigkeit hat nach 5.3.5. bzw. nach TGL 200-0606/04 zu erfolgen.

Tabelle 5.48: Zulässige Mindestquerschnitte für mehrdrähtige Leiter

Leiter	Mindestquerschnitt
Kupfer	10 mm²
Stahl, feuerverzinkt	16 mm²
Aluminium und seine Legierungen	25 mm²
Aluminium-Stahl	16/2,5 mm²

Durchhang

Der größte Durchhang der Leiter wird *Größtdurchhang* genannt. Er ist der lotrechte Abstand zwischen der Verbindungslinie der beiden Aufhängepunkte und dem Leiter, der sich entweder bei einer Leitertemperatur von −5 °C und der der Berechnung zugrunde gelegten Eislast oder bei der höchsten der der Berechnung zugrunde gelegten Leitertemperaturen ohne Zusatzlast ergibt. Als Leitertemperatur sind dazu mindestens 40 °C zu berücksichtigen. Für die Leiter ist eine Zusatzlast von $n(4 + 0{,}2d)$ in N/m anzunehmen.
n Zusatzlastfaktor, d Seildurchmesser in mm
$n = 1$ bei Freileitungen in der Flachlandzone, d. h. Gebiete außer Mittelgebirgen, Mittelgebirgsvorland sowie einem 5 km breiten Küstenstreifen.
Für die *Durchhangsberechnung* sind die in Tabelle 5.49 genannten Festwerte zu verwenden.

Tabelle 5.49: Festwerte der Leiter für die Durchhangsberechnung

Art des Leiters		Dichte kg/dm³	Längenausdehnungszahl 1/K	Elastizitätsmodul GPa
Kupferseil		8,9	$17{,}0 \cdot 10^{-6}$	130
Aluminiumseil		2,7	$23{,}0 \cdot 10^{-6}$	56
Stahlseil	St I	7,8	$12{,}3 \cdot 10^{-6}$	192
	St II	7,8	$11{,}0 \cdot 10^{-6}$	196
	St III	7,8	$11{,}0 \cdot 10^{-6}$	200
Aluminium-Stahl-Seil mit Querschnittsverhältniszahl	1,7	4,6	$14{,}9 \cdot 10^{-6}$	109
	4,3	3,7	$17{,}6 \cdot 10^{-6}$	83
	5,7···6,0	3,5	$18{,}5 \cdot 10^{-6}$	77
	7,7	3,3	$19{,}2 \cdot 10^{-6}$	72

Durchhangsberechnung (grafisches Verfahren nach SZILAS). Es bedeuten:

A Leiterquerschnitt in mm²,
a Spannweite in m,
d Seildurchmesser in mm,
E Elastizitätsmodul in GPa,
f Durchhang in m,
g_0 Seillast in N/m,
g_1 Gesamtlast bei −5 °C in N/m,
g_z Zusatzlast in N/m,
t_{krit} kritische Temperatur in °C,
α_t Ausdehnungskoeffizient in 1/K,
δ_0 spezifische Seilbelastung ohne Zusatzlast in N/cm³,
δ_1 spezifische Seilbelastung mit Zusatzlast in N/cm³,
δ_z spezifische Zusatzlast je m und mm² Seilquerschnitt in N/cm³,
γ Dichte in kg/dm³,
φ Durchhang in %,
σ_0 Seilspannung in MPa.

Die Maße gehen zum Teil auch aus Bild 5.3 hervor.

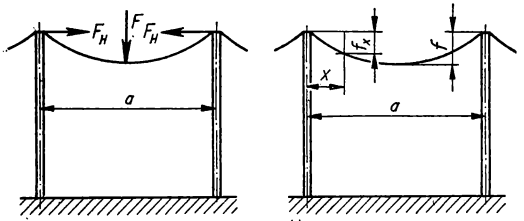


Bild 5.3. a) Beanspruchung des Leitungsseils, b) Darstellung des Durchhangs

Gesamtlast bei −5 °C ist $g_1 = g_0 + g_z$, wobei die *Zusatzlast* $g_z = n(4 + 0{,}2d)$ ist. Die *spezifische Seilbelastung* beträgt

$$\delta_0 = \frac{g_0}{A} = \gamma \cdot 10^{-3}$$

und

$$\delta_1 = \frac{g_0 + g_z}{A} = \gamma \cdot 10^{-3} + 0{,}4 + 0{,}02d = \delta_0 + \delta_z.$$

Damit wird die *Seilspannung*

$$\sigma_0 = \frac{\delta a^2}{8f}$$

und der *Durchhang*

$$f = \frac{\delta a^2}{8\sigma_0}.$$

Die Durchhänge bei −20 °C bzw. −5 °C + g_z betragen dann

$$f_{-20} = \frac{\delta_0 a^2}{8\sigma_{zul}} \quad \text{bzw.} \quad f_{-5+z} = \frac{\delta_1 a^2}{8\sigma_{zul}}.$$

Daraus ergeben sich die *kritische Spannweite*

$$a_{krit} = \sigma_{zul}\sqrt{\frac{360\alpha_t}{\delta_1^2 - \delta_0^2}}$$

und die *kritische Temperatur*

$$t_{krit} = \sigma_{-5+z}\frac{1 - \delta_0/\delta_1}{\alpha_t E} - 5 \text{ in °C}.$$

Da der Durchhang mit der Temperatur zunimmt, tritt der maximale Durchhang auf

bei +40 °C, wenn $t_{krit} < +40$ °C,
bei −5 °C, wenn $t_{krit} > +40$ °C.

Im Bild 5.4 findet man, von z. B. $\varphi = 2{,}24\%$ aus senkrecht nach oben bis zu $t_{krit} = +45$ °C gehend, den Ausgangspunkt S_a, der mit der angenommenen Spannweite $a = 100$ m verbunden wird. Für die Temperaturen −20 °C, 15 °C und 40 °C ergeben sich folgende Abszissen:

$\varphi_{-20} = 0{,}9\%$, $\varphi_{+15} = 1{,}64\%$, $\varphi_{+40} = 2{,}14\%$.

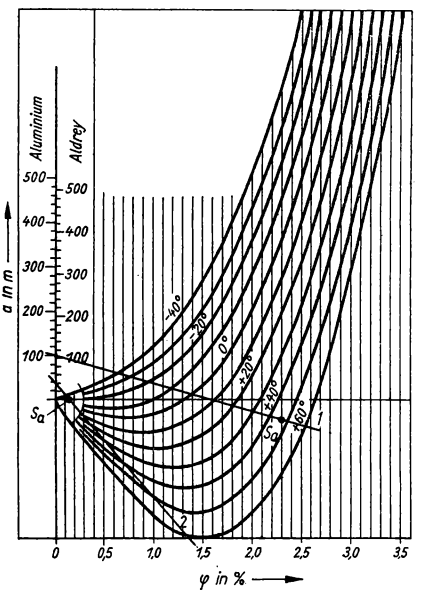


Bild 5.4. Bestimmen des Durchhangs φ (nach SZILAS)
1 und 2 sind angenommene Beispiele

Die Durchhänge sind Tabelle 5.50 zu entnehmen.

Tabelle 5.50: Durchhänge in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Spannweite von 100 m

Durchhang	Temperatur in °C			
	$-5 + g_z$	−20	+15	+40
φ in %	2,24	0,9	1,64	2,14
f in m	2,24	0,9	1,64	2,14

$$f_{-20} = \frac{0{,}9\,\% \cdot 100\ \text{m}}{100} = 0{,}9\ \text{m},$$

$$f_{+15} = \frac{1{,}64\,\% \cdot 100\ \text{m}}{100} = 1{,}64\ \text{m},$$

$$f_{+40} = \frac{2{,}14\,\% \cdot 100\ \text{m}}{100} = 2{,}14\ \text{m}.$$

Auf gleiche Weise lassen sich alle Werte zwischen −40 °C und +60 °C ermitteln und in einer Montagetabelle zusammenstellen.
Die unter Spannung stehenden Leiter müssen voneinander und von anderen Leitern desselben Spannfeldes einen Abstand erhalten, der ein Zusammenschlagen oder, bei Freileitungen über 1 kV, eine Annäherung bis zum Überschlag verhindert. Bei Freileitungen bis 1000 V muß der Abstand der nichtausgeschwungenen Leiter bei Spannweiten bis 60 m mindestens 0,35 m betragen.

5.2.3.3. Leiterbefestigungen, Armaturen

Leiter von Freileitungen bis 1000 V sind mit Bauteilen an den Isolatoren zu befestigen, z. B. durch Drahtbunde, Klemmbunde, Verbinder. Die Bauteile sind so auszuwählen, daß eine elektrochemische Korrosion nicht erfolgt. Auf Zug beanspruchte Klemmen und Verbinder sind so auszuwählen, daß sie den Leiter, für den sie bestimmt sind, mit mindestens 85% der rechnerischen Sollbruchlast, der rechnerischen Istbruchlast oder der 2,5fachen Höchstzugkraft halten.
Für Freileitungen über 1 kV sind Armaturen nach TGL 21825/02 und/oder TGL 16554/02 mit der Beanspruchungsklasse 1 sowie der Ausführungsklasse NI zu verwenden. Die auf Armaturen einwirkenden Belastungen dürfen bei Armaturen aus

Stahl	30%
Temperguß	25%
Gußlegierungen	20%
Knetlegierungen	30%

der Mindestbruchkraft nicht überschreiten. Die Abziehkraft der Abspannarmaturen und der Armaturen für zugfeste Verbindungen muß mindestens 85% der rechnerischen Sollbruchlast der Leiter betragen. Die Abziehkraft der Tragarmaturen muß gleich oder größer der höchstzulässigen Nennzugkraft der Leiter sein. Für Tragklemmen dürfen die Belastungen 40% der Mindestbruchkraft nicht überschreiten.
Kerbverbinder für Frei- und Fahrleitungsseile sind im Bild 5.5 dargestellt. Die Abmessungen sind in Tabelle 5.51 angegeben.

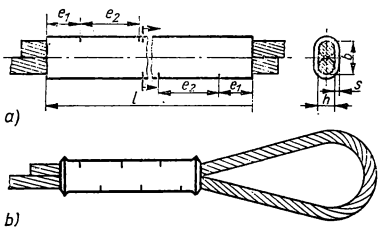


Bild 5.5. a) Kerbverbinder für Frei- und Fahrleitungsseile, b) Anwendungsbeispiel für einen Endbund

Tabelle 5.51: Abmessungen für Kerbverbinder (Maße in mm)

Für Seile	Nenngröße	b[1]	e_1	e_2	h[1]	l	s	Anzahl der Kerben
Cu – – Bz	10	8,5	9	18	4,5	63	1	6
	16	12	14	28	6	98	1,5	
Al St	25	14 (14,2)	16	32	7 (7,1)	112		
	35	16 (16,7)	18	36	8 (8,4)	126		
	50	19,5 (20)	20	40	10 (10)	180		8
	70	22,5 (23)	22	44	11,5 (11,3)	198		
–	95	26,5	24	48	13,5	264	2	10
	120	30	26	52	15	286		
–	150	33,5	28	56	17	308		
	185	37	30	60	18,5	330		
	240	42	32	64	21	416	2,5	12

[1]) Klammermaße für Stahlseile

5.2.3.4. Isolatorenketten, Isolatoren

Für Freileitungen bis 1000 V sind standardisierte Isolatoren und Armierungsteile zu verwenden, z. B. Stützenisolator, Schäkelisolator, Zugisolator, Isolierei, Stützen, Bügel, Abspannhaken. Als *äußere Kräfte* sind bei Isolatoren zu berücksichtigen: in Traglage die Eigenmasse und Eislast des Leiters oder die Eigenmasse und Windlast auf den Leiter, in Abspannlage der gewählte Höchstzug und die Eigenmasse und die Eislast des Leiters.
Die Isolation von Isolatorenketten für Freileitungen über 1 kV ist nach den in TGL 20445/02 für Betriebsmittel der Isolationsgruppe 2 und für die Koordinationsform 2 oder 3 festgelegten Isolationsforderungen zu bemessen. Dabei ist der Fremdschichteinfluß zu beachten. Für Isolatorenketten mit Trag- oder/und Abspannfunktion gelten die Lastfälle nach Tabelle 5.52. Isolatoren in einer Kette dürfen nur auf Zug beansprucht

Tabelle 5.52: Lastfälle für Isolatorenketten

Lastfall	Lastannahmen	Funktion der Isolatorenkette
1	Eigenlast der Isolatorenkette oder des betrachteten Kettenteiles Eigenlast des Leiters Eislast an der Isolatorenkette oder dem betrachteten Kettenteil Eislast am Leiter Resultierende Kraft am Leiter – Befestigungspunkt aus den Nennzugkräften des Leiters	Tragfunktion
2	Eigenlast der Isolatorenkette oder des betrachteten Kettenteiles Eigenlast des Leiters Windlast auf die Isolatorenkette oder das betrachtete Kettenteil Windlast auf den Leiter Resultierende Kraft am Leiter – Befestigungspunkt aus den horizontal wirkenden Komponenten der Zugkräfte des Leiters bei einer Leitertemperatur von 10 °C	
3	Nennzugkraft des Leiters	Abspannfunktion

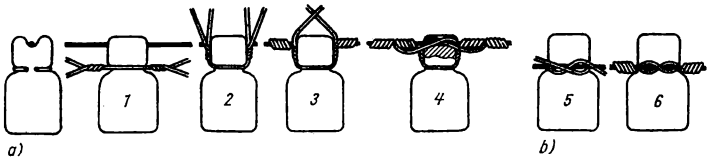


Bild 5.6. Bunde und Verbindungen
a) mit Kopfbund, b) mit Halsbund

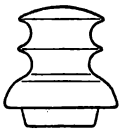


Bild 5.7. Isolatoren für Nennspannungen bis 1 000 V

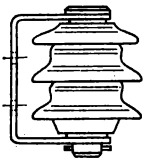


Bild 5.8. Schäkelisolatoren (nach TGL 73-4125) für Nennspannungen bis 1 000 V

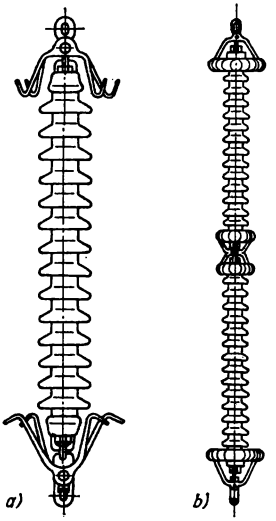
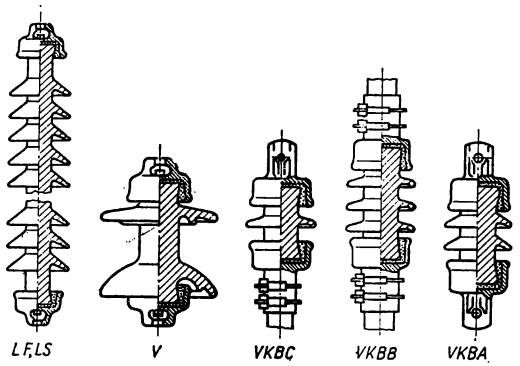


Bild 5.10. a) Vollkern-Langstabilisator mit Schutzhornkreuz, b) Vollkern-Langstabilisatorenkette mit Schutzkörben



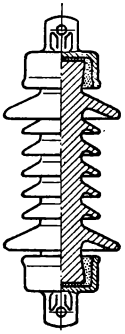


Bild 5.9. Hänge- und Abspannisolatoren LF (für mittlere Fremdschichten) oder LS (für starke Fremdschichten) Langstabilisatoren mit Pfannenkappen von 24 bis 123 kV Isolationsspannung, V Vollkernisolator, VKBA, VKBB, VKBC Vollkern-Bahnisolatoren mit Augen- und Rohrkappen, VKBS Vollkern-Bahnisolatoren für Gebiete mit Verschmutzung und schwierigen Betriebsverhältnissen

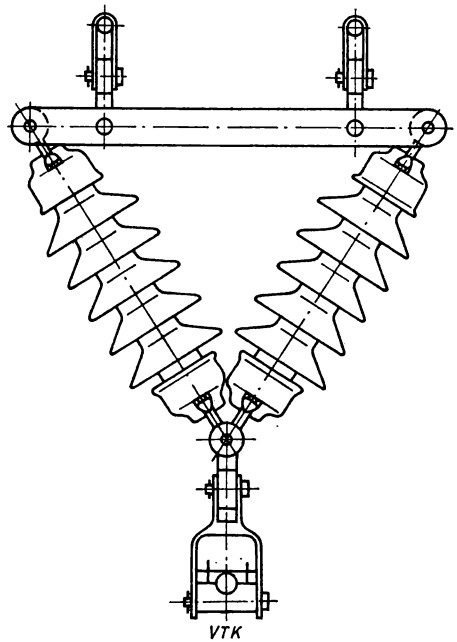


Bild 5.11. VTK Tragkette mit Abstandlasche und Langstabilisatoren mit Pfannenkappen 1···30 kV (nach TGL 190-614)

werden. Die Isolatorenketten sollen so gestaltet sein, daß ein Ansammeln von Wasser in den Armaturen und Isolatorenschirmen vermieden wird. Für Isolatoren für Isolatorenketten sind vorzugsweise Vollkern-Langstab-Isolatoren und/oder Vollkern-Isolatoren nach TGL 20435 zu verwenden. Die auf die Isolatoren einwirkenden Belastungen dürfen 30% der Mindestzugbruchkraft nicht überschreiten. Bei Mehrfachketten dürfen nach Bruch einer Einzelkette diese Belastungen auf die verbleibenden Isolatoren 60% der Mindestzugbruchkraft nicht überschreiten.
Verschiedene *Formen von Isolatoren und Isolatorenketten* sind in den Bildern 5.6···5.11 wiedergegeben.

5.2.3.5. Maste

Man unterscheidet:

Tragmaste, die zum Tragen der Leiter dienen und nur in gerader Strecke verwendet werden,

Winkelmaste, die die Resultierende der Leiterzüge in den Winkelpunkten aufnehmen,

Abspannmaste, die Festpunkte in der Leitung bilden,

Endmaste, die zur Aufnahme der gesamten einseitigen Leiterzüge dienen,

Abzweig- und Verteilungsmaste zum Abzweigen oder zum Verteilen der Leitungen nach verschiedenen Richtungen.

Maste aus Stahl

Als grundlegende Standards für Freileitungsmaste gelten TGL 13500 und TGL 13503/01, 02. Formänderungsnachweise sind bei der Berechnung von Stahlgittermasten i. allg. nicht zu führen. Maste in Freileitungen mit Nennspannungen bis 1000 V sind für die Lasten

gewählter Höchstzug der Leiter,
Eigenlast der Maste, Querträger, Leiter, Isolatoren und Armierungsteile,
Eislast der Leiter,
Windlast

und Maste in Freileitungen mit Nennspannungen über 1 kV mit den Lastannahmen

Eigenlast,
Eislast,
Windlast und daraus resultierende Leiterzugkräfte,
Montage- und Transportlast
und den Lastkombinationen nach TGL 200-0614/23

zu berechnen. Stahlmaste sind in den Bildern 5.12 und 5.13 dargestellt.

Maste aus Holz

Für die Berechnung und bauliche Durchbildung gilt TGL 112-0730. Berechnung wie bei Masten aus Stahl. Formänderungsnachweise sind nicht zu führen. Die zulässigen Spannungen auf der Grundlage einer Biegefestigkeit von 50 MPa für Nadelholz und 80 MPa für Hartholz sind in Tabelle 5.53 festgelegt.

Tabelle 5.53: Zulässige Spannungen für Maste aus Holz

Art der Beanspruchung	Nadelhölzer MPa	Harthölzer MPa
Zug oder Biegung	14,5	19,0
Druck in Faserrichtung	11,0	12,0
Druck quer zur Faserrichtung	3,5	5,0
Abscheren in Faserrichtung	1,8	2,0
Abscheren senkrecht zur Faserrichtung	3,0	4,0

Holzmaste müssen gegen Fäulnis in ihrer ganzen Länge wirksam geschützt sein. Ein- oder mehrmaliger Anstrich ohne Tiefenwirkung gilt nicht als wirksamer Schutz gegen Fäulnis. Alle Schnittflächen der Hölzer und die Schraubenlöcher sind mit Steinkohlenteeröl oder mit einem gleichwertigen Holzschutzmittel zu schützen. Der Nachschutz von getränkten Holzmasten ist nach TGL 2898 durchzuführen. Bei A-Masten müssen die beiden gegeneinander geneigten Maste am oberen Ende durch mindestens einen Hartholzdübel oder eine nachweislich mindestens gleichwertige Ausführung miteinander verbunden werden. In der freien Länge ist mindestens ein eingepaßter Querriegel in der Mindeststärke des Zopfdurchmessers der einzelnen Maste vorzusehen. Maste aus Holz sind im Bild 5.14 dargestellt.

Maste aus Beton

Für die Berechnung und bauliche Durchbildung gelten TGL 0-1045, TGL 0-4227, TGL 11422 und TGL 112-0491. Maste in Freileitungen mit Nennspannungen bis 1000 V und über 1 kV sind für die Lasten, Lastannahmen und Lastkombinationen entsprechend den Festlegungen für Maste aus Stahl zu berechnen. Formänderungsnachweise sind i. allg. nicht zu führen. Für den Vogelschutz sind Löcher mit einem Durchmesser > 23 mm und oben offene Mastschäfte zu verschließen. Betonmaste sind im Bild 5.15 dargestellt.

5.2.3.6. Erdung und Blitzschutz

Teile von Freileitungen bis 1000 V, die im Fehlerfall Spannung führen können, sind in eine Schutzmaßnahme gegen zu hohe Berührungsspannung nach TGL 200-0602 einzubeziehen.
Erdungsanlagen an Masten von Freileitungen über 1 kV haben die Aufgabe, die Berührungs- und/oder Schrittspannungen und die Anzahl von Isolationsüberschlägen infolge Blitzeinschlägen auf zulässige Werte zu begrenzen sowie nicht zum Betriebsstromkreis gehörende Anlagenteile vor Schäden durch Fehlerströme zu schützen. Stahlmaste, leitfähige Teile auf oder im Querträger von Stahlbetonmasten und sonstige Maste aus leitenden Werkstoffen sind zu erden, wenn durchschlagbare Isolatoren eingesetzt werden oder der Maststandort starkem Personenverkehr ausgesetzt ist, z. B. an Schulen, Kindergärten, Sportplätzen, Campingplätzen, Freibädern und verkehrsreichen Straßen. Unter den gleichen Bedingungen sind Gerätteile von Schaltern, Trennern, Transformator-Maststationen, Kondensatoren und anderen elektrotechnischen Betriebsmitteln auf Stahl-, Stahlbeton- und Holzmasten mit geerdeten Isolatorenträgern zu erden. Kabelmäntel, konzentrische Leiter von Kabeln und metallene Endverschlußgehäuse auf Masten sind nach TGL 200-0603/03 sowie TGL 200-0615/03, 04 zu erden. Freileitungen mit Nennspannungen ab 110 kV sind gegen Blitzeinwirkung zu schützen.
Die Erdungsanlagen zum Schutz vor unzulässigen Berührungs- und Schrittspannungen sind nach TGL 200-0603 elektrisch zu bemessen und auszuführen. Bei Maststandorten an Schulen, Kindergärten, Sportplätzen und verkehrsreichen Straßen darf die Schrittspannung bei einer Gesamtausschaltzeit $t_a \leq 0{,}75$ s die höchstzulässige Berührungsspannung nach TGL 200-0603/03 und bei einer Gesamtausschaltzeit $t_a > 0{,}75$ s die Spannung von 90 V nicht überschreiten. In bestimmten Ausnahmefällen sind Maßnahmen wie isolierender Anstrich, isolierender Standort, Einzäunung möglich.
Die Freileitungen sind auf ihrer gesamten Länge vor direkten Blitzeinschlägen in die Hauptleiter durch Erdseile zu schützen. Die Erdseile sind an jedem Mast zu erden und mit den Erdungsanlagen der Schaltanlagen zu verbinden. Die maximal zulässigen Erdungsimpedanzen der Masterder sind Tabelle 5.54 zu entnehmen.

Tabelle 5.54: Maximal zulässige Erdungsimpedanzen von Masterdern

Nennspannung der Freileitung	Erdungsimpedanzen in Ω			
	bei Fundamenterder		bei Fundamenterder mit Zusatzerder	
kV	1 Erdseil	2 Erdseile	1 Erdseil	2 Erdseile
110	20	30	15	25
220	30	40	20	35
380	45	50	40	45

Die Erdungsanlagen sind nach TGL 200-0603/02 thermisch zu bemessen und auszuführen. Die Inbetriebnahmeprüfung von Erdungsanlagen hat durch eine Sichtprüfung und eine elektrische Prüfung nach TGL 200-0603/08 zu erfolgen.

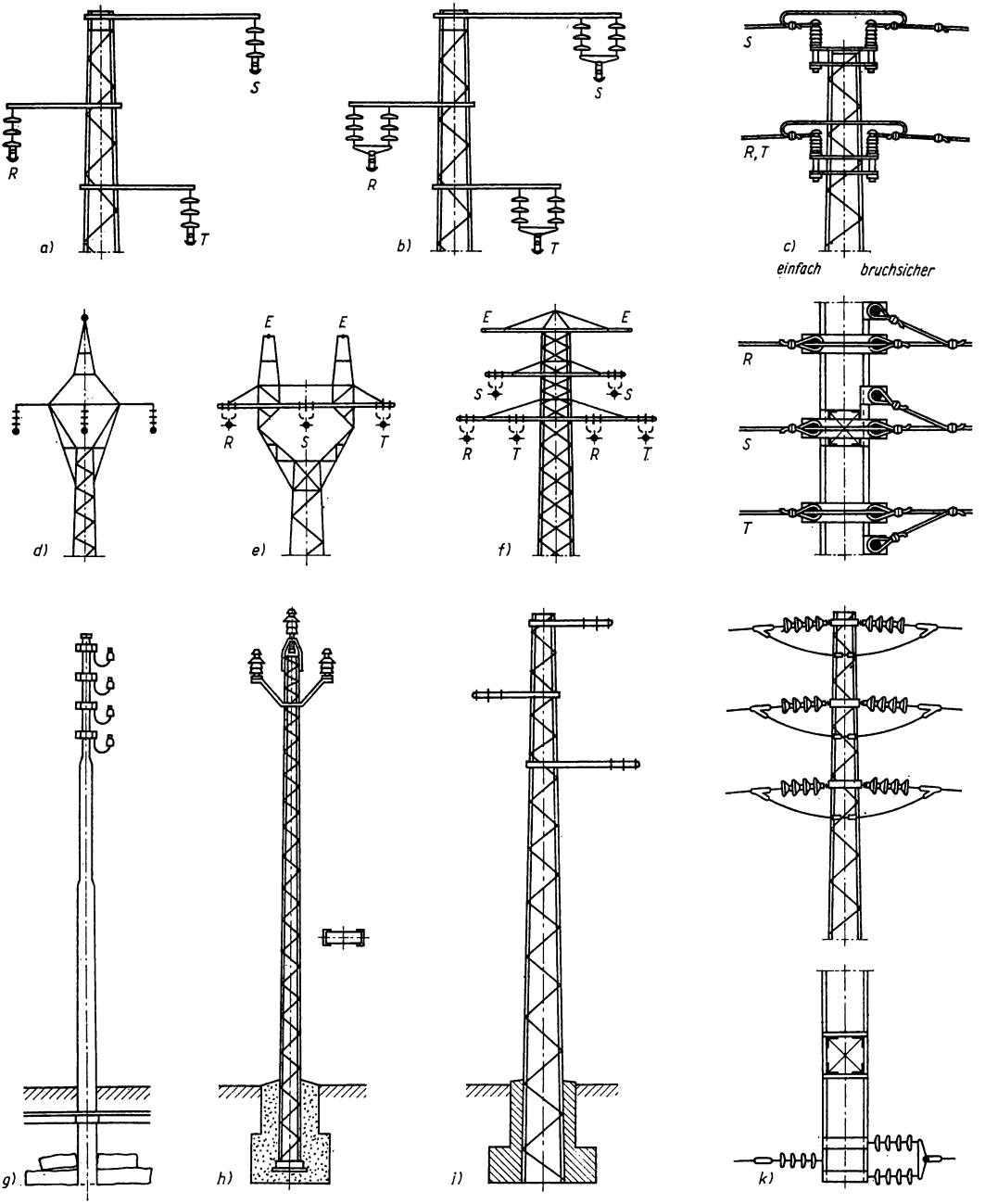


Bild 5.12. Stahlmaste für Einfach- und Doppelleitungen
a) Tragmast für Einfachtragketten, b) Tragmast für Doppeltragketten, c) Abspannung an Stützisolatoren, d) Mastkopf mit einem Erdseil, e) Einfachleitung mit 2 Erdseilen E, f) Doppelleitung mit 2 Erdseilen E (»Donau«-Form), g) Rohrmast, h) U-Stahlmast mit Vogelschutztraversen, i) Hochspannungsabspannmast mit Betonstufenfundament, k) wie i) mit einfacher und bruchsicherer Abspannung

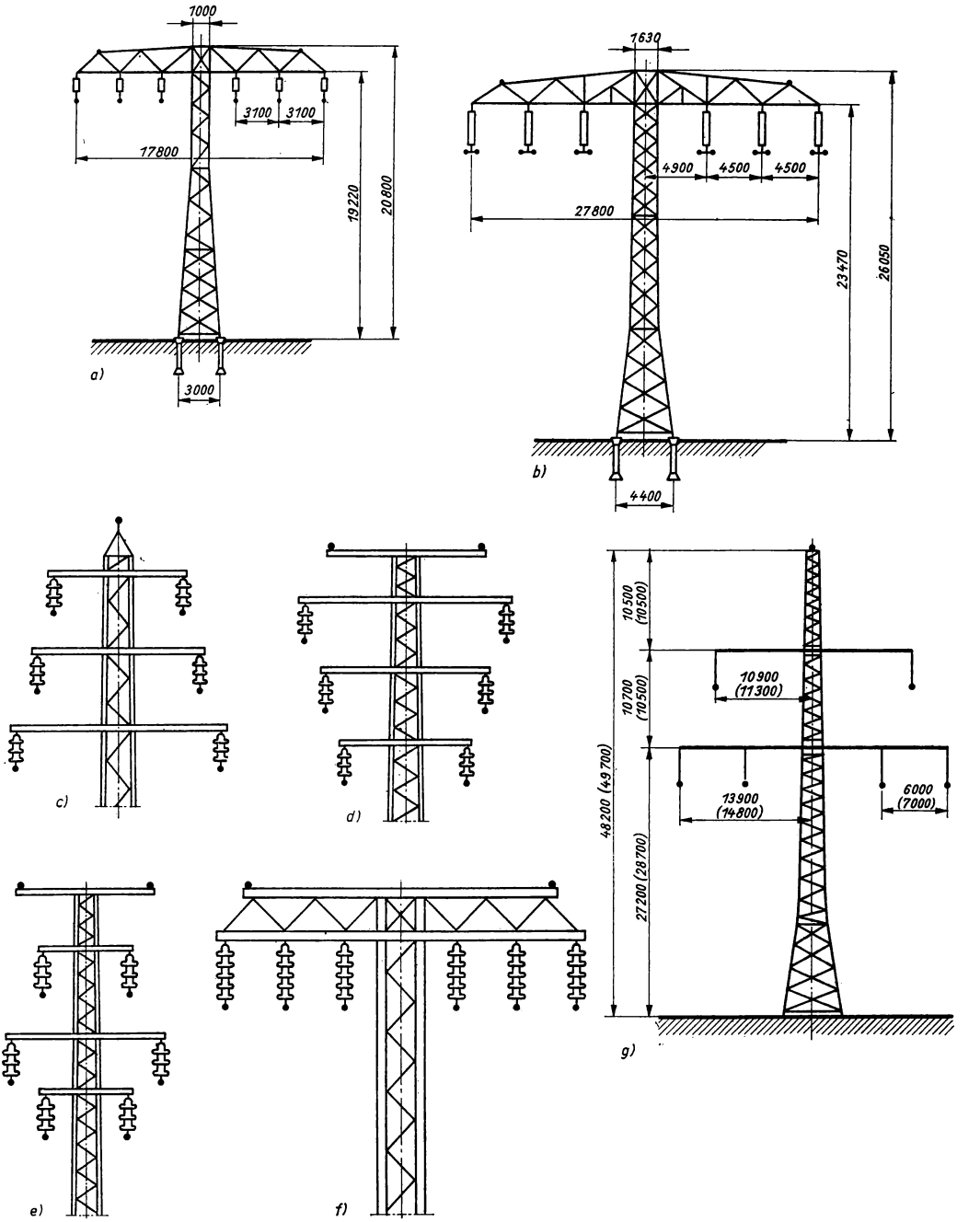


Bild 5.13. Stahlmast mit Einfach- und Doppelleitungen
a) Stahlgittermast 110 kV, b) Stahlgittermast 220 kV, c) Stahlgittermast (Tannenbaumform), d) Stahlgittermast (umgekehrte Tannenbaumform), e) Stahlgittermast (Tonnenform), f) Stahlgittermast (Horizontal-Tragmast), g) Stahlgittermast 400 kV

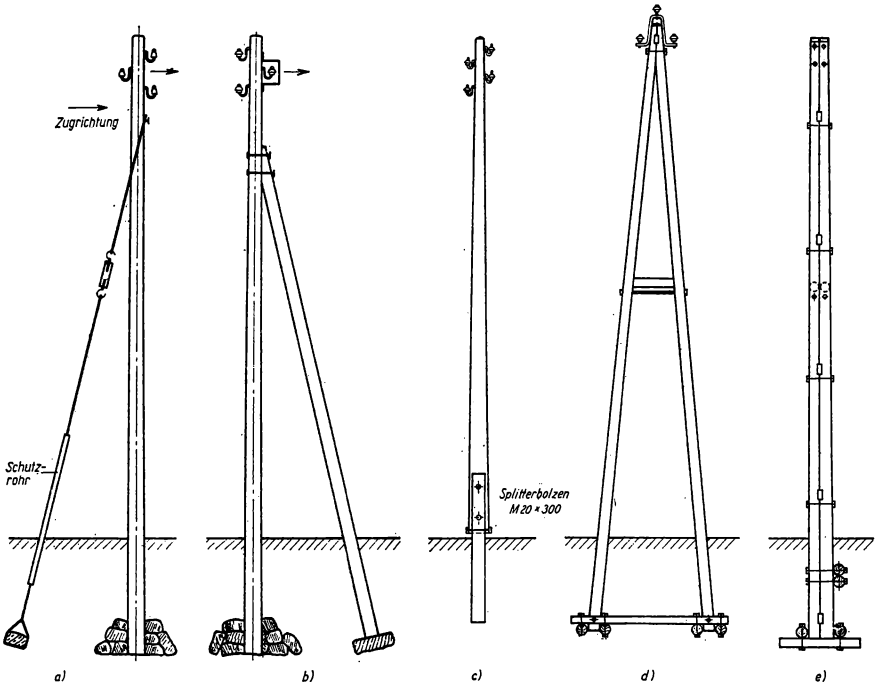


Bild 5.14. Holzmaste
a) mit Anker, b) mit Strebe, c) Tragmast mit Spannbetonfüßen (nach TGL 76-174), d) A-Mast (nach TGL 76-153), e) Doppel-A-Mast (nach TGL 76-156)

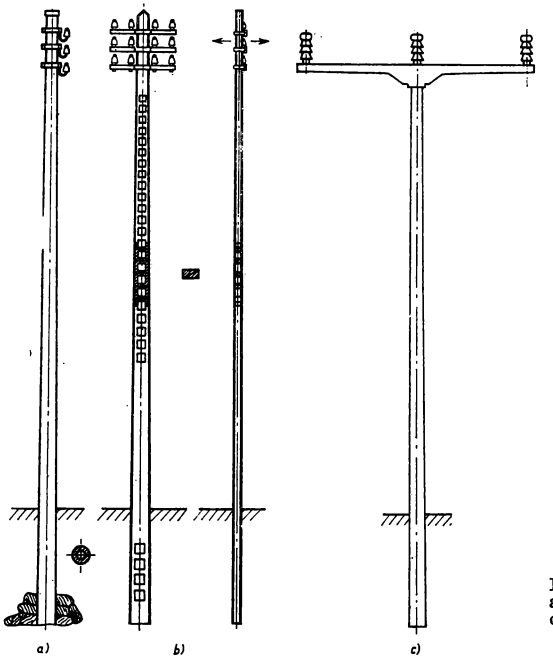


Bild 5.15. Betonmaste
a) aus Schleuderbeton, b) aus Eisenbeton, c) aus Spannbeton, bis 30 kV

Tabelle 5.55: Fahrdrähte für elektrische Bahnen[1])

Querschnitt	Ri			BRi	Ru	Masse[2]) je km	Zugfestigkeit	Höchstzulässige Stromstärke in A für aussetzenden Betrieb bei	
	Abmessungen							100%	40%
	b	*d*	*c*	*h*	*d*			Einschaltdauer	
mm²	mm	mm	mm	mm	mm	kg	MPa		
35	6,0	7,0	3,0	–	6,7	310	400	140	220
50	7,2	8,2	3,3		8,0	445	390	180	280
65	7,6	9 4	3,5		9,1	580	370	220	345
80	8,0	10,6	3,8	4,4	10,1	710	360	250	390
100	8,6	12,0	4,0	7,9	11,3	890	340	295	465
120	8,8	13,2		9,4	12,4	1070	330	340	530
150	9,0	14,8		11,4	13,9	1335	320	415	655

[1]) Werkstoff: Elektrolytkupfer nach TGL 14708
[2]) gerechnet mit 8,9 kg/dm³

5.2.3.7. Fahrdrähte für elektrische Bahnen (nach TGL 0-43141)

Verschiedene Typen von Fahrdrähten sind im Bild 5.16 dargestellt. Abmessungen sind in Tabelle 5.55 enthalten.

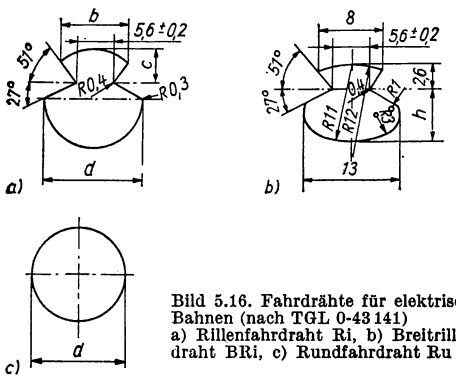
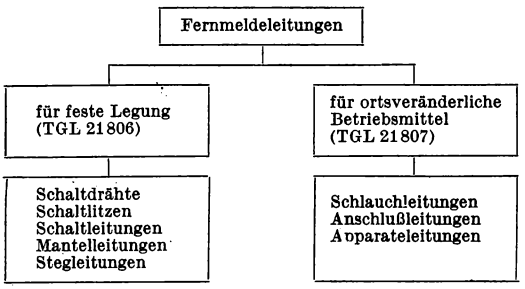


Bild 5.16. Fahrdrähte für elektrische Bahnen (nach TGL 0-43141)
a) Rillenfahrdraht Ri, b) Breitrillenfahrdraht BRi, c) Rundfahrdraht Ru

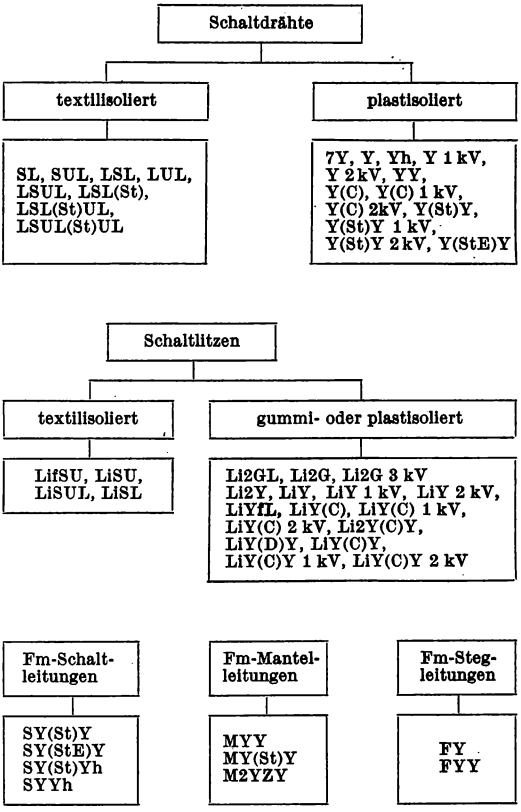
5.2.4. Fernmeldeleitungen

Eine Fernmeldeleitung ist ein Gebilde aus einem oder mehreren isolierten Leitern mit einer oder mehreren Schutzschichten, die jedoch nicht die für die Schutzschichten eines Kabels notwendigen Eigenschaften besitzen. Leitungen sind demzufolge nicht für die Legung im Erdreich und im Wasser geeignet. Es werden unterschieden Fernmeldeleitungen für *feste Legung* und solche für *ortsveränderliche Betriebsmittel*.



5.2.4.1. Fernmeldeleitungen für feste Legung

Entsprechend dem Komplexstandard TGL 21806 werden unterschieden: *Schaltdrähte*, *Schaltlitzen* sowie *Fm-Schalt-*, *Fm-Mantel-* und *Fm-Stegleitungen*.



Die Bedeutung der Kennbuchstaben geht aus Tabelle 5.56 hervor.

Tabelle 5.56: Kennzeichnung der Fernmeldeleitungen für feste Legung

Symbol	Bedeutung
	a) nach Erzeugnisgruppen[1])
S	Kennzeichen der Erzeugnisgruppe Fm-Schaltleitungen
M	Kennzeichen der Erzeugnisgruppe Fm-Mantelleitungen
F	Kennzeichen der Erzeugnisgruppe Fm-Stegleitungen
	b) nach Aufbauelementen
Li	Leiter aus Drahtlitze
S	Umspinnung mit Chemieseide
U	Geflecht aus Chemieseide
L	Lackierung
Y	Isolierhülle oder Mantel aus Polyvinylchlorid-Mischung
2Y	Isolierhülle aus Polyäthylen
(C)	Schirm in Form eines Geflechts aus Cu-Drähten bei einadrigen oder als gemeinsames Geflecht bei mehradrigen Leitungen
(D)	Schirm in Form einer Umspinnung mit Cu-Drähten
(St)	Schirm in Form einer Bewicklung mit Metallfolie bei einadrigen oder einpaarigen Leitungen oder als gemeinsame Bewicklung um den Verseilverband
(StE)	Schirm in Form einer Bewicklung mit Metallfolie um jedes Verseilelement in mehradrigen oder mehrpaarigen Leitungen
Z	Tragorgan mit darunterliegendem Mantel
7Y	Isolierhülle aus Polypropylen
2G	Isolierhülle aus Silikongummi
	c) nach besonderen Eigenschaften
f	besonders flexibel
fl	Adernanordnung parallel nebeneinander
h	erhöhte Spannungsfestigkeit
L	leicht

[1]) Für Schaltdrähte und Schaltlitzen entfällt die Gruppenbezeichnung.

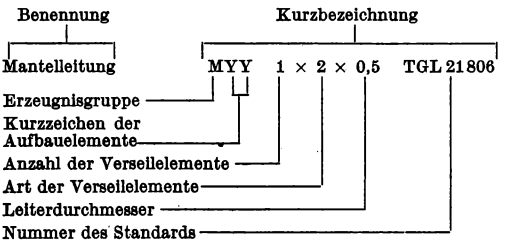
Die Farbkennzeichnung von Fernmeldeleitungen ist in Tabelle 5.57 angegeben.
Die maximalen Widerstände eindrähtiger Leiter sind in Tabelle 5.58 zusammengestellt.
In Tabelle 5.59 sind die maximalen Widerstände von Litzenleitern angegeben.
Um eine Leitung genau zu kennzeichnen, werden außer dem Kurzzeichen der Erzeugnisgruppe noch Angaben über Art und Anzahl der Verseilelemente und über den Leiterdurchmesser gemacht.

Tabelle 5.57: Farbkennzeichnung für Adern

Farbkurzzeichen	Farbkennzeichnung	Farbkurzzeichen	Farbkennzeichnung
ws	weiß	wsbr	weiß-braun
br	braun	virt	violett-rot
gn	grün	rsrt	rosa-rot
ge	gelb	brgn	braun-grün
gr	grau	brge	braun-gelb
rs	rosa	brbl	braun-blau
bl	blau	brsw	braun-schwarz
rt	rot	gnrt	grün-rot
or	orange	gnsw	grün-schwarz
sw	schwarz	gnge[1])	grün-gelb
nf	naturfarben	gert	gelb-rot
vi	violett	gebl	gelb-blau
wsgn	weiß-grün	gesw	gelb-schwarz
wsge	weiß-gelb	blrt	blau-rot
wsbl	weiß-blau	rtsw	rot-schwarz
wssw	weiß-schwarz	grrt	grau-rot
wsrt	weiß-rot	grsw	grau-schwarz

[1]) nur zulässig für Schutzleiter

Die vollständige *Bezeichnung* einer Leitung setzt sich zusammen aus



Die angeführte Bezeichnung charakterisiert eine Mantelleitung (M) mit einer Isolierhülle (Y) und einem Mantel (Y) aus einer Polyvinylchlorid-Mischung, einem Verseilelement, als Paar verseilt, und einem Leiterdurchmesser von 0,5 mm. Die gleiche Systematik beim Aufbau der Bezeichnung gilt mit Ausnahme der Erzeugnisgruppe auch bei Kabeln.

Schaltdrähte

Entsprechend ihrer vorrangigen Bedeutung werden nur *plastisolierte Schaltdrähte* aufgeführt. Sie werden hauptsächlich angewendet als *Rangierleitungen* in Verteilern (darunter sind Haupt-, Zwischen- und Netzverteiler zu verstehen), als *Verbindungsleitungen* in Geräten und als *Installationsleitungen* in Rohren und Kanälen, z. B. bei Unter- und Imputz-Instal-

Tabelle 5.58: Maximaler Widerstand eindrähtiger Leiter bei 20 °C in Ω je km

Leiterdurchmesser Nennmaß mm	Schaltdrähte, ungeschirmt und unverseilt		Schaltdrähte, ungeschirmt und verseilt		Schaltdrähte, geschirmt		Fm-Schaltleitungen Fm-Mantelleitungen Fm-Stegleitungen
	verzinnt	unverzinnt	verzinnt	unverzinnt	verzinnt	unverzinnt	
0,3	256	251	263	258	271	266	266
0,4	—	150	—	152	—	—	—
0,5	92,2	90,4	95,0	93,2	97,8	95,9	95,9
0,7	—	47,4	—	48,0	—	—	48,9
0,8	36,0	35,3	36,7	36,0	37,8	37,1	37,1
1	22,8	22,6	23,2	23,0	23,7	23,5	23,5
1,4	11,6	11,5	11,8	11,7	12,1	12,0	12,0
1,8	7,05	6,98	7,19	7,12	7,33	7,26	7,26

Tabelle 5.59: Maximaler Widerstand von Litzenleitern bei 20 °C in Ω je km

Leiternennquerschnitt	Drahtdurchmesser d_1	Leiterdurchmesser d_2	Leiterwiderstand bei 20 °C je km in Ω Größtwert					
			Schaltlitzen ungeschirmt unverseilt		Schaltlitzen ungeschirmt verseilt		Schaltlitzen geschirmt	
mm²	Nennmaß	Größtmaß	verzinnt	unverzinnt	verzinnt	unverzinnt	verzinnt	unverzinnt
0,02	0,05	0,22	–	977	–	1006	–	1037
0,05	0,05	0,33	–	373	–	387	–	398
0,08	0,12	0,38	268	261	279	271	288	279
0,12	0,15	0,48	155	151	–	–	–	–
0,14[1]	0,05	0,56	–	135	–	139	–	144
0,14	0,1	0,52	142	135	146	139	150	144
0,2	0,2	0,62	87,2	84,8	89,9	67,3	92,6	90,0
0,25	0,15	0,73	77,5	75,4	79,9	77,6	82,3	80,0
0,5[1]	0,05	1,1	–	38,1	–	39,3	–	40,5
0,5	0,2	1,0	38,1	37,1	39,1	38,2	40,5	39,3
0,75	0,2	1,25	25,4	24,7	25,9	25,2	26,4	25,7
1	0,2	1,40	19,0	18,5	19,4	18,9	19,8	19,3
1,5	0,25	1,65	13,0	12,6	13,2	12,9	13,5	13,1

[1]) nur für hochflexible Schaltlitze LifSU

lationen und bei Unterflurinstallationen. Der Leiterwerkstoff ist E-Kupfer; Betriebswechselspannung bis zu 2 kV. Daten von plastisolierten Schaltdrähten sind in Tabelle 5.60 zusammengestellt.

Tabelle 5.60: Daten von plastisolierten Schaltdrähten

Benennung (mit Ergänzung)	Buchstabenkurzzeichen	Aderanzahl	Leiternenndurchmesser mm
Schaltdraht	7Y	1 und 2	0,3
	Y	1···5	0,3···1,8
	Yh	1···5	0,5
	Y 1 kV	1···5	0,5···1
	Y 2 kV	1···5	1
Schaltdraht (mit Mantel)	YY	2···5	0,5···1,8
Schaltdraht (geschirmt)	Y(C)	1···5	0,5···1,8
	Y(C) 1 kV	1···5	0,5···1
	Y(C) 2 kV	1···5	0,5···1
Schaltdraht (geschirmt mit Mantel)	Y(St)Y	1···5	0,5···1,8
	Y(St)Y 1 kV	1···5	0,5···1
	Y(St)Y 2 kV	1···5	1
	Y(STE)Y	2···5	0,5···1,8

Bezeichnung eines Schaltdrahts, plastisoliert Y(St)Y, 2adrig, 1,4 mm Leiterdurchmesser, Farben der Adern blau (bl) und rot (rt):

Schaltdraht Y(St)Y 2 × 1,4 – bl/rt – TGL 21806

Schaltlitzen

Schaltlitzen (s. Tabelle 5.61) finden vorwiegend Anwendung als *Zuführungsleitungen* für Bauteile oder Geräte, die häufig bewegt werden, oder als *Leitung in Formkabeln*, die ebenfalls öfters bewegt werden. Der Leiterwerkstoff ist E-Kupfer; Betriebswechselspannung bis zu 2 kV.

Bezeichnung einer Schaltlitze, plastisoliert, Li(C)Y, einadrig, Leiternennquerschnitt 0,75 mm², Farbe der Ader grün (gn):

Schaltlitze LiY(C) Y 1 × 0,75 mm² – gn – TGL 21806

Tabelle 5.61: Daten von gummi- oder plastisolierten Schaltlitzen

Benennung (mit Ergänzung)	Buchstabenkurzzeichen	Aderanzahl	Leiternennquerschnitt mm²
Schaltlitze (silikongummiisoliert)	Li2GL	1	0,14···1
	Li2G	1	0,14···0,75
	Li2G 3 kV	1	0,5
Schaltlitze (plastisoliert)	Li2Y	1	0,02
	LiY	1···5	0,02···1,5
	LiY 1 kV	1···5	0,02···0,75
	LiY 2 kV	1···5	0,75
Schaltlitze (flach, plastisoliert)	LiYfl	2	0,08 und 0,14
		3 und 4	0,14
Schaltlitze (plastisoliert, geschirmt)	LiY(C)	1···5	0,25···1,5
	Li(C) 1 kV	1···5	0,5···0,75
	LiY(C) 2 kV	1···5	0,75
Schaltlitze (plastisoliert, geschirmt, mit Mantel)	Li2Y(C)Y	1···5	0,14···1
	LiY(D)Y	1···5	0,14···1
	LiY(C)Y	1···5	0,14···1
	LiY(C) 1 kV	1···5	0,5 und 0,75
	LiY(C)Y 2 kV	1···5	0,75

Fm-Schaltleitungen

Fm-Schaltleitungen werden als *Verbindungsleitungen* von Geräten, Einrichtungen, Schränken und Gestellen hauptsächlich *in Fernsprech- und Fernschreibanlagen* verwendet. Da neben je zwei Adern für die niederfrequente Sprach- oder Zeichenübertragung oft auch Signal- und Steueradern benötigt werden, stehen die Schaltleitungen auch mit Verseilelementen zu 3, 4 und 5 Adern zur Verfügung. Der Aufbau einer Fm-Schaltleitung ist im Bild 5.17 dargestellt. Die Verseilelemente sind in konzentrischen Lagen angeordnet (Bild 5.18). Einige Daten verschiedener Fm-Schaltleitungen sind in Tabelle 5.62 sowie Tabelle 5.63 zusammengestellt.

Bezeichnung einer Fm-Schaltleitung SY(St)Y mit 5 Vierern, Leiternenndurchmesser 0,5 mm:

Fm-Schaltleitung SY(St)Y 5 × 4 × 0,5 TGL 21806

Tabelle 5.62: Elektrotechnische Daten von Fm-Schaltleitungen

Leitung	Kennwert
a) Höchstzulässige Betriebsspannung	
SY(St)Y, SY(StE)Y	250 V WS oder 250 · $\sqrt{2}$ V GS
SY(St)Yh, SYYh	600 V WS oder 600 · $\sqrt{2}$ V GS
b) Betriebskapazität des Sprechkreises	
SY(St)Y, SY(St)Yh	max. 120 nF/km
SY(StE)Y	max. 140 nF/km
c) Temperaturbereich	
bei mechanischer Beanspruchung	−5···+50 °C
ohne mechanische Beanspruchung	−40···+70 °C

Tabelle 5.62 (Fortsetzung)

Leitung	Kennwert
d) Isolationswiderstand bei 20 °C	
	mind. 300 MΩ/km
SY(StE)Y	mind. 100 MΩ/km
e) Biegehalbmesser	
Die kleinsten zulässigen Biegehalbmesser betragen	
SY(St)Y	5 d_a
SY(StE)Y	7 d_a
SY(St)Yh	9 d_a
SYYh	4 d_a

Tabelle 5.63: Daten von Fm-Schaltleitungen

Benennung (mit Ergänzung)	Buchstabenkurzzeichen	Anzahl der Verseilelemente	Verseilelement	Leiterdurchmesser d_i mm	Isolierhülle Werkstoff	Isolierhülle Wanddicke s_i mm	Mantel Werkstoff	Mantel Wanddicke s_a mm	Außendurchmesser d_a mm	Masse je 1 km kg
Fm-Schaltleitung	SY(St)Y	3	Paar	0,5	Plast YJ3	0,2	Plast YM1	0,7	6,0	40
		5							6,9	60
		6						0,8	7,8	70
		10							9,7	100
		12							9,7	110
		15							10,6	135
		18							11,1	155
		20							12,0	165
		22						1	13,1	195
		25							14,0	210
		30							14,3	240
		32							14,5	260
		40							16,3	300
		50							18,2	370
		5	Dreier					0,7	7,7	80
		10						0,8	10,5	130
		11							10,6	140
		15							11,6	180
		18							12,3	210
		20							12,7	220
		25						1	15,0	290
		1	Vierer					0,7	5,0	30
		5							8,3	95
		10						0,8	11,6	165
		20						1	15,0	290
		25							16,7	370
		5	Fünfer					0,8	9,6	115
		10							13,0	200
Fm-Schaltleitung (mit geschirmten Paaren)	SY(StE)Y	2	Paar			0,4		0,8	10,0	95
		5						1	12,3	150
		6							13,7	190
		10							17,0	250
		12							18,5	280
		20							20,7	430
Fm-Schaltleitung (mit erhöhter Spannungsfestigkeit)	SY(St)Yh	5	Paar					0,8	9,5	90
		10						1	12,6	140
		20							15,6	250
		50						1,2	24,0	550
		75							28,0	770
		100							33,0	1030
		150						1,4	39,0	1450
Fm-Schaltleitung (für Signalzwecke)	SYYh	4	Fünfer	0,8		0,4		1,4	15,5	250
				1		0,5			17,5	330
		5		0,8		0,4			16,0	300
				1		0,5			20,0	400
		6		0,8		0,4			17,5	340
				1		0,5			21,0	460

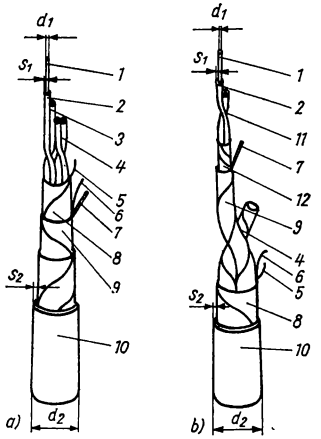


Bild 5.17. Fm-Schaltleitung
a) SY(St)Y, b) SY(StE)Y
1 Leiter, 2 Isolierhülle, 3 Verseilelement, 4 Verseilverband, 5 Kennfaden, 6 Reißfaden, 7 Beidraht, 8 Bewicklung des Verseilverbandes, 9 Schirm, 10 Mantel, 11 Paar, 12 Bewicklung des Paares

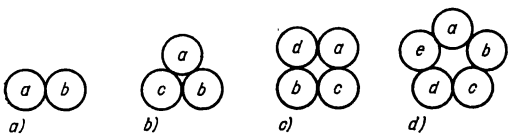


Bild 5.18. Verseilung bei Fm-Schaltleitung
a) Paar, b) Dreier, c) Vierer, d) Fünfer

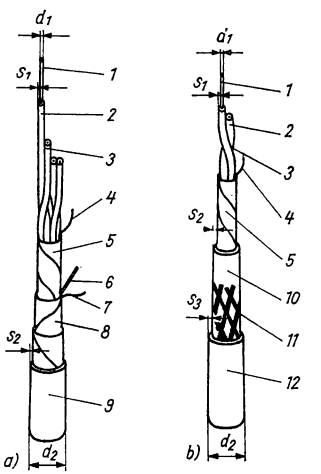


Bild 5.19. Fm-Mantelleitung
a) MY(St)Y, b) M2YZY
1 Leiter, 2 Isolierhülle, 3 Verseilelement, 4 Kennfaden, 5 Bewicklung des Verseilverbandes, 6 Beidraht, 7 Reißfaden, 8 Schirm, 9 Mantel, 10 Innenmantel, 11 Tragorgan, 12 Außenmantel

Fm-Mantelleitung

Fm-Mantelleitungen werden in *Fernsprech-Leitungsnetzen* und in allen *niederfrequent betriebenen Netzen* verwendet. Sie können außer bei der Unterputz-Installation bei allen Installationsarten in Gebäuden sowie bei der sog. Luftkabel-Installation verwendet werden. Für Installationen mit selbsttragenden Leitungen ist die Fm-Mantelleitung M2YZY vorgesehen. Diese Leitung ist mit einem Tragorgan versehen, das aus einem Geflecht mit flachen verzinkten Stahldrähten besteht. Die Adern sind zu Paaren verseilt; bei zweipaarigen Leitungen sind die vier Adern zu einem Sternvierer verseilt (Bild 5.19).
Daten sind in den Tabellen 5.64 und 5.65 enthalten.

Tabelle 5.64: Elektrotechnische Daten von Fm-Mantelleitungen

Leitung	Kennwerte
a) Höchstzulässige Betriebsspannung	
MYY, MY(St)Y, M2YZY	250 V WS oder $250 \cdot \sqrt{2}$ V GS
b) Betriebskapazität bei 800 Hz	
MYY, MY(St)Y	160 nF/km bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm
	120 nF/km bei Leiternenndurchmesser 0,7 mm
M2YZY	60 nF/km bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm
	80 nF/km bei Leiternenndurchmesser 0,7 mm
c) Temperaturbereich	
bei mechanischer Beanspruchung	−5···+50 °C
ohne mechanische Beanspruchung	−40···+70 °C
d) Isolationswiderstand bei 20 °C	
bei MYY, MY(St)Y	mind. 200 MΩ/km
bei M2YZY	mind. 5000 MΩ/km
e) Leitungsdämpfung für 1 km *bei* 800 Hz	
MY(St)Y	1,9 dB bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm
	1,4 dB bei Leiternenndurchmesser 0,7 mm
M2YZY	1,2 dB bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm
	1,04 dB bei Leiternenndurchmesser 0,7 mm

Bezeichnung einer Fm-Mantelleitung MY(St)Y mit 12 Paaren, Leiterdurchmesser 0,5 mm:
Fm-Mantelleitung MY(St)Y 12 × 2 × 0,5 TGL 21806.

Fm-Stegleitungen

Fm-Stegleitungen finden bei *Imputz-Installationen für niederfrequente Anlagen* Anwendung.
Die Leiter liegen bei FY parallel nebeneinander und sind von der Isolierhülle umgeben und mit ihr durch einen stegartigen Übergang verbunden. Bei FYY, in der Ausführung mit 2 Verseilelementen, sind die Adern zu einem Dreier (a-Ader, b-Ader und c-Ader) und zu einem Paar (a-Ader und b-Ader) verseilt. In der Ausführung mit 3 Verseilelementen sind die Adern zu einem Dreier und zu 2 Paaren verseilt. Die Verseilelemente (Dreier und Paare) liegen parallel nebeneinander und werden von der gemeinsamen Aderumhüllung umgeben.
Daten sind in den Tabellen 5.66 und 5.67 angegeben.

Bezeichnung einer FM-Stegleitung FYY, Leiterdurchmesser 0,5 mm mit einem Dreier und 2 Paaren:
Fm-Stegleitung FYY2 × 2 × 0,5 + 1 × 3 × 0,5 TGL 21806

Tabelle 5.65: Daten von Fm-Mantelleitungen

Benennung (mit Ergänzung)	Buchstabenkurzzeichen	Anzahl der Paare	Leiternenndurchmesser d_1 mm	Mantel Nennwanddicke s_3 bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm	0,7 mm	Außendurchmesser d_a bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm	0,7 mm	Masse je km bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm	0,7 mm
				mm	mm	Größtmaß in mm		kg	kg
Fm-Mantelleitung	MYY	1			0,6	4,1	4,9	20	25
		2				4,6	5,6	25	38
		3		0,6		5,8	7,5	35	54
		4			0,7	6,2	8,3	45	70
		5				6,9	9,0	55	86
		6				7,5	9,7	70	103
		8						80	118
		10	0,5 oder	0,7	0,8	9,4	12,3	95	154
Fm-Mantelleitung (geschirmt)	MY(St)Y	1	0,7		0,6	4,8	5,6	25	30
		2		0,6		5,3	6,2	30	44
		3			0,7	6,5	8,1	45	65
		4				6,9	8,8	50	75
		5				7,5	9,4	60	95
		6				8,0	10,1	75	112
		8						85	128
		10			0,8	9,8	12,7	105	166
		12				10,1	13,1	120	190
		14		0,7		10,6	13,9	135	215
		16				11,1	14,9	150	242
		20		———	0,9	11,7	15,5	175	292
		24				13,5	17,8	215	348
		30		0,8	1,1	14,2	19,3	250	440
		40				15,1	20,7	310	556
		50		0,9	1,2	17,6	24,2	390	685
		60			1,3	18,8	25,9	450	832
		80		1,1	1,4	21,5	29,4	580	1083
		100			1,6	24,4	33,4	710	1355
Fm-Mantelleitung (mit Zugentlastung)	M2YZY	1				8,5	8,9	85	95
		2	0,5	1,2	1,2	9,1	9,9	95	120
		3	oder			11,6	12,3	125	190
		4	0,7			12,8	13,1	170	210
		5				12,9	14,2	190	250
		6		———		13,8	14,8	200	310
		8				14,2	14,8	220	330
		10				16,5	17,4	280	390
		12		1,4	1,4	16,5	17,8	300	420
		14				17,0	18,9	320	490
		16				17,7	19,9	350	530
		20				18,4	20,7	380	590

Tabelle 5.66: Elektrotechnische Daten von Fm-Stegleitungen

Leitungen	Kennwerte
a) Höchstzulässige Betriebsspannung	200 V WS oder 200 $\sqrt{2}$ V $_{GS}$
b) Isolationswiderstand bei 20 °C	mind. 200 MΩ/km
c) Temperaturbereich	
bei mechanischer Beanspruchung	−5···+50 °C
ohne mechanische Beanspruchung	−40···+70 °C
d) Betriebskapazität bei 800 Hz	
	160 nF/km bei Leiternenndurchmesser 0,5 mm
	120 nF/km bei Leiternenndurchmesser 0,7 mm

5.2.4.2. Fernmeldeleitungen für ortsveränderliche Betriebsmittel

Entsprechend dem Komplexstandard TGL 21807 werden unterschieden:

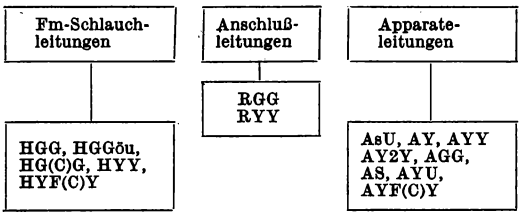


Tabelle 5.67: Sortiment Fm-Stegleitungen

Benennung	Buchstabenkurzzeichen	Anzahl und Art der Verseilelemente	Leiterdurchmesser	Außenabmessungen Breite Größtmaß	Außenabmessungen Tiefe Größtmaß	Masse je km
			mm	mm	mm	kg
Fm-Stegleitung	FY	2 Adern	0,5	5,8	2,0	19
			0,7	7,8	2,7	28
	FYY	1 Paar	0,5	10,0	4,0	46
		1 Dreier	0,7	13,7	5,7	85
		2 Paare	0,5	16,2	4,0	73
		1 Dreier	0,7	22,5	5,7	128

Die Bedeutung der Kennbuchstaben geht aus Tabelle 5.68 hervor.

Tabelle 5.68: Kennzeichnung der Fernmeldeleitungen für ortsveränderliche Betriebsmittel

Symbol	Bedeutung
a) nach Erzeugnisgruppen	
H	Kennzeichen der Erzeugnisgruppe Fm-Schlauchleitungen
R	Kennzeichen der Erzeugnisgruppe Anschlußleitungen
A	Kennzeichen der Erzeugnisgruppe Apparateleitungen
b) nach Aufbauelementen	
G	Isolierhülle oder Mantel aus Gummimischung
Y	Isolierhülle oder Mantel aus Polyvinylchlorid-Mischung
S	Isolierhülle aus Umspinnung und Geflecht aus Chemieseide
U	Außengeflecht der Leitung
F	Bewicklung des Verseilverbands mit Isolierfolie bei plastisolierten Leitungen
(C	Schirm in Form eines Geflechts bei einadrigen oder einpaarigen Leitungen oder als gemeinsames Schirmgeflecht bei mehradrigen oder mehrpaarigen Leitungen
(CE)	Schirm in Form eines Geflechts bei Schirmung einzelner Adern oder Paare in mehradrigen oder mehrpaarigen Leitungen
2Y	Mantel aus Polyäthylen
c) nach besonderen Eigenschaften	
u	flammwidrig
ö	ölbeständig

Fm-Schlauchleitungen

Fm-Schlauchleitungen werden zum *Anschluß ortsveränderlicher Geräte* der Informationstechnik vorwiegend *bei starker mechanischer Beanspruchung* sowohl in trockenen als auch in feuchten und chemisch gefährdeten Räumen und im Freien verwendet (Daten in Tabelle 5.69).

Bezeichnung einer Fm-Gummischlauchleitung, geschirmt, HG(C)G, 5adrig, 0,5 mm² Leiterquerschnitt, Mantelfarbe grau:

Fm-Gummischlauchleitung
HG(C)G 5 × 1 × 0,5 mm² gr TGL 21807

Anschlußleitungen

Anschlußleitungen werden vorwiegend zum Anschluß ortsveränderlicher Geräte der Informationstechnik bei geringer bzw. mittlerer mechanischer Beanspruchung sowohl in trockenen als auch in feuchten und chemisch gefährdeten Räumen und im Freien verwendet. Daten sind in Tabelle 5.70 enthalten.

Tabelle 5.69: Daten von Fm-Schlauchleitungen

Buchstabenkurzzeichen	Anzahl der Adern	Anzahl der Paare	Leiterquerschnitt mm²
HGG	1, 2,	2, 3,	0,25
HG(C)G	3, 4,	4, 5,	0,5
HGGöu	5, 7,	7, 8,	0,75
	8, 10,	10,	1,0
	12,	12,	1,5
	14,	14,	2,5
	16	16	
HYY	1, 2,	2, 3,	0,12
HYF(C)Y	3, 4,	4, 5,	0,14
	5, 7,	7, 8,	0,25
	8, 10,	10, 12,	0,5
	12,	14,	0,75
	14,	16,	1,0
	16,	19,	1,5
	19,	24,	
	21,	30	
	24,		
	30,		
	32		

Tabelle 5.70: Daten von Anschlußleitungen

Buchstabenkurzzeichen	Anzahl der Adern	Anzahl der Paare	Leiterquerschnitt mm²
RYY	2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	—	0,14
		5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19, 22, 25, 28, 30, 36, 40, 44, 50	0,08
RGG	2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	—	0,14

Bezeichnung einer Gummianschlußleitung, 6adrig, 0,14 mm² Leiterquerschnitt, Mantelfarbe schwarz:

Gummianschlußleitung RGG 6 × 1 × 0,14 mm² — TGL 21807

Apparateleitungen

Apparateleitungen werden z. B. als Verbindungsleitungen zwischen Fernsprechtischapparat und Handapparat, als Hebdrehwählerleitungen und als Meßschnüre verwendet.
Daten sind in Tabelle 5.71 enthalten.

Tabelle 5.71: Daten von Apparateleitungen

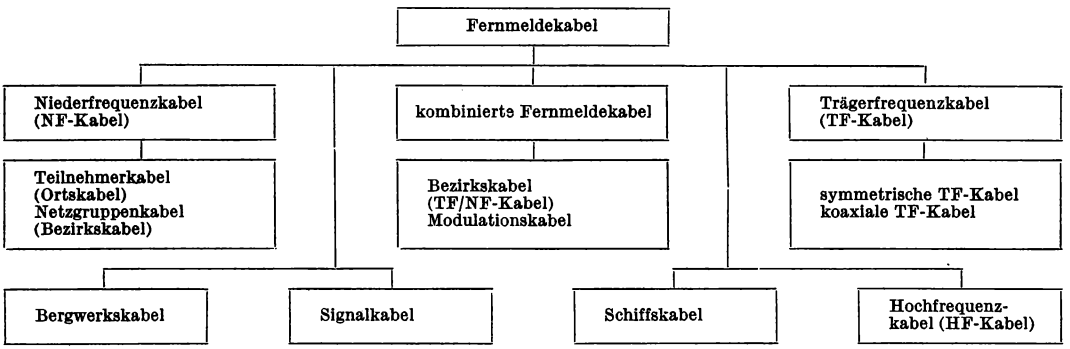
Benennung (mit Ergänzung)	Buchstaben-kurzzeichen	Ader-anzahl	Leiternenn-querschnitt mm²
Leichte Apparateleitung	ASU	2, 3, 4, 5, 6	0,04
Leichte Plast-apparateleitung	AY	1, 2, 3	0,018 und 0,04
Plastapparate-leitung	AYY	2, 3, 4, 5, 6, 10	0,04
Plastapparate-leitung (geschirmt)	AYF(C)Y	6	0,04
Plastapparate-leitung (mit Tragorgan)	AYY	4, 5, 6	0,04
Gummiapparate-leitung	AGG	2, 3, 4, 5, 6	0,12
Hebdrehwähler-leitung	AS	3, 4, 5	0,12
Stöpselleitung	AYU	2, 3, 4, 6	0,12

Bezeichnung einer leichten Plastapparateleitung, 2adrig, 0,018 mm² Leiterquerschnitt, Farbe der Isolierhülle elfenbein:
Leichte Plastapparateleitung
AY 2 × 1 × 0,018 mm² — el — TGL 21807

Tabelle 5.72: Kennzeichnung der Fernmeldekabel

Symbol	Bedeutung
P	trockene Papierisolierung
Mz	Kabelmantel aus Blei mit Erhärtungszusatz
Mzv	Kabelmantel aus Blei mit Erhärtungszusatz, verstärkt
L	Kabelmantel aus Aluminium, glatt
Lv	Kabelmantel aus Aluminium, glatt und verstärkt
LD	Kabelmantel aus Aluminium, gewellt
E	erhöhter Korrosionsschutz
i	festgelegter Reduktionsfaktor von Kabelmantel und Bewehrung
2Y	Isolierhülle oder Mantel aus Polyäthylen (PE)
3Y	Isolierung aus Polystyrol
b	Bewehrung aus Stahlband bzw. Stahlrunddraht
r	Bewehrung aus verzinktem Stahlrunddraht
c	äußere bzw. mittlere Schutzhülle
Y	PVC-Schutzhülle
–K	zusätzlicher Korrosionsschutz
*n*L	Lacküberzug der Leiter (*n* gibt die Anzahl der Verseilelemente an, deren Leiter einen Lacküberzug haben)
(MF)	Schirm aus Metallfolie
(K)	geriffelter Kupfermantel
R	elektrostatisch geschirmtes Rundfunkpaar
St	Sternverseilung mit Phantomausnutzung (Netzgruppenkabel)
St I	Sternverseilung ohne Phantomausnutzung (Netzgruppenkabel)
ST III	Sternverseilung ohne Phantomausnutzung (Fernsprechanschluß-/Ortskabel)
KfL	Korrosionsschutz, flammwidrig
TF*x*	Sternverseilung mit Trägerfrequenzausnutzung (*x* gibt die Anzahl der Verseilelemente an, deren Leiter einen Lacküberzug haben)
Pi	imprägnierte Papierisolierung
FM	Schiffsfernsprechkabel
K	gummiisoliertes Kabel mit Bleimantel und Bewehrung
KO	gummiisoliertes Kabel ohne Bleimantel und Bewehrung

5.2.5. Fernmeldekabel



Ein Fernmeldekabel ist ein einadriges oder mehradriges Gebilde mit einer oder mehreren Schutzschichten sowie einem zusätzlichen Feuchtigkeitsschutz, der eine Legung des Kabels in Kabelgräben, Kabelformsteinen oder Kabelkanälen zuläßt.
Kabelarten sind in der obigen Übersicht angegeben.
Die Kurzzeichen der Fernmeldekabel sind in Tabelle 5.72 aufgeführt.

5.2.5.1. Niederfrequenzkabel (NF-Kabel)

Niederfrequenzkabel (NF-Kabel) werden unterschieden in *Fernsprechanschlußkabel* (Teilnehmerkabel) und in *Netzgruppenkabel* (Kabel für größere Entfernungen). Die Anzahl der Doppeladern liegt bei Fernsprechanschlußkabeln zwischen 6 und 1400 bei Leiterdurchmessern von 0,5; 0,6 und 0,8 mm. Bei Netzgruppenkabeln liegt die Anzahl der Doppeladern zwischen 10 und 200, der Leiterdurchmesser beträgt 0,9; 1,2 und 1,4 mm.
NF-Kabel werden im Niederfrequenzbereich zur *Übertragung von Sprach- und Zeichenströmen* in der Fernsprech- und Fernschreibtechnik verwendet. Die unbespulten Fernsprechanschlußkabel finden vorwiegend in Ortsnetzen Anwendung zur Verbindung der Teilnehmerstellen mit den Zentraleinrichtungen und z. B. in Industrieobjekten zur Verbindung der Fernsprech- und Fernschreibeinrichtungen mehrerer Gebäude.
Die einzelnen Leiter sind *hohlraumisoliert*, d. h., sie sind mit einer Papier- oder Textilkordel in Form einer Wendel mit großer Steigung und darüber in entgegengesetzter Richtung mit Papierband umwickelt, wodurch Luft eingeschlossen wird. Das *Papierband* ist bei Fernsprechanschlußkabeln mit blauen oder violetten Querstreifen in für die a- und b-Ader unter-

schiedlichen Abständen bedruckt. Bei Netzgruppenkabeln ist das Papierband (Isolierhülle) zur Kennzeichnung der Adern mit farbigen Längsstreifen versehen. Je vier dieser Adern sind zu einem *Sternvierer* (Bezeichnung St, St III) und die Sternvierer in konzentrischen Lagen zu einem *Verseilverband* zusammengefaßt, der mit mehreren Papierlagen umwickelt ist. Über diese Papierlagen ist als *Schutzhülle* ein nahtloser Bleimantel mit Erhärtungszusatz aus Antimon thermo-hydraulisch oder ein Mantel aus Aluminium aufgebracht. Wird das Kabel weder in Kanäle (Kabelformsteine) noch als Luftkabel gelegt, sondern direkt im Erdreich, dann wird es außerdem mit einer Stahlbandbewehrung und einer äußeren Schutzhülle aus getränktem Werggrobgarn versehen, z. B. Kabel PMzbc. Zur Legung in Gewässern bestimmte Kabel werden mit einer weiteren Armierung aus Runddraht und einer wie vorangegebenen äußeren Schutzhülle versehen, z. B. Kabel PMzbcbc.
Auf Grund der Entwicklung der Plastchemie gewinnt die Anwendung von *Plast* als Isolierstoff bei der Kabelherstellung immer mehr an Bedeutung. Speziell Polyäthylen (PE) bringt bei Verwendung als Adern-Isolierhülle und als Mantel bei Fernsprechanschlußkabeln eine Reihe technischer und ökonomischer *Vorteile*. Gegenüber den Bleikabeln mit Hohlraumisolierung sind das u. a.: Verminderung der Kabelmasse, je nach Konstruktion ca. 30···50%, somit ist die Legung in größeren Längen möglich; polyäthylenisolierte Adern sind gegenüber Feuchtigkeit unempfindlich; der Mantel bedarf keines Korrosionsschutzes, ist glatt und biegsam; geringe Wasserdampfdurchlässigkeit, beschädigte Stellen des Kabelmantels bewirken keine Störungen.
Die PE-isolierten Leiter aus E-Kupfer werden zu Sternvierern verseilt, und zwar je vier Adern, wobei zwei diametral gegenüberliegende Adern einen Sprechkreis bilden. Die Adernkennzeichnung erfolgt durch unterschiedliche Färbung der Isolierhülle. Je nach Anwendung stehen Kabel mit einem Plastmantel und Kabel mit zwei Plastmänteln (sog. Zweimantelkabel) für stärkere mechanische Beanspruchungen zur Verfügung.

Tabelle 5.73: Farbkennzeichnung der Fernmeldekabel[1])

Leitung	Aderkennzeichnung
Vierer 1 jeder Lage	
Stammleitung I	a-Ader gelb b-Ader rot
Stammleitung II	a-Ader grün b-Ader blau
Vierer 2 jeder Lage	
Stammleitung I	a-Ader gelb b-Ader braun
Stammleitung II	a-Ader grün b-Ader blau
Vierer 3 jeder Lage	
Stammleitung I	a-Ader gelb b-Ader weiß
Stammleitung II	a-Ader grün b-Ader blau

[1]) Die weiteren Vierer in jeder Lage sind abwechselnd wie Vierer 2 und 3 gekennzeichnet.

Fernsprechanschlußkabel 2Y(MF)2Y

Aufbau: Leiter aus E-Kupfer mit Durchmesser von 0,5 mm und 0,8 mm. Die Aderisolierhülle besteht aus Hochdruck-Polyäthylen (PE). Je vier Adern sind zu einem Sternvierer verseilt. Je zwei diametral gegenüberliegende Adern bilden einen Sprechkreis.
Die Adernkennzeichnung erfolgt durch unterschiedliche Farbgestaltung der Isolierhüllen (Tabelle 5.73).
Bei Kabeln mit mehr als 5 Vierern ist ein und bei Kabeln mit mehr als 50 Vierern sind zwei Prüfleiter vorhanden.
Daten zur Verseilung sind in Tabelle 5.74 angegeben.

Tabelle 5.74: Verseilung

Anzahl der		Anzahl der Vierer in Lage											
Vierer	Doppeladern	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	6	3											
5	10	5											
10	20	2	8										
15	30	5	10										
25	50	3	8	14									
35	70	1	6	12	17								
50	100	4	10	15	21								
75	150	4	10	15	21	26							
100	200	2	8	14	20	36	31						
125	250	1	6	12	18	24	30	35					
150	300	4	10	16	22	28	33	39					
200	400	4	10	16	22	28	34	41	47				
250	500	4	10	16	22	28	34	40	46	52			
300	600	3	9	15	21	27	33	39	45	52	59		
350	700	2	8	14	20	26	32	38	44	50	63		
400	800	1	6	12	18	24	31	37	43	49	55	61	67

Die Bewicklung des Verseilverbands besteht aus mehreren Lagen Spezialpapier. Darüber ist ein Schirm aus Aluminium-Folie aufgebracht, unter dem sich ein Beidraht aus verzinntem Kupfer befindet. Über dieser Alu-Folie ist der Mantel aus rußstabilisiertem Hochdruck-Polyäthylen aufgebracht (Bild 5.20). Daten sind in den Tabellen 5.75 und 5.76 enthalten.

Tabelle 5.75: Elektrotechnische Daten von Fernsprechanschlußkabeln 2Y(MF)2Y

Größe	Kennwerte
Isolationswiderstand bei 20 °C für 1 km	mindestens 10000 Ω
Temperaturbereich beim Legen	−8···+50 °C
vor und nach dem Legen	−40···+60 °C
Betriebskapazität (Stammleitung)	≦ 39 nF/km
Leiterwiderstand je Leitungsschleife	
bei Leiterdurchmesser 0,5 mm	≦ 190 Ω/km
bei Leiterdurchmesser 0,8 mm	≦ 73,2 Ω/km
Biegeradius	$20d_a$

Bezeichnung eines Fernsprechanschlußkabels (St III), plastisoliert, 2Y(MF)2Y mit 50 Doppeladern in Viererverseilung (25 × 4). Leiterdurchmesser 0,8 mm:
NF-Kabel 2Y(MF)2Y 25 × 4 × 0,8
St III TGL 200-1708

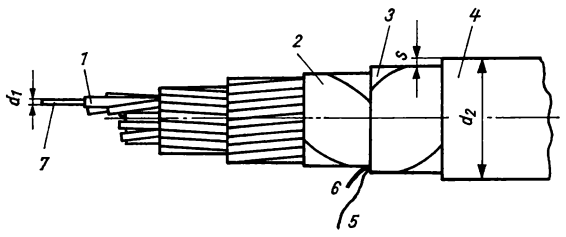


Bild 5.20. Fernsprechanschlußkabel 2Y(MF)2Y, plastisoliert
1 Isolierhülle, 2 Bewicklung des Verseilverbands, 3 Schirm, 4 Mantel, 5 Kennfaden, 6 Beidraht, 7 Leiter

Tabelle 5.76: Abmessungen von Fernsprechanschlußkabeln 2Y(MF)2Y

Anzahl der Vierer	Anzahl der Doppeladern	Leiterdurchmesser d_1 mm	Wanddicke s des Mantels mm	Außendurchmesser d_2 mm	Masse je 1 km kg
3	6	0,5	2	13,5	145
5	10			15	185
10	20			18	260
15	30			20	335
25	50			24	470
35	70			26	600
50	100			29	780
75	150		2,5	35	1150
100	200			39	1450
125	250			42	1740
150	300			45,5	2060
200	400		3	51,5	2700
250	500			57	3270
300	600			63	3890
350	700		3,5	69	4525
400	800			71	5100
500	1000			79	6300
3	6	0,8	2	18	225
5	10			20	305
10	20			25	475
15	30			28	630
25	50			33	925
35	70		2,5	38	1265
50	100			43	1735
75	150			51	2460
100	200		3	58	3245
125	250			62	3930
150	300			68	4750
200	400		3,5	76	6130

Fernsprechanschlußkabel 2Y2Y(K)2Y und 2Y2Y(K)Y

Der *Aufbau* ist mit dem Aufbau des Fernsprechanschlußkabels 2Y(MF)2Y bis zur Bewicklung des Verseilverbands identisch. Darüber befindet sich der Innenmantel aus Hochdruck-Polyäthylen. Auf diesem Innenmantel ist ein Schirm aus gewelltem Kupferband in Längsrichtung zur Kabelachse aufgebracht. Darüber befindet sich der Außenmantel aus PVC oder PE. Für den Temperaturbereich gelten die in Tabelle 5.77 angeführten Werte. Übrige elektrische Kennwerte wie beim Fernsprechanschlußkabel 2Y(MF)2Y. Abmessungen sind in Tabelle 5.78 angegeben.

Tabelle 5.77: Temperaturbereiche

Kabel		Temperaturbereich
2Y2Y(K)2Y	beim Legen	−8 °C···+50 °C
	vor und nach dem Legen	−40 °C···+60 °C
2Y2Y(K)Y	beim Legen	−4 °C···+50 °C
	vor und nach dem Legen	−30 °C···+60 °C

Bezeichnung eines Fernsprechanschlußkabels (St III), plastisoliert, 2Y2Y(K)2Y 50 Doppeladern in Viererverseilung (25 × 4), Leiterdurchmesser 0,8 mm:

NF-Kabel 2Y2Y(K)2Y 25 × 4 × 0,8
St III TGL 200-1708

5.2.5.2. Trägerfrequenzkabel (TF-Kabel)

Für große Entfernungen (Weitverkehr) und für hohe Verkehrsdichte, d. h. eine große Anzahl von Gesprächen, sind Niederfrequenzkabel unökonomisch. Für diese Zwecke und für die Übertragung von Rundfunk- und Fernsehsignalen werden Trägerfrequenzkabel (TF-Kabel) vorgesehen.

Tabelle 5.78: Abmessungen von Fernsprechanschlußkabeln 2Y2Y(K)2Y und 2Y2Y(K)Y

Anzahl der Vierer	Anzahl der Doppeladern	Leiterdurchmesser mm	Wanddicke des Innenmantels mm	Wanddicke des Außenmantels mm	Außendurchmesser mm	Masse je 1 km für 2Y2Y(K)2Y kg	Masse je 1 km für 2Y2Y(K)Y kg
3	6	0,5	1,5	1,8	16	250	285
5	10				17	280	315
10	20				20	390	430
15	30				22	480	530
25	50				26	640	690
35	70			2	28	800	870
50	100				32	1010	1090
75	150				38	1400	1500
100	200			2,2	42	1740	1855
125	250				45	2060	2180
150	300			2,6	49	2450	2600
200	400				54	3080	3250
250	500		1,6		60	3780	3990
300	600			3	65	4420	4650
350	700		1,8		71	5130	5410
400	800				73	5740	6030
3	6	0,8	1,5	1,8	19	320	360
5	10				21	425	470
10	20				26	630	690
15	30			2,0	29	830	900
25	50				34	1175	1260
35	70			2,2	38	1500	1600
50	100				44	2020	2140
75	150			2,6	53	2890	3060
100	200		1,6	3	61	3730	3940
125	250				64	4455	4680
150	300		1,8	3,4	71	5350	5630
200	400		2		79	6840	7150

Trägerfrequenzkabel sind Fernmeldekabel, mit denen eine *bestimmte Anzahl von Informationen gleichzeitig über einen Stromkreis* übertragen werden kann. Die trägerfrequente Nachrichtenübermittlung ist Voraussetzung für den Selbstwählfernsprechverkehr und den Anschluß von Landesnetzen an internationale Nachrichtenverbindungen. Trägerfrequenzkabel sind entsprechend dem Verwendungszweck aus symmetrischen oder koaxialen Verseilelementen aufgebaut.

Symmetrische Trägerfrequenzkabel sind für die trägerfrequente Nachrichtenübertragung im Frequenzbereich von 12···552 kHz vorgesehen. Der Aufbau der Verseilelemente ist ähnlich dem der hohlraumisolierten NF-Kabel. Sie werden mit unterschiedlicher Anzahl von Vierern und zusätzlichen Signaladern gefertigt. Die Kupferleiter haben einen Durchmesser von 0,5···1,4 mm.

Koaxiale Trägerfrequenzkabel (sog. *Tubenkabel*) sind für Frequenzen über 552 kHz geeignet. Sie sind so aufgebaut, daß jeweils ein rohrförmiger Außenleiter den drahtförmigen Innenleiter umschließt. Der gleichmäßige Abstand des Außenleiters vom Innenleiter wird durch Isolierstücke/Scheiben, meist aus Polyäthylen oder Polystyrol, erreicht. Ein TF-Kabel mit einem Innen- und einem Außenleiter wird als *Eintubenkabel* bezeichnet. Je nach Anzahl der Tuben spricht man von *x*-Tubenkabeln. Meistens vereinigt man vier dieser Tuben zu einem Kabel (*Viertubenkabel*). Entsprechend dem Verwendungszweck werden auch *kombinierte* – symmetrisch und koaxial – *TF-Kabel* angewendet. Die darin enthaltenen Vierer oder Paare dienen dienstlichen Überwachungszwecken, z. B. zur Druckgasüberwachung oder zur Fernspeisung der Zwischenverstärker.

5.2.5.3. Kombinierte Fernmeldekabel

Sie werden zum Aufbau von Nachrichtennetzen in großen Städten verwendet und gestatten eine ökonomisch und technisch günstige Lösung der Forderungen hinsichtlich des Nachrichtennah- und -fernverkehrs sowie im NF- als auch im TF-Bereich. Sie sind hohlraumisoliert und symmetrisch aufgebaut. Es wird unterschieden in

leiterkombinierte Kabel – unterschiedliche Leiterdurchmesser,
frequenzkombinierte Kabel – NF und TF,
leiter- und frequenzkombinierte Kabel.

5.3. Schaltanlagen

Der Bedarf an Elektroenergie in der Volkswirtschaft steigt ständig. Der Transport der Elektroenergie vom Kraftwerk zum Verbraucherschwerpunkt erfolgt über *Hochspannungsübertragungsleitungen*, deren *Übertragungsspannung* abhängig ist von

1. der Länge der Übertragungsleitung,
2. der zu übertragenden Leistung.

Die *Verteilung der Elektroenergie* erfolgt mit Hilfe der *Schaltanlagen*, deren Größe, Ausführung und Konstruktion abhängig sind von

1. der Höhe der Übertragungsspannung bzw. Nennspannung des Netzes,
2. der zu verteilenden Leistung,
3. den örtlichen Gegebenheiten,
4. den technischen Forderungen der Verbraucherseite,
5. den ökonomischen Belangen,
6. den Sicherheitsbestimmungen.

5.3.1. Hochspannungsschaltanlagen

Die in Hochspannungsschaltanlagen zum Einsatz gelangenden Schaltzellen unterscheiden sich nach folgenden *Isolationsarten:*

luftisolierte Schaltzellen,
feststoffisolierte Schaltzellen,
gasisolierte Schaltzellen.

5.3.1.1. Luftisolierte Schaltzellen

Als isolierendes Medium wird die die blanken spannungführenden Leiter umgebende Luft genutzt.

Für die Aufstellung in Innenräumen werden luftisolierte Schaltzellen bis 30 kV Nennspannung in offener oder gekapselter Bauweise ausgeführt. Anlagen mit höheren Nennspannungen, z. B. 110, 220 kV, werden vorwiegend als offene Außenanlagen (Freiluftanlagen) errichtet.
Tabelle 5.79 zeigt eine Übersicht luftisolierter Schaltzellen.

Tabelle 5.79: Übersicht luftisolierter Anlagen

Anlage	Nennspannung kV	Typ	Ausführung nach Standard
Offene Innenraum-Schaltanlagen	10	A2SIG	TGL 76-085
Offene Innenraum-Schaltanlagen	20	A2SIG	TGL 76-086
Halboffene Innenraum-Schaltzellen	10, 20	BSIG	TGL 200-0858
Gekapselte Schaltzellen	10, 20	CSIM	TGL 200-0575
Gekapselte Schaltzellen	10	CSIM	TGL 26055
Vereinfachte Schaltanlage 110 kV als Außenanlage	110	–	TGL 190-236

Für neue Mittelspannungs-Schaltanlagen werden überwiegend fabrikfertige gekapselte Schaltzellen eingesetzt. Ihre *Vorzüge* sind:

universelle Aufstellmöglichkeit,
Lieferung elektrisch und mechanisch geprüfter Schaltzellen an den Montageort,
hohe Sicherheit für das Bedienungspersonal,
geringerer Platzbedarf,
günstige Erweiterungsmöglichkeit, schnelle Umsetzung an einen anderen Ort.

Bild 5.21 zeigt den Aufbau einer gekapselten Schaltzelle.

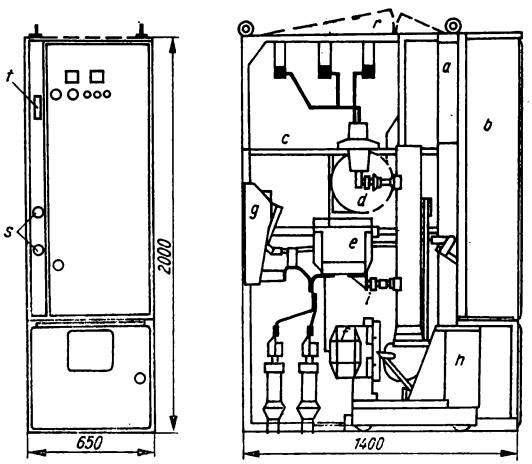


Bild 5.21. Aufbau einer gekapselten Schaltzelle (luftisoliert), Typ CSIM 12 mit Leistungsschalter
a Ringleitung, b Sekundärteil, c Schottung zum Sammelschienenraum, d automatische Trennkontaktabdeckung, e Stromwandler, f Spannungswandler, g Erdungstrenner/Kurzschließer, h Fahrteil mit Leistungsschalter, i Trennkontakt, r Druckentlastung, s Schauglas für Ölstand, t kapazitive Spannungsanzeige

5.3.1.2. Feststoffisolierte Schaltzellen

Anstelle der Luft wird ein fester Stoff, z. B. Gießharz, als Isoliermaterial verwendet. Ausführung z. B. als vollfeststoffisolierte Schaltzelle für 30 kV mit Einfachsammelschiene Typ ASIF 36 nach TGL 29702.

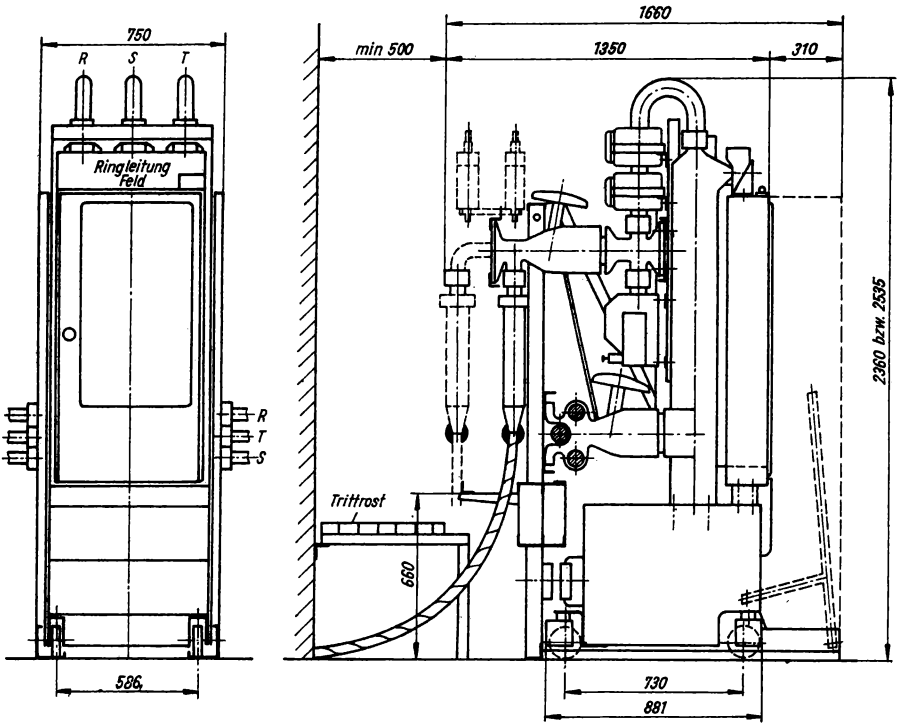


Bild 5.22. Aufbau einer vollfeststoffisolierten Schaltzelle Typ ASIF 36

Die Schaltzellen sind lichtbogenfußpunktfrei und besitzen an den Isolierstoffaußenflächen Erdpotential, so daß eine gefahrlose Berührung im Betrieb möglich ist.

Mit der Gießharzisolation wurden folgende *Vorteile* erreicht:

erhebliche Reduzierung der Abmessungen der Schaltanlage,

Erhöhung des Berührungsschutzes,

wesentliche Verminderung der Möglichkeit unbeabsichtigter Lichtbogenbildung und Lichtbogenauswirkung,

hohe Betriebs- und Bedienungssicherheit,

geringer Wartungsaufwand.

Bild 5.22 zeigt den Aufbau einer vollfeststoffisolierten Schaltzelle.

5.3.1.3. Gasisolierte Schaltzellen

Als isolierendes Medium wird Gas, z. B. SF_6, mit hohem Isoliervermögen genutzt.
Gegenüber konventionellen luftisolierten Schaltzellen liegen die Vorteile der Gasisolation im geringen Platzbedarf und in der Unabhängigkeit der Isoliereigenschaften von äußeren Einflüssen. Gasisolierte Anlagen sind geeignet für den Einsatz in dicht bebauten und besiedelten Gebieten oder bei hoher Fremdschichtbelastung.
In der DDR wurden bisher SF_6-gasisolierte Schaltzellen für 123 kV, Typbezeichnung GSAS 1-123, entwickelt, produziert und in Umspannwerken der Energieversorgung in Betrieb genommen.

5.3.2. Umspannstationen, Typenreihe UK

Die Versorgung von Industriebetrieben und ähnlichen Großverbrauchern mit Elektroenergie erfolgt überwiegend aus Netzen mit Nennspannungen bis 30 kV. Hierfür stehen stan-

Tabelle 5.80: Kenndaten der Umspannstationen (nach TGL 29003)

Nenneingangsspannung		kV	6	10	15	20	30
Nennausgangsspannung		V	231	400	525		693
Nennfrequenz		Hz	50				
Ausführungsklasse nach TGL 9200/01			N III				
Transformator	Nennleistung	kVA	100···1600				
	Anzahl		1···4				

UK X – X X – X TGL 29003

- Standardnummer
- Ausführung des Niederspannungs-Schaltraumes
  1 = 3540 mm breit
  2 = 5540 mm breit
- Mittelspannungs-Schaltzellentyp; Kennbuchstabe nach TGL 29003/01
- Ausführung des Mittelspannungs-Schaltraumes
  0 = ohne Mittelspannungs-Schaltraum
  1 = 2815 mm breit
  2 = 3955 mm breit
- Anzahl der Transformatorräume
- Typenreihe

Tabelle 5.81: Bestückungsvarianten

Kennbuchstabe		a	c	d	f	–
Typ der Schaltzellen/ -felder		BSIG-10/250	CSIM-12 Leistungs-schalter-Z.	BSIG-20 CSIM-1 -20/250	ASIF 36	ISA 2000-SF 8 ISA 2000-SG 8 ISA 2000-SK 8
Umspann-station	Anzahl der Transforma-toren	Anzahl der Schaltzellen				
UK 1-0-1		–	–	–	–	
UK 1-1-1	1	7	–	5	–	6
UK 1-2-1		13 (14)	8	9 (10)	7	
UK 2-0-1		–	–	–	–	
UK 2-1-1	2	6 (7)	–	5	–	12
UK 2-2-1		13 (14)	8	9 (10)	7	
UK 3-0-1		–	–	–	–	
UK 3-1-1	3	7	–	5	–	18
UK 3-2-1		13 (14)	8	9 (10)	7	
UK 4-0-1		–	–	–	–	
UK 4-1-1	4	7	–	5	–	24
UK 4-2-1		13 (14)	8	9 (10)	7	
UK 1-0-2		–	–	–	–	
UK 1-1-2	1	9	–	6	–	10
UK 1-2-2		17 (18)	11	12	10	
UK 2-0-2		–	–	–	–	
UK 2-1-2	2	9	–	6	–	20
UK 2-2-2		17 (18)	11	12	10	
UK 3-0-2		–	–	–	–	
UK 3-1-2	3	9	–	6	–	30
UK 3-2-2		17 (18)	11	12	10	
UK 4-0-2		–	–	–	–	
UK 4-1-2	4	9	–	6	–	40
UK 4-2-2		17 (18)	11	12	10	

Bei Verwendung von Batteriezellen oder Wartenfeldern verringert sich die Anzahl der Schaltzellen und/oder Schaltfelder entsprechend. Wird vom Betreiber in der Station kein Stationszubehör benötigt, ist die Bestückung nach den Angaben in ( ) zulässig.

dardisierte Typen von Umspannstationen zur Verfügung, die so variiert werden können, daß die Mehrzahl der Bedarfsfälle mit diesen Typenreihen erfaßbar ist.
Kenndaten der Umspannstationen s. Tabelle 5.80, Bestückungsvarianten s. Tabelle 5.81.

Bezeichnungsbeispiel für eine Umspannstation UK mit zwei Transformatorräumen (2), 2815 mm breitem Mittelspannungs-Schaltraum (1) für Schaltzellentyp BSIG 1-10/250 (a) und 5540 mm breitem Niederspannungs-Schaltraum (2):
Umspannstation UK2-1a-2 TGL 29003

Tabelle 5.82: Abmessungen der Umspannstation ohne Mittelspannungs-Schaltraum

Umspann-station	Niederspannungs-Schaltraum	
	Breite *a* mm	Länge *c* mm
UK 1-0-1	3540	3010
UK 1-0-2	5540	
UK 2-0-1	3540	6010
UK 2-0-2	5540	
UK 3-0-1	3540	9010
UK 3-0-2	5540	
UK 4-0-1	3540	12010
UK 4-0-2	5540	

Tabelle 5.83: Abmessungen der Umspannstation mit Mittelspannungs-Schaltraum

Umspann-station	Mittel-/Niederspannungs-Schaltraum			
	Breite in mm		Länge in mm	
	a	*b*	*c*	*d*
UK 1-1-1	3540	2815	3010	6540
UK 1-2-1		3955		–
UK 1-1-2	5540	2815		8540
UK 1-2-2		3955		
UK 2-1-1	3504	2815	6010	6540
UK 2-2-1		3955		–
UK 2-1-2	5540	2815		8540
UK 2-2-2		3955		
UK 3-1-1	3540	2815	9010	6540
UK 3-2-1		3955		–
UK 3-1-2	5540	2815		8540
UK 3-2-2		3955		
UK 4-1-1	3540	2815	12010	6540
UK 4-2-1		3955		–
UK 4-1-2	5540	2815		8540
UK 4-2-2		3955		

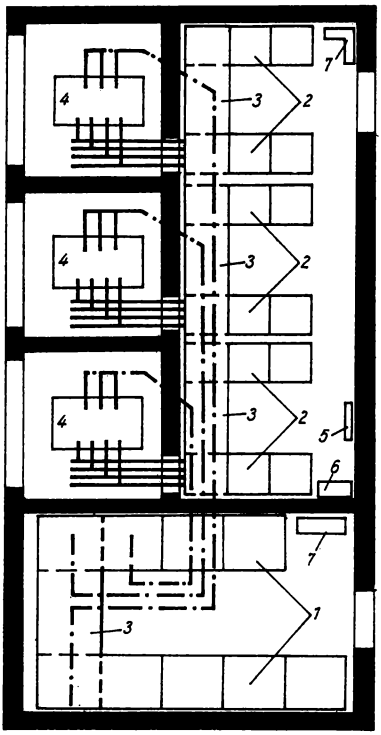


Bild 5.23. Anordnung der Grundausrüstung der Umspannstation
1 Mittelspannungs-Schaltanlage, 2 Niederspannungs-Schaltanlage, 3 Sammelschienenumführung, 4 Transformator, 5 Verteilung Eigenbedarf, 6 Meßsatztafel, 7 Stationszubehör

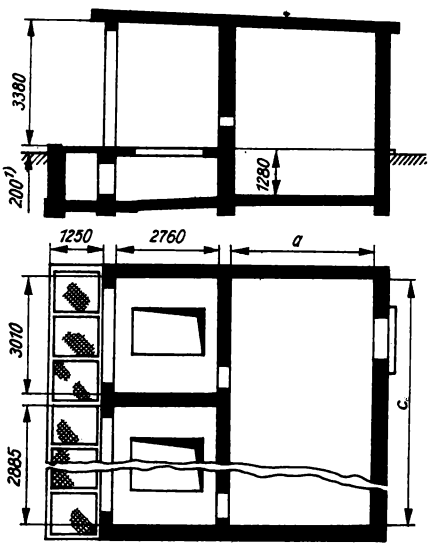


Bild 5.24. UK-Station, Ausführung ohne Mittelspannungsschaltraum, bis 4 Trafo-Räume

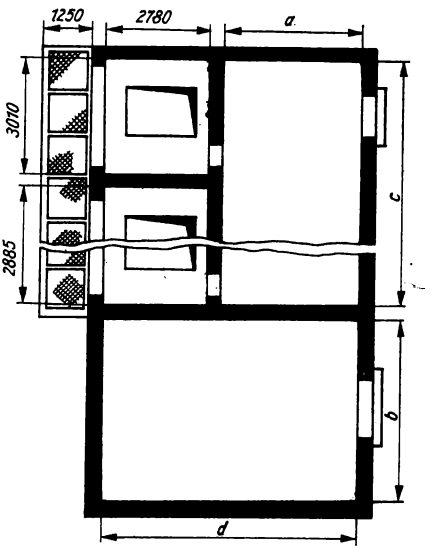


Bild 5.25. UK-Station, Ausführung mit Mittelspannungsschaltraum, bis 4 Trafo-Räume

Die Anordnung der Grundausrüstung der Umspannstationen ist im Bild 5.23 dargestellt.
Die Ausführung der Umspannstationen mit und ohne Mittelspannungsschaltraum zeigen die Bilder 5.24 und 5.25. Die Abmessungen sind in den Tabellen 5.82 und 5.83 enthalten. Die UK-Stationen werden vorwiegend in freistehenden Gebäuden errichtet. Bei der Projektierung des Baukörpers sind die Angebotskataloge des VE Bau- und Montagekombinates Kohle und Energie, Berlin, zu beachten.

5.3.3. Ortsnetz-Transformatorenstationen

Diese Stationen dienen der Versorgung der örtlichen Niederspannungsnetze der Energieversorgung aus dem überlagerten Mittelspannungsnetz. Im Gegensatz zu den Stationen für Industriebetriebe gestatten die Bedingungen der Energieversorgung eine einfachere Gestaltung der Ortsnetz-Transformatorenstationen. Es wurden eine Reihe von *Stationstypen* entwickelt und standardisiert, die sich wie folgt gliedern:

Transformator-Kabelstationen (nach TGL 190-209)

Nennspannung 10 kV und 20 kV für ein oder zwei Transformatoreneinheiten bis max. 630 kVA
Niederspannungsanlage: Nennspannung 3 × 380/220 V
Nennstrom: Sammelschiene max. 1000 A, Schaltfelder je nach Schaltgerät, z. B. offene Wandverteiler nach TGL 26668.
Bild 5.26 zeigt Grundriß und Raumverteilung einer Station der Typreihe »Erfurt IV«, die Bilder 5.27 und 5.28 zeigen die Übersichtsschaltpläne einiger Ausführungsvarianten.

Verwendung: für verkabelte Mittelspannungsnetze bis 20 kV, insbesondere in Wohngebieten.

Transformator-Freileitungsstationen (nach TGL 190-210)

Nennspannung 10 kV und 20 kV, Transformatornennleistung 630 kVA
Niederspannungsanlage: Nennspannung 3 × 380/220 V,
Nennstrom: Sammelschiene max. 1000 A, Schaltfelder je nach Schaltgerät, z. B. nach TGL 26668/01···05, Variante ISA 2000-EV.

Verwendung: Als End- oder Durchgangsstation mit unmittelbarer Einspeisung aus dem Mittelspannungsfreileitungsnetz. Niederspannungsseitig wahlweise Ausführung mit Kabel- oder Freileitung. Für Freileitungsnetze in ländlichen Gebieten, für Einzelverbraucher oder kleine Verbrauchergruppen werden Spannbeton-Maststationen mit max. 160 kVA Transformatornennleistung eingesetzt.

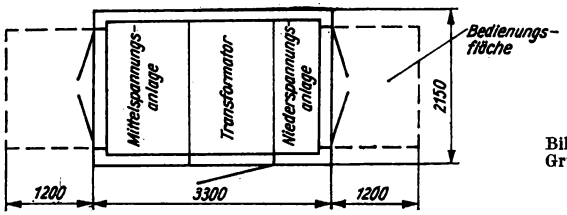


Bild 5.26. Transformator-Kabelstation, Grundriß und Raumaufteilung

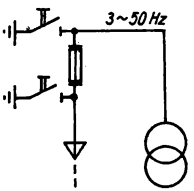


Bild 5.27. Transformator-Kabelstation, Übersichtsschaltplan für Endstation ohne Trenner

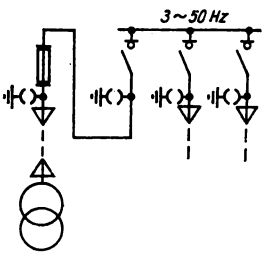


Bild 5.28. Transformator-Kabelstation, Übersichtsplan für Hochspannungsverteiler Typ LHTCIG-12/400 3/1 oder Typ LHTCIG-24/400 3/1

5.3.4. Schalt- und Verteilungsanlagen bis 1000 V, Schaltfelder, Schützfelder

Gemäß TGL 17872 werden diese Schalt- und Verteilungsanlagen mit Nennspannungen bis 660 V Ws ausgeführt. Sie werden als fabrikfertige Schaltfelder mit Einfachsammelschienensystem 3 N ~ produziert und montiert. Die Felder sind in TGL 26668/01···05 »Felder für Nennspannungen bis 660 V Ws« standardisiert.

Für verschiedenartige Anwendungsgebiete sind die Innenraumschaltanlagen ISA 2000 nach bestimmten konstruktiven Gesichtspunkten in Typreihen gegliedert. Es kommen Gefäße des Einheitlichen Gefäßsystems (EGS) mit 2000 mm Höhe zur Verwendung.

Tabelle 5.84: Typenübersicht der ISA 2000

Position	Typ	Verwendungsgebiet
1	ISA 2000-SF	Schaltfelder
2	ISA 2000-SG	Schützfelder
3	ISA 2000-SK	Kondensatorenfelder
4	ISA 2000-ST	Transformatorenboxen
5	ISA 2000-SL	Schwerpunktlaststationen
6	ISA 2000-EV	Ortsnetzstationen der Energieversorgung
7	ISA 2000-UV	Kombinierte Einspeisung und Abgänge als Einzelfeld in Unterverteilungen

Die Felder nach Position 1···3 (SF, SG, SK) haben bei einem Breitenmaß von 800 mm eine Tiefe von 800 mm, z. B. als Variante SF 8, und eine Tiefe von 400 mm, z. B. als Variante SF 4. Felder gleicher Tiefe sind miteinander kombinierbar. Tabelle 5.85 enthält die Übersicht aller Gefäßabmessungen.

Tabelle 5.85: Gefäßabmessungen der ISA 2000 (Maße in mm)

Gefäßabmessungen			Typen							
Höhe	Breite	Tiefe	EV	UV	SF4	SG4	SK4	SF8	SG8	SK8
2000	600	400	×	–	–	–	–	–	–	–
	800	400	–	×	×	×	×	–	–	–
		800	–	–	–	–	–	×	×	×
	1000	400	×	–	–	–	–	–	–	–

Tabelle 5.86: Hauptkennwerte der ISA 2000

Kennwerte		EV	UV	SF 4	SG 4	SK 4	SF 8	SG 8	SK 8
Nennspannung	V				380 660				
Sammelschienen-nennströme	A	1000	630	bis 1000			bis 2500		
Stoßkurzschluß-stromfestigkeit der Sammel-schienen	kA	bis 70	bis 70	bis 70			bis 120		
Schutzklasse nach TGL 21366			I						
Schutzgrade nach TGL 15165/03		IP 00	IP 20 IP 40	IP 00 IP 20 IP 40		IP 00 IP 20	IP 00 IP 20 IP 40		IP 00 IP 20
Einsatzklasse nach TGL 9200/03			−10/+35/+20/85/1001						

Der obere Teil des Feldes ist für den Stromschienenbaustein vorgesehen. Der darunterliegende Raum wird für den Einbau der Gerätebausteine genutzt. Im rechten Teil ist bei Abgangsfeldern Raum für Kabelanschlüsse vorhanden. Bild 5.29 zeigt das Aufbauprinzip von Abgangsfeldern.

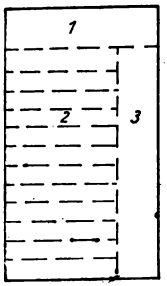


Bild 5.29. Aufbauprinzip der Abgangsfelder
1 Sammelschienenraum,
2 Geräteraum,
3 Kabelanschlußraum

Die Gerätebausteine werden als Einschub, Teileinschub oder Einsatz in die Felder eingebaut. Sie enthalten komplette Schaltungen als Funktions- und Fertigungseinheit. So werden z. B. beim Einfügen der Einschübe in die Felder diese mittels Steckkontakte für Haupt- und Steuerstromkreise elektrisch angeschlossen. In der Teststellung der Einschübe bleiben die Steuerleitungen weiter funktionsbereit.

Tabelle 5.87: Einspeisungen der ISA 2000-SF

Typ	Geräte in der Einspeisung	Gerätenennstrom in A				
		400	600	630	1000	2500
SF 8	nicht strombegrenzende Leistungsschalter	○	–	○	○	○
SF 4		–	●	–	●	–
	Lastschalter	–	–	●	–	–

● Einsatz, ○ Einschub

Tabelle 5.89: Kupplungen der ISA 2000-SF

Typ	Gerät in der Kupplung	Gerätenennstrom in A	
		1000	2500
SF 8	nicht strombegrenzender Leistungsschalter	○	○
	Lastschalter	●	
	Leerschalter		○
SF 4	nicht strombegrenzender Leistungsschalter	●	
	Lastschalter	●	

● Einsatz, ○ Einschub

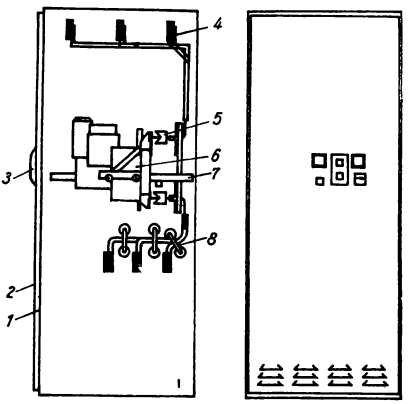


Bild 5.30. ISA 2000-SF 8 Einspeisungsfeld, 2500 A
1 Gestell, 2 Tür, 3 Betätigungsplatte, 4 Horizontal-Sammelschiene, 5 Einschubkontakt, 6 Leistungsschalter, 7 Fahrschiene, 8 Stromwandler

Tabelle 5.88: Abgänge der ISA 2000-SF

Typ	Gerät im Abgang		Gerätenennstrom in A							
			25	63	100	160	250	400	630	1000
SF 8	nicht strombegrenzender Leistungsschalter		–	–	–	–	○	○	○	○
			–	–	–	–	×	×	×	–
SF 8	strombegrenzender Leistungsschalter		–	–	–	–	○	○	○	○
			–	●	–	×	×	×	×	–
SF 4			–	●	–	●	×	×	–	–
SF 8	Lastschalter		–	–	–	–	×	×	×	–
SF 4			–	–	–	–	×	–	–	–
SF 8	Sicherungen		–	–	●	–	–	●	●	–
SF 4			–	–	●	–	–	●	●	–
SF 8	Schütze für schwere Betriebsbedingungen	Einfachschaltg.	×	×	×	×	×	–	–	–
		Wendeschaltung	×	×	×	×	×	–	–	–
		Stern-Dreieck-Schaltung	×	×	×	×	×	–	–	–
SF 4		Einfachschaltung			×	×	–	–	–	

× Teileinschub, ○ Einschub, ● Einsatz

Schützfelder ISA 2000-SG

Die Varianten ISA 2000-SG sind für Schützabgänge verschiedener Schaltungen und Nennströme nach Tabelle 5.90 vorgesehen. Bei Typ SG 8 kann die Bestückung mit Gerätebausteinen bei freistehender Aufstellung zweiseitig erfolgen.
Bild 5.30 zeigt ein Einspeisungsfeld, Bild 5.31 ein Abgangsfeld.

Tabelle 5.90: Abgänge mit Schützschaltungen, Typ ISA 2000-SG

Typ	Industrieluftschütz in der Schaltung	Gerätenennstrom in A						
		10	16	25	40	63	100	160
SG 4 und SG 8	Einfachschaltung	–	○	○	○	○	○	○
		–	×	×	×	×	×	×
	Doppel-Einfachschaltung	○	–	–	–	–	–	–
		×	×	–	–	–	–	–
	Einfachschaltung mit 60-V-Ansteuerung	–	○	○	○	○	○	○
		–	×	×	×	×	×	×
	Doppel-Einfachschaltung mit 60-V-Ansteuerung	○	○	–	–	–	–	–
		×	×	–	–	–	–	–
	Einfachschaltung mit Anlaufüberbrückung	–	–	○	○	○	○	○
		–	–	×	×	×	×	×
	Einspeisung mit Schütz	–	–	–	–	×	×	×
	Einfachschaltung mit Speichereffekt	○	–	–	–	–	–	–
	Wendeschaltung	–	○	○	○	○	○	○
		–	×	×	×	×	×	×
	Doppel-Wendeschaltung	○	–	–	–	–	–	–
		×	–	–	–	–	–	–
	Wendeschaltung mit 60-V-Ansteuerung	–	○	○	○	○	○	○
		–	×	×	×	×	×	×
	Umschaltung, Notlicht	–	–	×	×	–	–	–
	Stern-Dreieck-Anlaßschaltung	–	–	–	○	○	○	○
		–	–	–	×	×	×	×
	Kusa-Schaltung			○	○	○	○	○
				×	×	×	×	×
	D-Sicherungsabgänge			●		●		
	Lastschalter			●		●		

○ Einschub, × Teileinschub, ● Einsatz

Kondensatorenfelder zur Blindleistungskompensation

Mit einer Kondensatorenanlage können die in Wechselstromnetzen besonders durch Asynchronmotoren, Umspanner, Drosselspulen, Freileitungen usw. auftretenden Leistungsverluste durch Blindstrom – *Blindleistungsverluste* – kompensiert werden.
Durch die Blindleistungskompensation wird der unproduktive Blindstrom kompensiert und somit die elektrotechnische Anlage wesentlich entlastet.

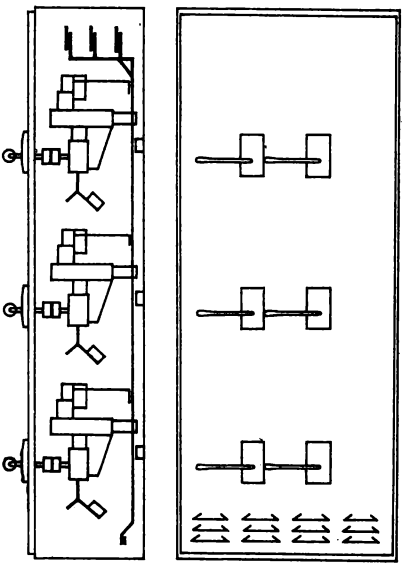


Bild 5.31. ISA 2000-SF 4 Abgangsfeld, Lastschalter 250 A in Teileinschubausführung

Die Anlagen bestehen aus dem *Anschlußfeld* und den rechts- oder linksseitig angebauten *Kondensatorenfeldern*. Die Geräte für die Steuerung und Blindleistungsregelung sind im Anschlußfeld angeordnet.
Die Bilder 5.32 und 5.33 zeigen die Abmessungen und die Schaltung von Kondensatorenfeldern.
Die Zu- und Abschaltung der erforderlichen Kondensatoren erfolgt von Hand oder mit einem automatischen Blindleistungsregler.
Die Betriebsspannungen betragen 380, 500 und 660 V. Weitere Kenndaten von Kondensatoren und Anschlußfeldern sind in Tabelle 5.91, Angaben über die Kurzschlußfestigkeit in Tabelle 5.92 enthalten.

Tabelle 5.91: Daten von Kondensatorenfeldern

Benennung		Kondensatorenfeld					Anschlußfeld	
Baustein		A	B	C	E	F	L	V
Leistung in kvar		140	180	220	240	120	140···360	240···960
Masse in kg	IP 00	–	–	–	320	170	75	120
	IP 20	240	290	340	360	210	85	150

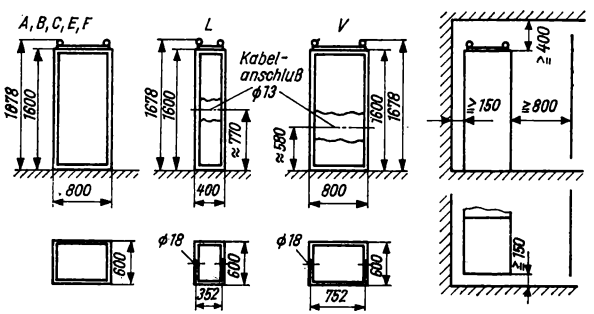


Bild 5.32. Abmessungen der Kondensatorenfelder

Tabelle 5.92: Kurzschlußfestigkeit für Anlagen mit Anschlußfeld

Strom	Anschlußfeld	
	L	V
I_s in kA	45	80
I_{th} in kA	18	36

Tabelle 5.93: Kennwerte von verschiedenen Bauformen

Bauformen	Nennleistung — 5% + 10% kvar	Stufenanzahl	Stufenleistung kvar	Anschlußfeld: Steuer-Meßteil ohne	Steuer-Meßteil mit Hand	Steuer-Meßteil mit Hand/Automatik	U_N = 380 V, $U_{Meß}$ = 100 V oder 380 V: Wandlerübersetzung A[1])	Max. Anschlußkabel mm² Al	Max. Anschlußstromschiene [2])	Verbindungsstromschiene	Hilfsstromschiene	U_N = 500 V, $U_{Meß}$ = 100 V: Wandlerübersetzung A[1])	Max. Anschlußkabel mm² Al	Max. Anschlußstromschiene [2])	Verbindungsstromschiene	Hilfsstromschiene	Schutzgrad
L A	140	7	20	—	h	z	—	4 × 4 × 240	—	40 × 10	—	—	4 × 4 × 240	—	40 × 10	—	IP 20
L B	180	9															
L C	220	11															
L E	240	6	40	0	—	a	600/5			5 × 10		600/5					IP 00 oder IP 20
L F E	360	9					750/5										
V E	240	6					600/5	11 × 4 × 240	2 × 80 × 10	80 × 10	120 × 10		11 × 4 × 240	2 × 80 × 10	80 × 10	120 × 10	
V F E E V F	360	9					750/5										
V E E E V E E E V	480	12					1000/5					750/5					
E E V F	600	15					1500/5					1000/5					
E E V E	720	18															
E E V F E	840	21					2000/5			2 × 80 × 10		1500/5			2 × 80 × 10		
E E V E E	960	24															

[1]) Meßbereich des Strommessers entspricht der Wandlerübersetzung.
[2]) Bei Stromschienenanschluß von oben erhält das Anschlußfeld keine Verbindungs- und Hilfsstromschiene der Leiter R S T, de Schutzgrad ist IP 00.
Wird Steuer- und Meßteil benötigt, ist dieser bei der Bestellung gesondert anzugeben.
Stromschienenanschluß von unten ist möglich.

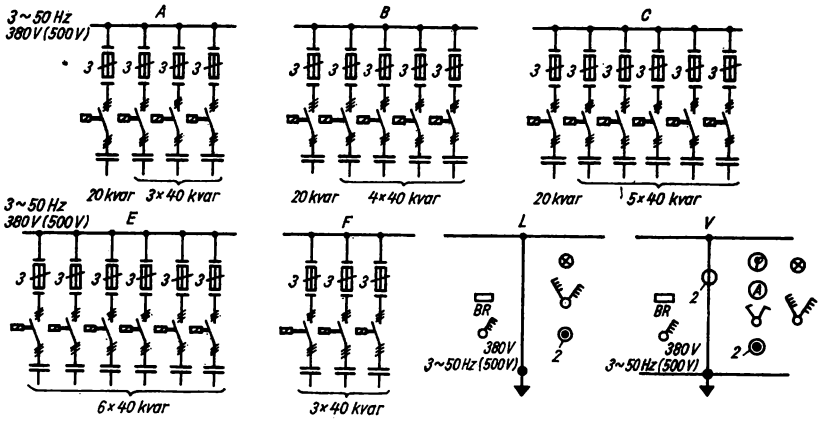


Bild 5.33. Schaltung der Kondensatorenfelder

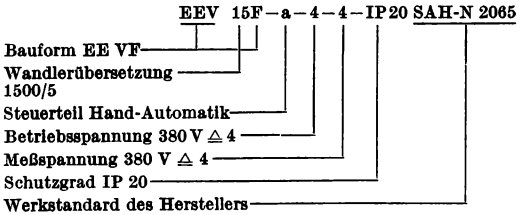
Kondensatorenfelder der Typenreihe ISA 2000-SK werden in 2 Nenngrößen mit den Leistungen je Feld:

SK 8 120 und 240 kvar
SK 4 80, 140 und 160 kvar

angeboten.

Schutzgrad: IP 00, IP 20 (Bodenfläche im Lieferzustand IP 00). Für verschiedene Bauformen sind Kennwerte in Tabelle 5.93 zusammengestellt.

Bezeichnung einer Kondensatorenanlage



Blindleistungskompensation

Kondensatoren nehmen einen der Spannung um 90° voreilenden Strom auf. Das ergibt gegenüber einem rein induktiven Verbraucher eine Verschiebung der Blindströme um 180° (s. Bild 5.34). Ist der kapazitive Strom I_C gleich dem induktiven Strom I_L, so werden Umspanner und Leitungen vom Blindstrom entlastet, und das Kraftwerk hat nur noch den Wirkstrom I_w zu liefern.

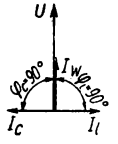


Bild 5.34. Spannung und Strom bei Blindleistungskompensation

Einzelkompensation

Der Kondensator wird parallel zum Verbraucher geschaltet, und die Zuleitungen werden dadurch vom Blindstrom entlastet. Verbraucher und Kondensator werden mit demselben Schalter geschaltet.

Zentralkompensation

Diese wird angewandt, wenn eine große Anzahl kleinerer Verbraucher angeschlossen oder der Gleichzeitigkeitsfaktor der Anlage niedrig ist. In beiden Fällen wird entweder für eine Gruppe von Verbrauchern oder für sämtliche Verbraucher eine Kondensatorenbatterie aufgestellt.
Die einzelnen Kondensatoren werden von Hand oder automatisch zu- und abgeschaltet. Bei automatischer Betätigung ist darüber hinaus auch die Möglichkeit der Handbetätigung vorzusehen.
Tabelle 5.94 enthält Daten zur Bemessung der Kondensatorleistung.

Tabelle 5.94: Bemessung der Kondensatorleistung bei Motoren[1])

Motornennleistung kW	Kondensatorleistung kvar	
1···3	60%	der Motornennleistung
4···10	50%	
11···20	45%	
21···50	40%	
51···100	35%	
101···200	30%	

[1]) Kondensatorleistung bei Transformatoren 10···15% der Transformatorscheinleistung

Projektierungsbeispiel

Ein Industriebetrieb hat einen jährlichen Verbrauch von 1200000 kWh. Der Jahresdurchschnitt der viertelstündigen Höchstleistungen beträgt $P_w = 500$ kW. Der mittlere Leistungsfaktor beträgt $\cos\varphi = 0{,}7$. Die Netzspannung ist 380/220 V.
Der Betrieb soll mit Blindleistungs-Kondensatoren auf $\cos\varphi = 0{,}9$ kompensiert werden. Da überwiegend kleine Verbraucher angeschlossen sind, soll automatische Zentralkompensation angewendet werden. Die Blindleistung des 800-kVA-Transformators soll durch Einzelkompensation kompensiert werden.

Jährliche Stromkosten (unkompensiert)

Scheinleistung $P_s = \frac{P_w}{\cos\varphi} = \frac{500}{0{,}7}$ kVA = 714 kVA

Jahresleistungspreis 399,– M/kVA
399,– M/kVA · 714 kVA = 284800,– M

Arbeitspreis 0,036 M/kWh
0,036 M/kWh · 1,2 · 10^6 kWh = 43250,– M

insgesamt 328050,– M

Jährliche Stromkosten (kompensiert)

Scheinleistung $P_s = \frac{500}{0{,}9} = 555$ kVA

Jahresleistungspreis 399,– M/kVA · 555 kVA	=	222000,– M
Arbeitspreis 0,036 M/kWh · 1,2 · 10^6 kWh	=	43250,– M
		265250,– M
Jährliche Einsparung durch Kompensation		328050,– M
		– 265250,– M
		62800,– M

Zur Kompensation erforderliche Kondensatorenleistung

Trafo-Kompensation. Dem 800-kVA-Transformator wird eine Kondensatorengruppe von 100 kvar fest zugeordnet. Dieses entspricht 12,5% der Trafo-Leistung.

Zentralkompensation. $\cos\varphi_1 = 0{,}7$, $\cos\varphi_2 = 0{,}9$; aus Tabelle 5.95 folgt $f = 0{,}54$;

$Q = Pf = 500$ kW · 0,54 = 270 kvar.

Gewählt 3feldrige Anlage Bauform EVF (Nennblindleistung bis 360 kvar).
Durch Blindleistungskompensation kann der 800-kVA-Transformator gegen einen kleineren von 630 kVA ausgewechselt werden.

Tabelle 5.95: Blindleistung $Q = (\tan\varphi - \tan\varphi_1)\,P$

Vor der Kompensierung		Faktor $f(\tan\varphi - \tan\varphi_1)$ für den angestrebten Leistungsfaktor $\cos\varphi_1$				
$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0,42	2,16	1,41	1,54	1,68	1,83	2,16
0,43	2,10	1,35	1,48	1,61	1,77	2,10
0,44	2,04	1,29	1,42	1,56	1,71	2,04
0,45	1,99	1,24	1,37	1,51	1,66	1,99
0,46	1,93	1,18	1,31	1,45	1,60	1,93
0,47	1,88	1,13	1,26	1,40	1,55	1,88
0,48	1,83	1,08	1,21	1,34	1,50	1,83
0,49	1,78	1,02	1,16	1,29	1,45	1,78
0,50	1,73	0,98	1,11	1,25	1,40	1,73
0,51	1,69	0,94	1,06	1,20	1,36	1,69
0,52	1,64	0,89	1,03	1,16	1,31	1,64
0,53	1,60	0,85	0,98	1,12	1,27	1,60
0,54	1,56	0,81	0,94	1,08	1,23	1,56
0,55	1,52	0,77	0,90	1,03	1,19	1,52
0,56	1,48	0,73	0,86	1,00	1,15	1,48
0,57	1,44	0,69	0,82	0,96	1,11	1,44
0,58	1,41	0,66	0,78	0,92	1,08	1,41
0,59	1,37	0,62	0,75	0,89	1,04	1,37
0,60	1,33	0,58	0,71	0,85	1,01	1,33
0,61	1,30	0,55	0,68	0,82	0,97	1,30
0,62	1,27	0,52	0,65	0,78	0,94	1,27
0,63	1,23	0,48	0,61	0,75	0,90	1,23
0,64	1,20	0,45	0,58	0,72	0,87	1,20
0,65	1,17	0,42	0,55	0,69	0,84	1,17
0,66	1,14	0,39	0,52	0,66	0,81	1,14
0,67	1,11	0,36	0,49	0,62	0,78	1,11
0,68	1,08	0,33	0,46	0,59	0,75	1,08
0,69	1,05	0,30	0,43	0,57	0,72	1,05
0,70	1,02	0,27	0,40	0,54	0,69	1,02
0,71	0,99	0,24	0,37	0,51	0,66	0,99
0,72	0,96	0,21	0,34	0,48	0,64	0,96
0,73	0,94	0,19	0,32	0,45	0,61	0,94
0,74	0,91	0,16	0,29	0,43	0,58	0,91
0,75	0,88	0,13	0,26	0,40	0,55	0,88
0,76	0,86	0,11	0,23	0,37	0,53	0,86
0,77	0,83	0,08	0,21	0,35	0,50	0,83
0,78	0,80	0,05	0,18	0,32	0,47	0,80
0,79	0,78	0,03	0,16	0,29	0,45	0,78

Tabelle 5.96: Kennwerte von Niederspannungsleistungskondensatoren 20···40 kvar für Innenraum

Nennleistung kvar	Nennspannung 50 Hz V	Kapazität µF	Nennstrom A	Schaltart[1]
20	380	440	52,6	E
	500	254	40	E
	660	147	30,3	E
20	380	440	30,4	D
	500	254	23,2	D
	660	3 × 147	17,5	Y
40	380	880	105,2	E
	500	508	80	E
	660	293	60,6	E
40	380	880	60,8	D
	500	508	46,4	D
	660	3 × 293	35,1	Y

[1]) E einphasig, beide Pole isoliert herausgeführt
EP einphasig, ein Pol isoliert herausgeführt
D dreiphasig, im Innern im Dreieck geschaltet
Y dreiphasig, im Innern im Stern geschaltet

Bild 5.35 zeigt eine Stern-Dreieck-Schaltung mit Blindleistungskompensation.
Jeder Kondensator ist durch Sicherungen oder magnetische Schnellauslöser vor Kurzschluß zu schützen. Vorzugsweise sind NH-Sicherungen zu verwenden.

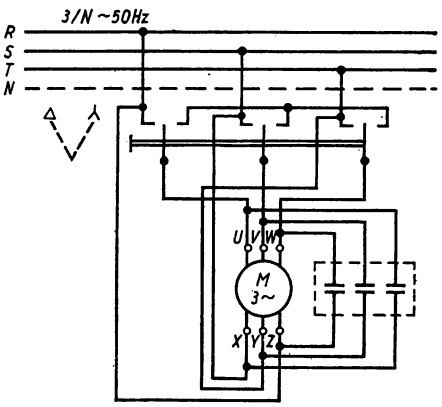


Bild 5.35. Stern-Dreieck-Schaltung mit Blindleistungskompensation

Sicherungsnennstrom 1,2···1,5facher Kondensatorstrom.

Einstellung der magnetischen Schnellauslöser
– ungedämpftes Schalten 9···12facher Kondensatorstrom
– gedämpftes Schalten 5···6facher Kondensatorstrom

5.3.5. Bemessung von Schaltanlagen

Es gelten folgende Standards:

Berechnung von Kurzschlußströmen

TGL 200-0604/01 Begriffe, Formelzeichen
TGL 200-0604/02 Drehstromanlagen
TGL 200-0604/03 Stromrichteranlagen und stromrichtergespeiste Gleichstromanlagen

Bemessung von Starkstromanlagen auf Kurzschlußfestigkeit

TGL 200-0606/01 Begriffe, Formelzeichen
TGL 200-0606/02 Mechanische Kurzschlußfestigkeit von Anlagen mit biegesteifen Leitern
TGL 200-0606/03 Mechanische Kurzschlußfestigkeit von Anlagen mit nicht biegesteifen Leitern
TGL 200-0606/04 Thermische Kurzschlußfestigkeit

Tabelle 5.97: Zusammenstellung verwendeter Formelzeichen

Bezeichnung	Einheit	Benennung
A	cm^2	Querschnitt des Leiters, für den die thermische Kurzschlußstromfestigkeit nachgewiesen werden soll
a	cm	Hauptleitermittenabstand
a_t	cm	fiktiver Teilleitermittenabstand
b	mm	Schienenhöhe
d	mm	Schienendicke
$F_{d(3)}$	N	Stützpunktkraft bei zweipoligem Kurzschluß
$F_{d(3)}$	N	Stützpunktkraft bei dreipoligem Kurzschluß
F_t	N	Kraftwirkung zwischen den Teilleitern bei Kurzschluß
I_m	kA	thermisch wirksamer Mittelwert des Kurzschlußstromes
I_{ms}	kA	resultierender thermisch wirksamer Mittelwert des Kurzschlußstromes bei mehreren aufeinanderfolgenden Schaltvorgängen, z. B. Schnellwiedereinschaltung
I_s	kA	Stoßkurzschlußstrom, allgemein
I_{szul}	kA	zulässiger Stoßkurzschlußstrom
I_{th}	kA	Nennkurzzeitstrom (Einsekundenstrom) elektrotechnischer Betriebsmittel
l	cm	Leiterlänge (Stützlänge zwischen zwei benachbarten Befestigungspunkten, z. B. Stützer)
l_t	cm	Teilleiterlänge zwischen zwei benachbarten Zwischenstücken oder zwischen Befestigungspunkt und benachbartem Zwischenstück
M	$N \cdot m$	zulässiges Biegemoment in Leitermitte
q	$N \cdot cm^{-1}$	Streckenlast infolge der elektromagnetischen Felder bei Kurzschluß
S	$A \cdot mm^{-2}$	Stromdichte im Kurzschlußfall
S_{th}	$A \cdot mm^{-2}$	Nennkurzzeitstromdichte (Einsekundenstromdichte)
s	–	Schlankheitsgrad
t	–	Anzahl der Teilleiter je Hauptleiter
W	cm^3	Widerstandsmoment des Hauptleiters
W_t	cm^3	Widerstandsmoment des Teilleiters
$\varkappa$	–	Stoßfaktor (s. TGL 200-0604/02)
λ	–	Schubfaktor
σ_h	MPa	Hauptleiter – Biegebeanspruchung
σ_t	MPa	Teilleiter – Biegebeanspruchung
$\sigma_{0,2}$	MPa	Mindestwert der Streckgrenze des Leiterwerkstoffes

Mechanische Kurzschlußfestigkeit

Biegesteife Leiter sind mechanisch kurzschlußstromfest, wenn

- der maximale Stoßkurzschlußstrom nach TGL 200-0604/02 bis TGL 200-0604/03 oder
- der Maximalwert des verminderten Kurzschlußstromes von Begrenzungseinrichtungen,* z. B. kurzschlußstrombegrenzende Leistungsschalter oder Sicherungen,

den zulässigen Stoßkurzschlußstrom nach TGL 200-0606/02 nicht überschreitet.
Betriebsmittel, wie Schaltgeräte, Wandler, Kabel, sind mechanisch kurzschlußstromfest, wenn sie für den an ihrem Einbauort auftretenden maximalen Stoßkurzschlußstrom nach TGL 200-0604/02 oder 03 ausgewählt werden.
Stützpunkte, z. B. Stützer, sind mechanisch kurzschlußstromfest, wenn die nach TGL 200-0606/02 ermittelten Stützpunktkräfte die vom Hersteller der Stützpunkte angegebenen Umbruchkräfte oder mechanischen Kennwerte, z. B. für Hartpapierkämme, nicht überschreiten.

Der Stoßkurzschlußstrom I_s für biegesteife Leiter ergibt sich allgemein aus

$$I_s = \frac{P}{l}\sqrt{Ma}.$$

Für Hochkant- und Flachkantanordnung von Ein- und Zweifachleitern leiten sich aus der Gleichung die in den Tabellen 5.98 und 5.99 eingetragenen Formeln zur Berechnung der zulässigen Stoßkurzschlußströme I_{szul} ab.

Tabelle 5.98: Zulässiger Stoßkurzschlußstrom I_{szul} für Ein- und Zweifachleiter bei Hochkantanordnung

Fehlerart	Zulässiger Stoßkurzschlußstrom I_{szul}				
	Einfachleiter	Zweifachleiter[1]) Anzahl der Zwischenstücke			
		1		2	3
Zweipoliger Kurzschluß	$\frac{31,4}{1}\sqrt{Ma}$	$\frac{41,4}{1}\sqrt{Ma}$[2])		$\frac{43}{1}\sqrt{Ma}$	$\frac{44}{1}\sqrt{Ma}$
Dreipoliger Kurzschluß	$\frac{33,8}{1}\sqrt{Ma}$	$\frac{44,5}{1}\sqrt{Ma}$[2])		$\frac{46,4}{1}\sqrt{Ma}$	$\frac{47,4}{1}\sqrt{Ma}$

[1]) Die Formeln für Zweifachleiter gelten unter der Bedingung $l_t \leqq 100$ cm.
[2]) Die Formeln gelten für Zweifachleiter, wenn $l \leqq 100$ cm und kein Zwischenstück vorhanden ist.

M nach Tabelle 5.100.

Tabelle 5.99: Zulässiger Stoßkurzschlußstrom I_{szul} für Ein- und Zweifachleiter bei Flachkantanordnung

Fehlerart	Zulässiger Stoßkurzschlußstrom I_{szul}	
	Einfachleiter	Zweifachleiter[1])
Zweipoliger Kurzschluß	$\frac{31,4}{1}\sqrt{Ma}$	$\frac{44,2}{1}\sqrt{Ma}$
Dreipoliger Kurzschluß	$\frac{33,8}{1}\sqrt{Ma}$	$\frac{47,5}{1}\sqrt{Ma}$

[1]) Die Formeln für Zweifachleiter gelten unter der Bedingung $l_t \leqq 50$ cm. Ist bei einem Zweifachleiter $l > 50$ cm, so gilt als Bedingung $l_t \leqq 50$ cm.

M nach Tabelle 5.101.

Tabelle 5.100: Zulässiges Biegemoment M in Leitermitte für Hochkantanordnung

Leiterabmessungen[1]) $b \times d$	Zulässiges Biegemoment M				
	Al 99,5 $\varkappa > 1,5$	F 7 $\varkappa \leqq 1,5$	Al 99,5 $\varkappa > 1,5$	F 9 $\varkappa \leqq 1,5$	E-Cu 99,9 F 25
20 × 5	7	7	–	–	15
25 × 5	9	8	14	12	19
30 × 5	11	10	17	15	22,5
40 × 5	14	13	22	20	30
40 × 10	57	50	88	77	142
50 × 10	70	62	109	95	177
60 × 10	84	74	125	112	212
80 × 10	113	98	169	148	283
100 × 10	138	121	213	183	354
120 × 10	163	145	250	218	425
160 × 10	219	192	–	–	567
200 × 10	275	239	–	–	708

[1]) Für Leiterabmessungen, die von den aufgeführten abweichen, sind die zulässigen Biegemomente M im Verhältnis der Widerstandsmomente W umzurechnen.

Beispiel: s. Tabelle 5.101

Tabelle 5.101: Zulässiges Biegemoment M in Leitermitte für Flachkantanordnung[1])

Leiterabmessungen[1])	Zulässiges Biegemoment M				
q	Al 99,5 F 7		Al 99,5 F 9		E-Cu 99,9
	$\varkappa > 1{,}5$	$\varkappa \leqq 1{,}5$	$\varkappa > 1{,}5$	$\varkappa \leqq 1{,}5$	F 25
$b \times d$					
20 × 5	24	21	—	—	80
25 × 5	38	33	58	51	125
30 × 5	54	48	84	73	180
40 × 5	95	85	150	130	320
40 × 10	190	170	300	260	640
50 × 10	297	266	469	407	1000
60 × 10	428	383	675	585	1440
80 × 10	760	680	1200	1040	2560
100 × 10	1188	1064	1876	1628	4000
120 × 10	1712	1532	2700	2340	5760
160 × 10	3040	2720	—	—	10240
200 × 10	4752	4250	—	—	16020

[1]) Für die Flachkantanordnung sind die Werte für die zulässigen Biegemomente M noch mit dem Schubfaktor λ nach Bild 5.36 zu multiplizieren, wenn der Schlankheitsgrad die Bedingung

$$s = \frac{10l}{b} \leqq 9 \quad \text{erfüllt.}$$

Für Leiterabmessungen, die von den aufgeführten abweichen, sind die zulässigen Biegemomente M vor Berücksichtigung des Schubfaktors λ im Verhältnis der Widerstandsmomente W umzurechnen.

Beispiel: Zulässiges Biegemoment für Schienen 30 mm × 10 mm, Al 99,5 F 7, $\varkappa > 1{,}5$:

$$M_{30\times10} = M_{40\times10}\frac{W_{30\times10}}{W_{40\times10}} = 57\ \text{N}\cdot\text{m}\,\frac{0{,}5\ \text{cm}^3}{0{,}666\ \text{cm}^3} = 42{,}8\ \text{N}\cdot\text{m}.$$

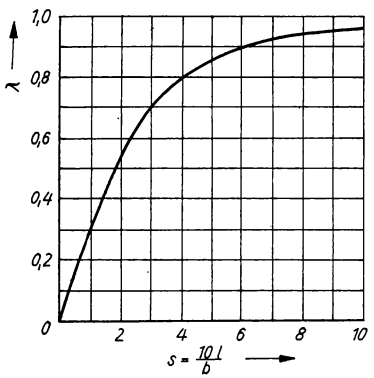


Bild 5.36. Schubfaktor

Für die Berechnung der Kraftwirkungen zwischen den Leitern gelten die Beziehungen

– Hauptleiter in einer Ebene angeordnet

bei zweipoligem Kurzschluß $F_{d(2)} = 0{,}2 \cdot I_{s(2)}^2 \cdot \frac{l}{a}$

bei dreipoligem Kurzschluß $F_{d(3)} = 0{,}176 \cdot I_{s(3)}^2 \cdot \frac{l}{a}$

– Teilleiter $F_t = 0{,}2 \cdot \left(\frac{I_s}{t}\right)^2 \cdot \frac{l_t}{a_t}$

Die Hauptleiter-Biegebeanspruchung ergibt sich zu

$$\sigma_h = \frac{F_{d(s,3)} \cdot l}{12W}$$

Die Teilleiter-Biegebeanspruchung ergibt sich zu

$$\sigma_t = \frac{F_t \cdot l_t}{12W_t}$$

Dabei gilt

$$\sigma_h + \sigma_t \leqq 2\sigma_{0,2}$$
$$\sigma_t \leqq \sigma_{0,2}$$

Für Einzelleiter gilt

$$\sigma_h \leqq 2\sigma_{0,2}$$

Bei Erreichen der vorstehend genannten Beanspruchung kann eine geringe Verformung der Leiter zurückbleiben, die jedoch die Betriebssicherheit nicht beeinträchtigt.
Das Beispiel einer Leiteranordnung zeigt Bild 5.37.

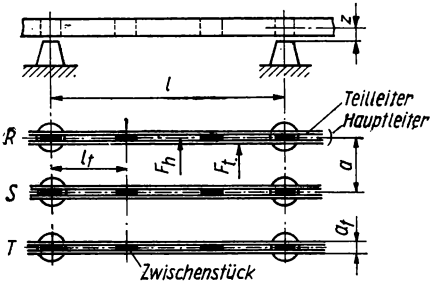


Bild 5.37. Beispiel einer Leiteranordnung

Festigkeitseigenschaften gebräuchlicher Flachprofile aus Al enthält Tabelle 5.102.

Tabelle 5.102: Festigkeitseigenschaften der im Schaltanlagenbau üblichen Flachprofile aus Al

Kurzzeichen	Abmessungen		Streckgrenze	
	Dicke	Breite	mindestens $\sigma_{0,2}$	höchstens $\sigma'_{0,2}$
	mm	mm	MPa	MPa
E-Al F 6,5	alle	alle	35	45
E-Al F 9	bis 10	bis 120	70	90

Bei Mehrfachleitern muß der Zwischenstückabstand so gewählt werden, daß die Teilleiterbiegespannung nicht die Streckgrenze überschreitet. Für die Berechnung ist der Abstand zwischen Stützpunkt und benachbartem Zwischenstück einzusetzen.
Zwischenstücke sind so einzubauen, daß sie Zusammendrücken und Längsverschieben der Teilleiter verhindern. Tritt die Kraftwirkung nach Bild 5.38a in Richtung der Schienenhöhe auf, ist das Widerstandsmoment des Hauptleiters gleich der Summe der Teilleiterwiderstandsmomente. Die Zwischenstücke nehmen keinen Einfluß.

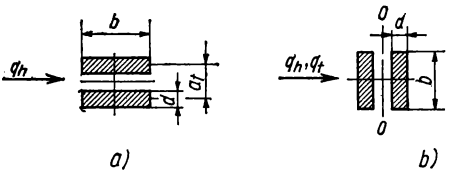
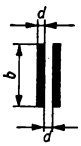
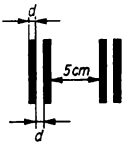
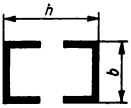


Bild 5.38. Kraftwirkung bei Leiterpaketen
a) in Richtung der Schienenhöhe, b) senkrecht zur Schienenhöhe

Bei der Kraftwirkung nach Bild 5.38b gilt die Summierung der Widerstandsmomente der Teilleiter nur, wenn kein oder nur ein Zwischenstück eingebaut ist. Sind mehrere Zwischenstücke eingebaut, so können bei Schienenpaketen aus Rechteckquerschnitten 60% und bei Schienenpaketen aus Profilquerschnitten 50% der auf die Achse 0—0 bezogenen Widerstandsmomente eingesetzt werden.
Für die in Tabelle 5.103 nicht enthaltenen Leiterabmessungen und -anordnungen ist der wirksame Teilleitermittenabstand nach TGL 200-0606/02, Abschn. 2., zu berechnen.

Tabelle 5.103: Wirksamer Teilleitermittenabstand a_t in cm

Sammelschienen-darstellung	Schienen-dicke d cm	Schienenbreite b in cm 4	5	6	8	10	12	16	20
	0,5	2,0	2,4	2,7	3,3	4,0	—	—	—
	1	2,8	3,1	3,4	4,1	4,7	5,4	6,7	8,0
	0,5	—	1,3	1,5	1,8	2,2	—	—	—
	1	1,7	1,9	2,0	2,3	2,7	3,0	3,7	4,3
	0,5	—	1,4	1,5	1,8	2,0	—	—	—
	1	1,74	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	3,2	—
	—	Profilgröße (Maß b in cm)[1] [6	[8	[10	[12	[14	[16	[18	[20
		7,9	9,4	10	12	14	16	18	20

[1]) Die angegebenen Werte a_t gelten für [6, wenn h = 8,5 cm; für [8, wenn h = 10 cm ist; für [10 bis [20, wenn b = h ist.

Thermische Kurzschlußfestigkeit

Betriebsmittel, wie Schaltgeräte, Wandler, Kabel, sind thermisch kurzschlußstromfest, wenn der an ihrem Einbauort auftretende thermisch wirksame Mittelwert I_m oder I_{ms}

— des Kurzschlußstromes nach TGL 200-0604/02, 03

oder

— des verminderten Kurzschlußstromes nach Begrenzungseinrichtungen, z. B. kurzschlußstrombegrenzende Leistungsschalter oder Sicherungen

den vom Hersteller angegebenen Nennkurzzeitstrom $\hat{I}_{th}$ nicht überschreitet.
Nicht isolierte Leiter, Kabel und Leitungen sind thermisch kurzschlußfest, wenn in Wechselspannungsanlagen folgende Bedingung eingehalten wird:

$S \leqq S_{th}$

Dabei gilt:

$S = I_m/A$

Bei der Ermittlung von A für Al/St-Seile darf der Querschnitt der Stahlleiter nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 5.104: Leitergrenztemperatur bei Kurzschluß

Art des Leiters	Werkstoff	ϑ_g °C
Nicht isolierte biegesteife Leiter[1])	Kupfer	200
Leiterseile mit einer Zugspannung < 10 MPa	Aluminium	180
	Stahl	200
Leiterseile mit einer Zugspannung ≧ 10 MPa	Kupfer	170
	Aluminium	130
	Al/Stahl	160
	Stahl	200
Starkstromkabel	nach TGL 200-1750/02	
Starkstromleitungen	nach TGL 200-0613/02	

[1]) Für Schaltgeräte, Wandler u. ä. Betriebsmittel gelten die vom Hersteller angegebenen Leitergrenztemperaturen bei Kurzschluß.

Längenänderung von Stromschienen

Durch die Stromwärme findet eine Längenänderung der Leiter oder der Leiterpakete statt. Die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ der Leiter zwischen Raumtemperatur (Montage der Leiter) und

(weiter auf S. 372)

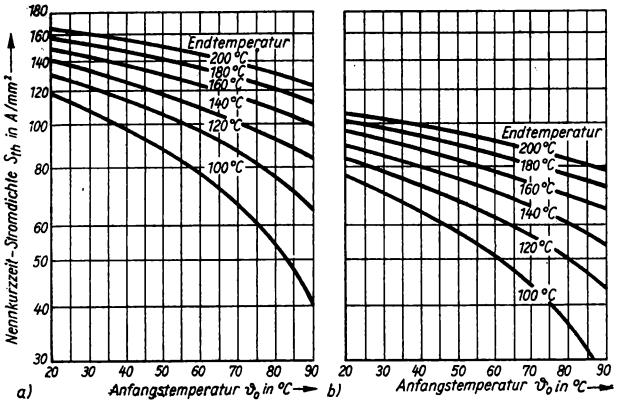
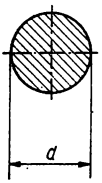


Bild 5.39. Nennkurzzeitstromdichte
a) für Kupfer, b) für Aluminium

Tabelle 5.105: Belastbarkeit von Rundkupfer[1])



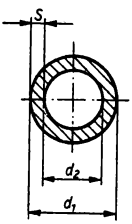
Durchmesser d	Querschnitt A	Masse m je m	Belastung I in A (dauernd) Wechselstrom 40···60 Hz		Gleichstrom	
			gestrichen	blank	gestrichen	blank
mm	mm²	kg				
6	28,27	0,252	125	120	125	120
8	50,27	0,447	160	150	160	150
10	78,54	0,699	250	210	250	210
16	201,1	1,789	480	410	480	410
20	314,2	2,796	640	540	660	550
30	706,9	6,291	1100	900	1150	950

[1]) **Rundkupfer**, gezogen in Stangen für Stromschienen in Schaltanlagen, nach TGL 10078

Tabelle 5.106: Belastbarkeit von Rundaluminium

Bild wie in Tabelle 5.105	Durchmesser d	Querschnitt A	Masse m je m	Belastung I in A (dauernd) Wechselstrom 40···60 Hz		Gleichstrom	
				gestrichen	blank	gestrichen	blank
	mm	mm²	kg				
	6	28,3	0,0763	65	60	65	60
	10	78,54	0,21	200	160	200	160
	16	201,1	0,54	380	316	380	315
	20	314,2	0,85	500	410	500	420
	30	706,9	1,91	870	690	900	720

Tabelle 5.107: Belastbarkeit von Kupferrohren



Durchmesser d_1	Durchmesser d_2	Wanddicke s	Querschnitt A	Masse m je m	Belastung I in A (dauernd) Gleich- und Wechselstrom Innenraum		Wechselstrom 40···60 Hz Freiluft	
					gestrichen	blank	gestrichen	blank
mm	mm	mm	mm²	kg				
20	16	2	113,1	1,01	360	325	450	400
	14	3	160,2	1,43	430	400	530	500
	12	4	201,0	1,79	480	430	600	550
30	26	2	175,9	1,57	550	500	680	620
	24	3	254,5	2,26	650	600	800	750
	22	4	326,7	2,90	800	650	1000	800
50	44	3	443,0	3,94	1100	950	1350	1200
	42	4	578,1	5,15	1200	1100	1500	1400
	40	5	706,9	6,29	1400	1200	1700	1500
60	54	3	537,2	4,78	1250	1200	1600	1400
	52	4	703,7	6,26	1500	1300	1800	1600
	50	5	863,9	7,69	1600	1450	2000	1800

Tabelle 5.108: Belastbarkeit von Aluminiumrohren

Bild wie in Tabelle 5.107	Durchmesser d_1	Durchmesser d_2	Wanddicke s	Querschnitt A	Masse m je m	Belastung I in A (dauernd) Gleich- und Wechselstrom Innenraum		Wechselstrom 40···60 Hz Freiluft	
						gestrichen	blank	gestrichen	blank
	mm	mm	mm	mm²	kg				
	20	16	2	113,1	0,305	280	230	350	270
		14	3	160,2	0,43	350	285	430	340
		12	4	201,0	0,54	385	320	475	375
	30	26	2	175,9	0,475	430	350	530	420
		24	3	254,5	0,69	520	420	640	500
		22	4	326,7	0,88	580	470	720	560
	50	44	3	443,0	1,20	850	670	1000	810
		42	4	578,1	1,56	970	770	1200	920
		40	5	706,9	1,91	1000	820	1300	990
	60	54	3	537,2	1,45	1000	800	1240	960
		52	4	703,7	1,90	1150	920	1450	1100
		50	5	863,9	2,33	1275	1000	1600	1200

Tabelle 5.109: Belastbarkeit von rechteckigen Kupferschienen

Breite × Dicke	Quer-schnitt A	Masse m je m	Belastung I in A (dauernd)															
			Wechselstrom 40···60 Hz								Gleichstrom							
			gestrichen				blank				gestrichen				blank			
			Schienenzahl				Schienenzahl				Schienenzahl				Schienenzahl			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
																		
mm × mm	mm²	kg																
12 × 2	24	0,21	125	225			110	200			130	230			120	210		
15 × 2	30	0,27	155	270			140	240			160	280			145	255		
15 × 3	45	0,40	185	330			170	300			195	335			175	305		
20 × 2	40	0,36	205	350			185	315			210	370			190	330		
20 × 3	60	0,53	245	425			220	380			250	435			225	395		
20 × 5	100	0,89	325	550			290	495			330	570			300	515		
25 × 3	75	0,67	300	510			270	460			310	530			275	485		
25 × 5	125	1,11	385	670			350	600			400	680			360	620		
30 × 3	90	0,80	350	600			315	540			360	630			325	570		
30 × 5	150	1,34	450	780			400	700			475	800			425	725		
40 × 3	120	1,07	460	780			420	710			470	820			425	740		
40 × 5	200	1,78	600	1000			520	900			600	1030			550	935		
40 × 10	400	3,56	835	1500	2060	2800	750	1350	1850	2500	870	1550	2180		800	1395	1950	
50 × 5	250	2,23	700	1200	1750	2300	630	1100	1550	2100	740	1270	1870		650	1150	1700	
50 × 10	500	4,45	1024	1800	2450	3330	920	1620	2200	3000	1070	1900	2700		1000	1700	2400	
60 × 5	300	2,67	825	1400	1980	2650	750	1300	1800	2400	870	1500	2200	2700	780	1400	1900	2500
60 × 10	600	5,34	1200	2100	2800	3800	1100	1860	2500	3400	1250	2200	3100	3900	1100	2000	2800	3500
80 × 5	400	3,56	1060	1800	2450	3300	950	1650	2200	2900	1150	2000	2800	3500	1000	1800	2500	3200
80 × 10	800	7,12	1540	2600	3450	4600	1400	2300	3100	4200	1650	2800	4000	5100	1450	2600	3600	4500
100 × 5	500	4,45	1310	2200	2950	3800	1100	2000	2600	3400	1400	2500	3400	4300	1250	2250	3000	3900
100 × 10	1000	8,90	1880	3100	4000	5400	1700	2700	3600	4800	2000	3600	4900	6200	1700	3200	4400	5600
120 × 10	1200	10,68	2200	3500	4600	6100	2000	3200	4200	5500	2300	4200	5700	7400	2100	3700	5200	6600
160 × 10	1600	14,24	2880	4400	5800	7800	2600	3900	5200	7000	3100	5400	7500	9600	2800	4900	6750	8600
200 × 10	2000	17,80									3800	6700	9200	11700	3400	6000	8300	10500

Tabelle 5.110: Belastbarkeit von rechteckigen Aluminiumschienen

Breite × Dicke	Quer-schnitt A	Masse m je m	Belastung I in A (dauernd)															
			Wechselstrom 40···60 Hz								Gleichstrom							
			gestrichen				blank				gestrichen				blank			
			Schienenzahl				Schienenzahl				Schienenzahl				Schienenzahl			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
																		
mm × mm	mm²	kg	I	II	III	II II	I	II	III	II II	I	II	III	IIII	I	II	III	IIII
12 × 2	24	0,065	100	180			80	140			105	185			80	145		
15 × 2	30	0,081	125	215			95	170			130	225			95	175		
15 × 3	45	0,122	150	265			115	210			155	270			115	220		
20 × 2	40	0,108	165	280			120	220			170	295			125	225		
20 × 3	60	0,162	195	340			145	270			200	350			150	280		
20 × 5	100	0,270	260	440			195	350			270	460			200	370		
25 × 3	75	0,202	240	410			180	330			245	430			185	340		
25 × 5	125	0,338	310	535			230	430			320	550			235	440		
30 × 3	90	0,243	280	480			205	385			290	500			220	400		
30 × 5	150	0,405	360	625			270	500			380	645			275	520		
40 × 3	120	0,324	370	630			280	500			380	660			285	525		
40 × 5	200	0,540	460	800			350	650			485	830			360	660		
40 × 10	400	1,08	670	1200	1650	2250	515	975	1350	1800	700	1240	1750		540	1000	1420	
50 × 5	250	0,675	560	970	1400	1850	425	780	1120	1500	590	1020	1500		445	815	1220	
50 × 10	500	1,35	820	1440	1960	2660	625	1150	1600	2160	850	1520	2140		655	1215	1730	
60 × 5	300	0,810	660	1130	1580	2120	500	900	1300	1730	700	1210	1700	2200	530	960	1420	1850
60 × 10	600	1,62	960	1650	2230	3040	730	1300	1850	2500	1000	1790	2500	3150	770	1430	2030	2600
80 × 5	400	1,08	850	1450	1950	2600	650	1170	1650	2130	910	1600	2200	2800	700	1260	1850	2400
80 × 10	800	2,16	1230	2100	2760	3680	930	1650	2300	3100	1300	2300	3200	4100	985	1840	2640	3400
100 × 5	500	1,35	1050	1750	2350	3000	775	1400	2000	2500	1120	2000	2700	3400	855	1550	2220	2900
100 × 10	1000	2,70	1500	2450	3200	4300	1100	1950	2700	3700	1580	2800	3900	5000	1200	2240	3200	4200
120 × 10	1200	3,24	1760	2800	3700	4900	1310	2350	3100	4300	1875	3300	4600	5900	1420	2640	3800	5000
160 × 10	1600	4,32	2300	3500	4650	6200	1700	2950	3900	5500	2400	4350	6000	7600	1850	3450	5000	6500
200 × 10	2000	5,40									3050	5400	7400	9400	2300	4300	6200	8060

Betriebstemperatur (Belastung mit dem Betriebsstrom) ergibt eine Längenänderung

$$\Delta l = \alpha_L \cdot l_0 \cdot \Delta\vartheta.$$

Δl Längenänderung in mm, α_L linearer Ausdehnungskoeffizient in mm/(m · K), $\Delta\vartheta$ Temperaturdifferenz zwischen Anfangs- und Endtemperatur in K

Als Richtwert bei einer Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = 50$ K und einer Leiterlänge von $l_0 = 10$ m gilt:

für Kupfer $\Delta l = 8{,}5$ mm,
für Aluminium $\Delta l = 11{,}5$ mm.

5.3.6. Allgemeine Errichtungsvorschriften

Es gelten folgende wichtige Standards:

»Allgemeine Errichtungsvorschriften«

TGL 200-0601/01 Begriffe
TGL 200-0601/02 Allgemeine technische Forderungen
TGL 200-0601/03 Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Wechselspannung oder bis 1500 V Gleichspannung
TGL 200-0601/04 Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV Ws oder über 1,5 kV Gs
TGL 200-0601/06 Kennzeichnen von Gefahrenstellen, Anbringen von Aushängen

«Anschluß von Starkstrom-Abnehmeranlagen an die Ve sorgungsanlage des Energieversorgungsbetriebes«

TGL 190-240/01 Begriffe
TGL 190-240/02 Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V
TGL 190-240/03 Einsatz elektrotechnischer Geräte

5.3.6.1. Allgemeine technische Forderungen

Grundforderungen

Elektrotechnische Anlagen sind unter Einhaltung der hierfür geltenden gesetzlichen Bestimmungen und der vom Hersteller elektrotechnischer Betriebsmittel oder Anlagen erlassenen Vorschriften zu errichten. Es ist zu gewährleisten, daß unter Berücksichtigung der am Einsatzort gegebenen Umweltbedingungen und der auftretenden mechanischen, thermischen und elektrischen Beanspruchungen die erforderliche Funktionssicherheit und Schutzgüte der Anlagen gegeben sind.
Die zu verwendenden Isolierstoffe müssen unter Berücksichtigung der am Einsatzort auftretenden elektrischen, mechanischen, chemischen, thermischen und klimatischen Bedingungen das für den störungsfreien Betrieb der Anlagen erforderliche Isoliervermögen haben.

Elektrotechnische Anlagen sind so zu errichten, daß sie

— gefahrlos bedient und gewartet werden können,
— ausreichenden Platz für den Transport der auszuwechselnden Betriebsmittel bieten und
— im Gefahrenfall ein ungehindertes Verlassen der Anlagen ermöglichen.

Sicherungskreise sowie Schalt- und Verteilungsanlagen, z. B. deren Schaltfelder, Einschübe, Betätigungs- und Meldeeinrichtungen, sind so zu bezeichnen, daß eine ordnungsgemäße Bedienung und Instandhaltung der Anlagen gewährleistet ist.
Einrichtungen und Aushänge für den Arbeitsschutz, wie Trennwände, Schutzleisten, Hochspannungsprüfer, Schaltstangen, Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen, Warn- und Hinweisschilder, Verhaltensvorschriften sowie Einrichtungen zur Ersten Hilfe sind Bestandteil der Anlage.
Die in elektrotechnischen Anlagen eingesetzten Betriebsmittel, wie Geräte, Leitungen und Kabel, müssen den für sie geltenden gesetzlichen Bestimmungen entsprechen.
Werden diese Betriebsmittel importiert, dann müssen sie gemäß der »Anordnung über die Approbation elektrotechnischer Importerzeugnisse in der DDR« approbiert sein und die Forderungen der »Arbeitsschutz« und Brandschutzanordnung 4 — Schutzgüte beim Import von Arbeitsmitteln und Lizenzen — « erfüllen.
Räume, in denen sich Rohrleitungen für flüssige und/oder gasförmige Medien, wie Wasser, Dampf und brennbare Gase, befinden, die nicht unmittelbar zur elektrotechnischen Anlage gehören, dürfen nur dann als elektrotechnischer oder abgeschlossener elektrotechnischer Betriebsraum genutzt werden, wenn — erforderlichenfalls durch zusätzliche Maßnahmen, wie Verkleidungen, Abflußrinnen und/oder Entlüftungsöffnungen, sichergestellt —

— Störungen an diesen Rohrleitungen und Armaturen die Funktion der elektrotechnischen Anlagen nicht beeinträchtigen und
— Instandhaltungsmaßnahmen am Rohrleitungssystem, wie Revisionen und Reparaturen, ohne Gefährdung durch die elektrotechnischen Anlagen durchgeführt werden können.

Klimabedingung

Elektrotechnische Anlagen müssen unter den durch die jeweilige Ausführungsklasse nach Tabelle 5.111 festgelegten Beanspruchungen und den in Abhängigkeit von der Aufstellungskategorie in TGL 9200/01 festgelegten Zusatzbeanspruchungen funktionssicher und ohne Beeinträchtigung der Schutzgüte in bezug auf den Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz betrieben werden können.

Tabelle 5.111: Ausführungsklassen von elektrotechnischen Anlagen[1])

Art der Anlage	Aufstellungskategorie (AK) nach TGL 9200/01	Ausführungsklasse
Außenanlage	AK I	N I
	AK II	N II
Innenanlage	AK III	N III

[1]) Werden elektrotechnische Anlagen z. B. in klimatisierten Räumen betrieben oder resultieren die klimatischen Bedingungen aus technischen oder technologischen Prozessen wie Stromwärme, so erfolgt die Klassifizierung nach TGL 9200/03.

Bei speziellen klimatischen Bedingungen sind die Festlegungen nach TGL 200-0601/02, Abschnitt 2.2., zu beachten. Vorstehende Festlegungen gelten nicht für Lagerung und Transport von Anlagen. Sind besondere Maßnahmen einzuhalten, so hat der Hersteller diese in entsprechenden Vorschriften festzulegen.

Leiterkennzeichnung

Nicht isolierte Leiter, außer denen zwischen Elektrolysezellen, müssen in Starkstromanlagen auf ihrer sichtbaren Länge farbig gekennzeichnet sein.
Eine unterbrochene (intermittierende) Farbkennzeichnung oder die alleinige Kennzeichnung der Leiter an den Anschlußstellen, z. B. durch gut haftende, temperatur- und klimabeständige Bänder oder Schiebebilder, ist zulässig, sofern

— der Farbauftrag auf der gesamten Leiterlänge nicht der intensiveren Wärmestrahlung (Erhöhung der Strombelastbarkeit) und/oder dem Korrosionsschutz zu dienen hat und
— dadurch keine Beeinträchtigung der Übersichtlichkeit und Sicherheit beim Bedienen und Instandhalten der Anlage eintritt.

Bei der unterbrochenen Leiterkennzeichnung sind die Abstände für die farbigen Zeichen nach dem visuellen Eindruck festzulegen.
Es gelten die Kennfarben nach Tabelle 5.112 (jedoch nicht für Anlagen auf Schiffen!).
Bei Leiterseilen darf die Kennzeichnung an den Anschlußstellen oder Aufhängepunkten der Leiterseile erfolgen. Das gilt auch für Leiter mit Dauerbetriebs-Temperaturen > 80 °C.

Für Freileitungsanlagen gilt TGL 200-0614/02, 03
Für Fahrleitungsanlagen gilt TGL 200-0632/01···03

Leiter, die verschiedene Polarität haben können, z. B. hinter Polumschaltern, sind so zu kennzeichnen, daß Verwechslungen mit Schutzleitern, Erdungs- und Potentialausgleichleitungen ausgeschlossen sind.
Ist ein Leiter unmittelbar betriebsmäßig geerdet, so ist dieser zusätzlich mit schwarzen (Kennfarbe: Schwarz 1010 nach TGL 21196), etwa 10 mm breiten Querstreifen in Abständen von höchstens 500 mm zu kennzeichnen. Bei der unterbrochenen Leiterkennzeichnung genügt *ein* schwarzer Querstreifen an den farbigen Stellen.

Tabelle 5.112: Leiterkennfarben

Stromart	Leiterbezeichnung	Leiterkennzeichnung		
			Kennfarbe nach TGL 21196	
		Symbol	Farbname	Farbnummer
Gleichstrom	Positiver Leiter	+	Signalrot	0605
	Negativer Leiter	–	Stahlblau	1655
	Neutraler Leiter	N	Cremeweiß	0200
Drehstrom	Außenleiter	R	Chromgelb	0209
		S	Mittelgrün	2256
		T	Violett	1136
	Indifferenter Leiter	R/S/T	Orange	0408
	Neutraler Leiter	N	Hellblau	

Nicht isolierte Erdungsleitungen und nicht isolierte Schutzleiter sind nach TGL 200-0603/02 zu kennzeichnen.
Ausnahme nach TGL 200-0602/03.
Nicht isolierte Potentialausgleichleitungen nach TGL 200-0602 brauchen nicht gekennzeichnet zu werden.

Stromschienenanordnungen in Drehstrom-Innenanlagen

Die *Zählweise* R–S–T– waagerecht oder schräg zueinander angeordneter Stromschienen hat, von der Bedienungsseite der Anlage aus gesehen, vorzugsweise von *links nach rechts* oder von *vorn nach hinten* und bei senkrecht übereinander angeordneten Stromschienen vorzugsweise von *oben nach unten* zu erfolgen.
Beispiele: Bild 5.40

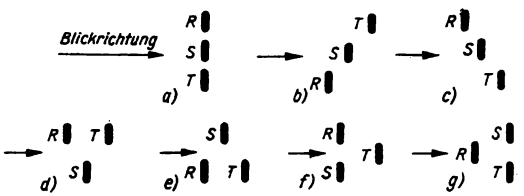


Bild 5.40. Beispiele für die Anordnung der Sammelschienen in Drehstromanlagen

Bei Doppelsammelschienensystemen mit waagerecht angeordneten Sammelschienen ist für das System I von der Bedienungsseite, für das System II von der Arbeitsseite aus von *vorn nach hinten* zu zählen. *Beispiel:* Bild 5.41
Ist die Anlage auf der Bedienungsseite so gekapselt, daß die Stromschienen von hier aus unzugänglich sind, so gilt als Bezugsseite der Zählweise die Arbeitsseite.
Bei Mehrfachsammelschienensystemen ist das der Bedienungsseite am nächsten liegende System als System I zu bezeichnen.
Vorstehende Festlegungen gelten nicht bei Erweiterung bestehender Anlagen mit anderen Zählweisen.

5.3.6.2. Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Ws oder bis 1,5 kV Gs

Luft- und Kriechstrecken

Für Luft- und Kriechstrecken betriebsmäßig unter Spannung stehender Teile gegeneinander und gegen andere leitfähige Teile gilt TGL 16559, Tabelle 1, Gruppe 5. Eine Übersicht zeigt Tabelle 5.113.
Bei unterschiedlichen Nennspannungen sind die Luft- und Kriechstrecken nach der höheren Nennspannung auszuwählen.

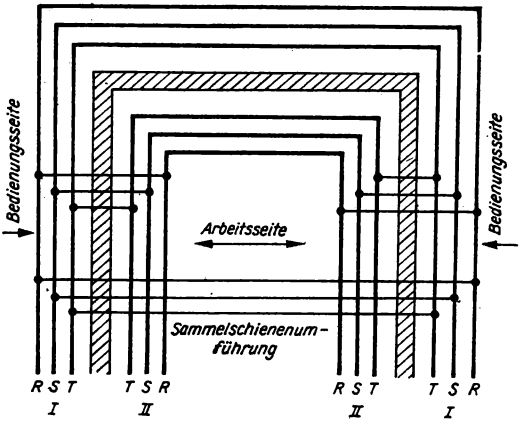


Bild 5.41. Beispiel für die Anordnung der Sammelschienen bei Umführungen

Tabelle 5.113: Einteilung der Kriechstrecken nach Gestaltung und Isolierstoffen

Kriechstrecken		Isolierstoffe
ohne Rippen ohne Nuten	mit Rippen mit Nuten	mit Kriechstromfestigkeit nach TGL 200-0018
a		anorganische Isolierstoffe
	a	Stufe B = 500
$\frac{a+b}{2}$		Stufe B = 300 bis Stufe B = 500
b	$\frac{a+b}{2}$	Stufe B = 100 bis Stufe B = 300

Die Werte der Tabelle 5.113 sind entsprechend zu vergrößern, wenn die Forderungen nach TGL 200-0601/03, Abschn. 1.2., einzuhalten sind. Das trifft z. B. zu, wenn

– die mechanische Kurzschlußfestigkeit dieses erfordert,
– das Isoliervermögen der Luft vermindert ist,
– die nicht isolierten Leiter den unmittelbaren Witterungseinflüssen ausgesetzt sind. In diesem Fall gilt als Mindestluftstrecke 50 mm.

Für fabrikfertige Baueinheiten und innerhalb von Anschlußzonen von Bauelementen, Geräten und fabrikfertigen Baueinheiten sind kleinere Luft- und Kriechstrecken zulässig (s. hierzu TGL 200-0601/03, Abschn. 1.3.).
Die Mindestabstände zwischen Teilen, die dem Berührungsschutz dienen, und spannungsführenden Teilen sind TGL 200-0602/02 zu entnehmen

Bedienungs- und Arbeitsgänge

Für die Mindestbreite und -höhe von Bedienungs- und Arbeitsgängen, außer in Elektrolyseanlagen, gelten die Abmessungen nach Tabelle 5.114. Durch in den Gang hineinragende Bedienelemente, Bauteile u. dgl. darf die Mindestgangbreite nur bis auf die in Tabelle 5.114 eingeklammerten Abmessungen verringert werden. *Beispiele:* Bild 5.42
Für die Mindestgangbreiten und -höhen in Wartenräumen gilt TGL 25081.
Anlagen, deren Türflügel beim Öffnen der Türen in den Bedienungs- oder Arbeitsgang hineinragen und deren Öffnungsrichtung mit der Richtung des Evakuierungsweges zusammenfällt, sind so weit von der gegenüberliegenden Seite, z. B. einer Wand, einem Geländer oder einer Anlage, aufzustellen, daß

Tabelle 5.114: Abmessungen von Bedienungs- und Arbeitsgängen (in mm)

Art der Anlage	Bedienungsgang		Arbeitsgang	
	Breite	Höhe	Breite	Höhe
Ortsfest stationierte Anlage	800 (700)	2000	600 (500)	2000
Anlage für ortsveränderlichen Einsatz, z. B. auf Fahrzeugen	500 (450)	1800	500 (450)	1800

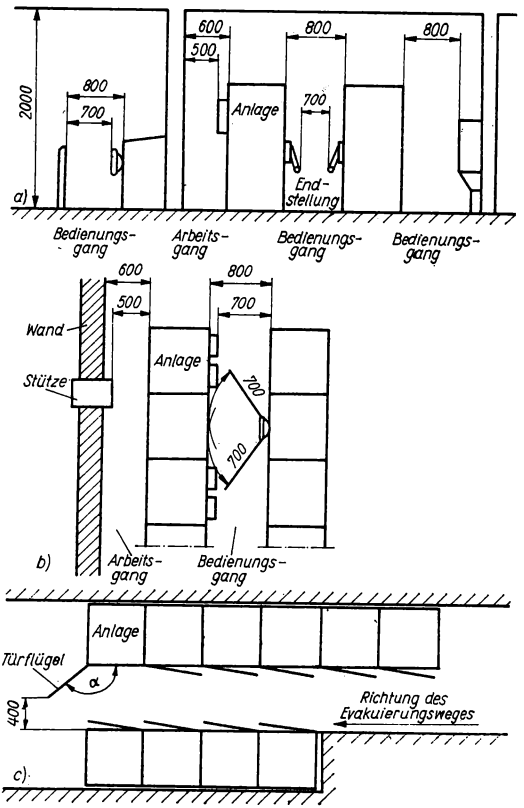


Bild 5.42. Beispiel für Bedienungs- und Arbeitsgänge
α maximaler Öffnungswinkel des Türflügels

bei maximal ausgeschwenktem Türflügel eine lichte Evakuierungsbreite von mindestens 400 mm verbleibt. *Beispiel:* Bild 5.42
Dieses Mindestmaß gilt auch für Anlagen mit Einschüben, ausschwenkbaren Chassis, Bindern u. dgl. sowie für Anlagen, bei denen die Türflügel in Offenstellung arretiert werden können. Ausnahme nach TGL 200-0632/02.
Stehen sich zwei Anlagen, z. B. zwei Niederspannungs- oder eine Niederspannungs- und eine Hochspannungsanlage, gegenüber, bei denen die Öffnungsrichtung der Türflügel mit der Richtung des Evakuierungsweges zusammenfällt oder bei denen die Türflügel in Offenstellung arretiert und/oder Chassis, Binder u. dgl. ausgeschwenkt werden können, so braucht zur Ermittlung der Mindest-Evakuierungswegbreite nach TGL 200-0601/03, Abschn. 2.2., lediglich jener lichte Abstand zugrunde gelegt zu werden, der sich zwischen den ausgeschwenkten oder arretierten Türflügeln, Chassis, Bindern u. dgl. *einer* Anlagenseite und der *geschlossenen* anderen Anlagenseite ergibt.

Bedienungs- und Arbeitsgänge über 20 m Länge müssen an beiden Enden zugänglich sein.
Bedienungs- und Arbeitsgänge zwischen Niederspannungs- und Hochspannungsanlagen sind nach TGL 200-0601/04 zu bemessen.

Drehfeld an Drehstromsteckdosen

Drehstromsteckdosen sind so anzuschließen, daß sich eine Phasenfolge

— im Uhrzeigersinn ergibt, wenn die Steckbuchsen der Außenleiter im Dreieck (Kreis) angeordnet sind,
— von links nach rechts ergibt, wenn die Steckbuchsen der Außenleiter in einer horizontal liegenden Geraden so angeordnet sind, daß sich der Schutzkontakt unterhalb der Außenleiter-Steckbuchsen oder rechts von diesen befindet.

Bei Drehung der Steckdosen aus dieser Lage gilt diese Festlegung sinngemäß.

Bei Erweiterungen oder Änderungen bestehender Anlagen müssen die Drehstromsteckdosen in der bestehenden Anlage ebenfalls den vorstehenden Bedingungen entsprechen.
Steckverbinder sind an Verlängerungsleitungen so anzuschließen, daß die Phasenfolge nicht verändert wird.

5.3.6.3. Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV Ws oder über 1,5 kV Gs

Trennstrecken

Alle Teile einer Anlage müssen nach TGL 200-0619/01 freigeschaltet werden können. Die Trennstrecken müssen TGL 16441/02 entsprechen oder als Abstand die 1,2fachen Werte nach Tabelle 5.115 für Luftstrecken besitzen.
In Einspeisungen sind Trennstrecken vor und hinter dem freizuschaltenden Anlagenteil vorzusehen, z. B. nach den Bildern 5.43a) und 5.43b). Die Trennstrecke darf sich auch in benachbarten Anlagen befinden, z. B. nach den Bildern 5.43c) und 5.43d). Ist keine Rückspeisung möglich, so genügt eine Freischaltung, z. B. nach den Bildern 5.43e) und 5.43f).
Dürfen Anlagen als Ganzes freigeschaltet werden, so genügt eine Freischaltung nach Bild 5.43g).

Vorrichtungen zum Erden und Kurzschließen

Jeder Anlagenteil muß geerdet und kurzgeschlossen werden können. Hierfür sind stationäre Vorrichtungen zum Erden und Kurzschließen, z. B. *Erdungstrenner*, oder Anschlußmöglichkeiten für ortsveränderliche Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen, z. B. *Kugelfestpunkte*, vorzusehen.
Vorrichtungen zum Erden und Kurzschließen müssen den örtlichen Kurzschlußbeanspruchungen entsprechen.
Es dürfen nur maximal 2 ortsveränderliche Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen mit gleichen elektrischen Kennwerten parallel geschaltet werden.
Wird damit die Kurzschlußfestigkeit nicht erreicht, so sind Erdungs- und Kurzschließschienen vorzusehen. Dabei müssen Anschlußmöglichkeiten für eine ortsveränderliche Erdungs- und Kurzschließvorrichtung vorgesehen werden, die nicht kurzschlußfest zu sein braucht.
Anschlußmöglichkeiten für Vorrichtungen zum Erden und Kurzschließen müssen in der Anlage so vorgesehen werden, daß das Erden und Kurzschließen in allen Richtungen, von denen die Anlage unter Spannung gesetzt werden kann, möglich ist.
Für das Erden von Freileitungen und Kabeln sind in Schaltanlagen stationäre Vorrichtungen zum Erden und Kurzschließen vorzusehen, wenn das Erden mit ortsveränderlichen Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen nicht ohne Gefährdung des Bedienungspersonals möglich ist. Besteht keine Möglichkeit, den spannungsfreien Zustand festzustellen, so muß die stationäre Vorrichtung zum Erden und Kurzschließen so ausgelegt sein, daß diese auch nach dem Einschalten auf eine unter Spannung stehende Anlage noch voll wirksam ist.
Zwischen einem zu erdenden und kurzzuschließenden Anlageteil und Vorrichtungen zum Erden und Kurzschließen dürfen auch Trenn- und Schaltstrecken angeordnet sein, wenn gewährleistet ist, daß für die Dauer der Arbeiten der Anlageteil mit der Vorrichtung zum Erden und Kurzschließen geerdet und kurzgeschlossen bleibt sowie die unbeabsichtigte Betätigung der dazwischenliegenden Trenn- und Schaltstrecken sicher verhindert werden kann.
Wird der spannungsfreie Zustand eines freigeschalteten Anlageteiles durch eine geerdete, kurzschlußfeste Abschottung in der geöffneten Trennstrecke gewährleistet, so sind stationäre oder Anschlußmöglichkeiten für ortsveränderliche Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen nicht vorzusehen.

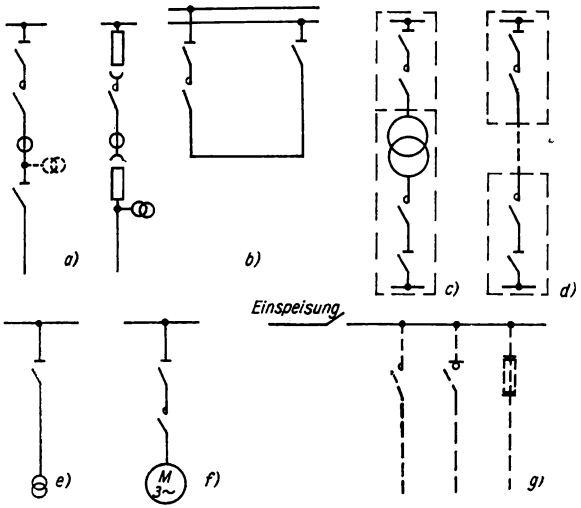


Bild 5.43. Beispiele für das Freischalten von Anlageteilen mit Hilfe von Trennstrecken

Anlageteile, die sich nach dem Freischalten nicht selbsttätig entladen oder nicht durch Erdungsvorrichtungen entladen werden können, müssen spezielle Einrichtungen zur Entladung erhalten.

Luftstrecken

Tabelle 5.115: Mindestwerte für Luftstrecken

Nennspannung in kV		10	20	30	110	220	380
Isolationsspannung in kV		12	24	36	123	245	420
Art der Sternpunkterdung		nicht wirksam oder wirksam				wirksam	
Luftstrecke zwischen unter Spannung stehenden Teilen eines Systems gegeneinander und gegen geerdete Teile in mm	e_1	105	180	290	950	1550	2700
	e_{11}	150	215	325	1100	1850	2900

e_1: Abstände unter Spannung stehender Teile eines Systems gegeneinander und gegen geerdete Teile bei Anlagen mit voll wirksamen Überspannungsschutzeinrichtungen,
e_{11}: Abstände bei Anlagen, die äußeren Überspannungen ausgesetzt sind und keinen voll wirksamen Überspannungsschutz besitzen.

Für Abstände zwischen unter Spannung stehenden Anlageteilen gleicher Nennspannung, die asynchron betrieben werden können, sind die 1,2fachen Werte nach Tabelle 5.115 einzuhalten.
Für Abstände zwischen unter Spannung stehenden Anlageteilen verschiedener Nennspannungen sind die 1,2fachen Werte nach Tabelle 5.115 der höheren Nennspannung einzuhalten. Dieses gilt nicht bei neutralen Leitern.
Für neutrale Leiter gelten die Abstände nach Tabelle 5.115, die der der maximal auftretenden Spannung nächsthöheren Nennspannung zugeordnet sind.
Sofern für Geräte, Baueinheiten und/oder Anlagen die Spannungsprüfungen nach TGL 16441/03 oder TGL 26469/10 erfolgt sind, gelten für diese die Abstände nach Tabelle 5.115 nicht.
Innerhalb von Anschlußzonen brauchen die Werte nach Tabelle 5.115 nicht eingehalten zu werden. Für Anschlußzonen ist vom Hersteller der Geräte anzugeben, wie die anzuschließenden Leiter und Einbauteile innerhalb der Abschlußzone des Gerätes anzuordnen sind, um der Beanspruchung beim Betrieb und der Prüfung in eingebautem Zustand standzuhalten.

Hilfseinrichtungen

Es gelten die Festlegungen nach TGL 200-0601/04, Abschn. 1.5.

Errichtungsort

Anlagen, die nur über Schutzeinrichtungen gegen zufälliges Berühren verfügen, müssen in abgeschlossenen elektrotechnischen Betriebsräumen errichtet werden.
Anlagen mit allseitigem Schutz gegen Berühren dürfen auch in anderen Zwecken dienenden Räumen errichtet werden, wenn keine Gefährdung durch Lichtbogen außerhalb der Kapselung auftreten kann.
Baueinheiten mit allseitiger Kapselung mit Schutzgrad IP 4X nach TGL RGW 778 dürfen dann frei zugänglich aufgestellt werden, wenn keine Gefährdung durch Lichtbogen außerhalb der Kapselung auftreten kann und die Türen von außen nur mit Sicherheitsschlüssel zu öffnen sind.
Betretbare abgeschlossene elektrotechnische Betriebsräume dürfen von außen nur mit Sicherheitsschlüssel zu öffnen sein. Das Verlassen dieser Räume muß auch bei von außen verschlossener Tür ohne Schlüssel oder Hilfsmittel leicht möglich sein. Die Türen müssen nach außen aufschlagen. Diese Festlegung gilt nicht für Verbindungstüren zwischen abgeschlossenen elektrotechnischen Betriebsräumen.
Wenn der Platz außerhalb von Räumen mit elektrotechnischen Anlagen frei zugänglich ist, müssen die Türen und Wände aus schwer oder nicht brennbaren Baustoffen ausgeführt sein. Lüftungsöffnungen sind so auszubilden, daß ein Berühren unter Spannung stehender Teile auch bei Anwendung von Hilfsmitteln, z. B. Drähten, sicher verhindert ist.
In elektrotechnischen Anlagen dürfen Einrichtungen zur Betriebsführung, Bedienung, Kontrolle und Wartung untergebracht werden.

Innenanlagen

Berührungsschutz

In Innenanlagen sind Berührungsschutzvorrichtungen vorzusehen, deren Berührungsschutzabstände die Werte der Tabelle 5.116 nicht unterschreiten dürfen.
Bei Anlagenteilen, die in der Nähe von unter Spannung stehenden Anlageteilen gewartet werden müssen und zwischen denen eine Berührungsschutzvorrichtung nicht angebracht werden kann, darf der Abstand e_2 nach Tabelle 5.116 voneinander nicht unterschritten werden.
Hinter Zellentüren ist im Abstand e_2 eine Schutzleiste anzubringen, wenn

- Schaltgeräte nur bei geöffneter Tür, z. B. mittels Schaltstange, betätigt werden können,
- das Auswechseln von Sicherungen bei geöffneter Zellentür durchzuführen ist,
- eine unmittelbar vom Freien zugängliche Baueinheit mit unter Spannung stehenden Teilen nur nach Öffnen der Tür besichtigt werden kann

und dabei die Gefahr einer unzulässigen Näherung zu unter Spannung stehenden Teilen nach TGL 200-0619/01 besteht.

Tabelle 5.116: Mindestwerte für Berührungsschutzabstände in Innenanlagen (in mm)

Nennspannung in kv							10	20	30	110	220	380
Isolationsspannung in kV							12	24	36	123	245	420
Art der Sternpunkterdung							nicht wirksam oder wirksam				wirksam	
Berührungsschutzabstand	von Leitern einschl. Isolierkörpern, die zum Arbeiten getrennt abgeschaltet werden, zu unter Spannung stehenden Teilen, wenn keine Berührungsschutzvorrichtung vorhanden ist				nach Bild 5.44g)	e_2	2000			2500	3300	4400
	über begehbarer Fläche	zur Unterkante der Isolierkörper			nach den Bildern 5.44a), b), c)	e_3	2300					
		zu unter Spannung stehenden Teilen[2]) ohne Berührungsschutzvorrichtungen				e_4	2500		2550	3250	3850	5000
	von nicht leitfähiger Vollwand oder Volltür	bei seitlicher Gangbegrenzung mindestens 1800 hoch		zu unter Spannung stehenden Teilen[2])	nach Bild 5.44a)	e_5	105	180	290	950	1550	2700
	von leitfähiger Vollwand oder Volltür					e_6	135	210	320	980	1580	2730
	von Gitter oder Gittertür[1])				nach Bild 5.44b)	e_7	205	280	390	1050	1690	2800
	oberhalb der Gangbegrenzung nach Zeilen 5 und 6 bis 2000 über begehbarer Fläche				nach den Bildern 5.44 a), b)							
	einer Leiste hinter der Zellentür				—	e_8	135	210	320	980	1500	2730
	von Geländer, Seil oder Leiste; 800 bis 1000 hoch	zu unter Spannung stehenden Teilen[2]) oder Isolierkörpern			nach Bild 5.44c)	e_8	500			1150	1750	2900
	von begehbaren Konstruktionsstellen oder Bauwerken zu seitlich unter Fußbodenhöhe befindlichen	unter Spannung stehenden Teilen bei Begrenzung mit	Gitter[1]), mindestens 1000 hoch		nach Bild 5.44e)							
			Geländer oder ohne Berührungsschutzvorrichtung		nach Bild 5.44f)							
		Isolierkörpern bei Begrenzung mit Geländer oder ohne Berührungsschutzvorrichtung			nach Bild 5.44f)	e_9	500			1150	1250	
	von zu transportierenden Geräten oder Einrichtungen	zu unter Spannung[2]) stehenden Teilen			—	e_{10}	500			1150	1750	2900

[1]) Die Maschenweite ist so zu wählen, daß ein Eindringen fester Gegenstände mit einem Durchmesser ab 50 mm verhindert wird.
[2]) Bei Leiterseilen gelten die Maße für den größten Durchhang.

Tabelle 5.117: Gangabmessungen bei Innenanlagen (in mm)

Zweck des Ganges	Anlagenausführung	Mindestbreite nach Bild 5.45 bei Anlagen auf einer Seite des Ganges	Mindestbreite nach Bild 5.45 bei Anlagen auf zwei Seiten des Ganges	Mindesthöhe	Maximale Evakuierungswegelänge bei Anlagen mit Nennspannung 10…30 kV	Maximale Evakuierungswegelänge bei Anlagen mit Nennspannung 110…380 kV
zum Bedienen	ohne Kapselung	1000[1])	1200[1])	2000	20000	40000
	mit Kapselung[2])	1000[1])			40000	
zum Erden und Kurzschließen sowie zum Arbeiten	ohne Kapselung	800		1800	20000	
	mit Kapselung[2])	600			40000	

[1]) Muß mit dem Abstellen eines ausgefahrenen Schalterwagens oder anderer Einrichtungen gerechnet werden, so muß bei abgestelltem Schalterwagen oder der anderen Einrichtung noch eine freie Bedienungsgangbreite von 800 mm bei Anlagen mit Gefährdung durch Lichtbogen außerhalb der Kapselung und 600 mm bei Anlagen ohne Gefährdung durch Lichtbogen außerhalb der Kapselung bleiben.
[2]) Bei Anlagen, bei denen eine Gefährdung durch Lichtbogen außerhalb der Kapselung besteht, beginnt der Gang erst nach dem vom Hersteller angegebenen Gefährdungsabstand.

Bei fabrikgeprüften Baueinheiten mit Kapselung aus Vollwand gelten die Mindestmaße e_5 und e_6 in Tabelle 5.116 nicht.

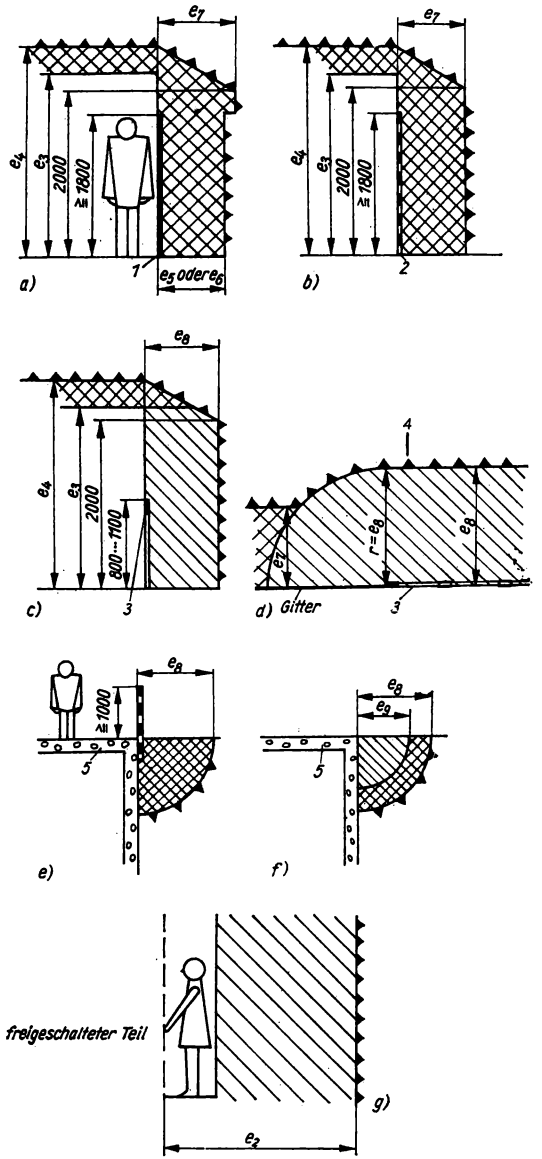


Bild 5.44. Mindestwerte für Berührungsschutzabstände bei Innenanlagen
1 Gang, Vollwand, 2 Gitter, 3 Geländer, Seil, Leiste, 4 Beispiel für Übergang zwischen unterschiedlichen Berührungsschutzvorrichtungen in der Draufsicht, 5 begehbare Konstruktionsteile oder Bauwerke

Schutzraum, in dem keine unter Spannung stehenden Teile und Isolierkörper angeordnet werden dürfen

Schutzraum, in dem sich Isolierkörper befinden dürfen

Grenzlinie für unter Spannung stehende Teile

Gänge und Türen

Die Maße nach Tabelle 5.117 dürfen nicht unterschritten werden.
In den Gang mit den Maßen nach Tabelle 5.117 dürfen keine Teile, z. B. Antri be, Aufbauteile, hineinragen. Bei Ganglängen > 15 m ist an jedem Gangende ein Ausgang vorzusehen. Werden die Evakuierungswege länger als in Tabelle 5.117 angegeben, so sind weitere Ausgänge vorzusehen. *Beispiele* s. Bild 5.45.

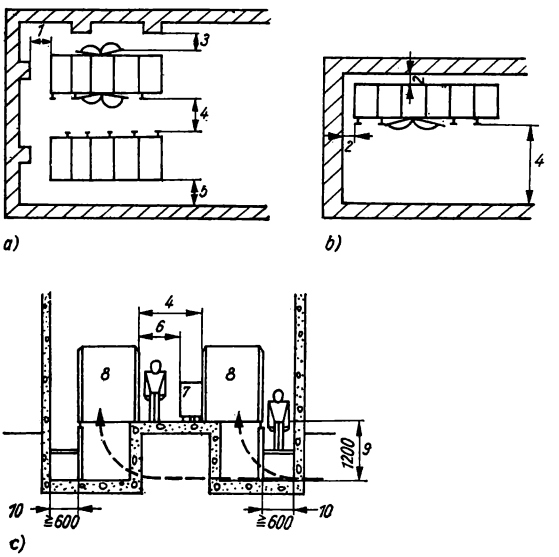


Bild 5.45. Beispiele für Gangbreiten in Innenanlagen
a) Anlagen in Freiaufstellung, b) Anlagen in Wandaufstellung, c) Aufstellung gekapselter Anlagen, zweireihig, bei Anordnung der Endverschlüsse innerhalb der Zeile; 1 Arbeitsgangbreite wie hinter den Zellen, 2 Abstand mindestens nach Herstellervorschrift, 3 Arbeitsgangbreite zuzüglich Herstellerforderung bei Zugangstür von hinten, 4 Bedienungsgangbreite, 5 Arbeitsgangbreite zuzüglich Herstellerforderung ohne Zugangstür von hinten oder mit Leiste oder Aushängen, 6 Mindestgangbreite bei ausgefahrenem Schalterwagen, 7 Schalterwagen, 8 gekapselte Anlage, 9 Kabelbodenhöhe, 10 Arbeitsgangbreite

Gerüste und Abspannungen

Für die Festigkeitsberechnung von Gerüsten gilt TGL 200-0614/03. Die zulässigen Höchstzugspannungen von Leiterseilen nach Tabelle 5.118 dürfen bei -10 °C nicht überschritten werden. Kurzschlußbeanspruchungen bleiben unberücksichtigt.

Tabelle 5.118: Zulässige Höchstzugspannungen

Seil		Zulässige Höchstzugspannung MPa
Aluminiumseil		70
Aluminium-Stahl-Seil mit Querschnitts-Verhältniszahl Al/St	7,7	85
	6,0···5,8	95
	4,3	100
	1,7	160

Auf Zug beanspruchte Isolatoren, Klemmen sowie alle anderen Zwischenglieder in Leiterseilabspannungen dürfen statisch bis zu 30% ihrer Mindestbruchlast beansprucht werden. Die Kurzschlußbeanspruchung ist nicht zu berücksichtigen.
Stützer dürfen bei Kurzschluß, unabhängig von der Einbaulage, bis zu ihrer Mindestbruchlast beansprucht werden. Die

Tabelle 5.119: Mindestwerte für Berührungsschutzabstände bei Außenanlagen (in mm)

Nennspannung in kV						10	20	30	110	220	380
Isolationsspannung in kV						12	24	36	123	245	420
Art der Sternpunkterdung						nicht wirksam oder wirksam				wirksam	
Berührungsschutzabstand	von Leitern einschl. Isolierkörpern, die zum Arbeiten getrennt abgeschaltet werden, zu unter Spannung stehenden Teilen, wenn keine Berührungsschutzvorrichtungen vorhanden sind			nach Bild 5.46f)	e_{12}	2150			2650	3650	4650
	über begehbarer Fläche	zur Unterkante der Isolierkörper		nach Bildern 5.46a), 5.46b)	e_{13}	2300					
		zu unter Spannung stehenden Teilen[2]) ohne Berührungsschutzvorrichtungen			e_{14}	2660		2770	3450	4050	5700
	von Gitter[1]) bei seitlicher Begrenzung ≧ 1800 hoch	zu unter Spannung stehenden Teilen[2])		nach Bild 5.46a)	e_{15}	250	315	425	1200	1950	3000
	von Geländer, Seil oder Leiste, 800···1000 hoch	zu unter Spannung stehenden Teilen[2]) oder Isolierkörpern		nach Bild 5.46b)	e_{16}	600		625	1400	2150	3200
	von begehbaren Konstruktionsteilen oder Bauwerken zu seitlich unter Fußbodenhöhe befindlichen	unter Spannung stehenden Teilen bei Begrenzung mit	Gitter[1]). 1000 hoch	nach Bild 5.46d)							
			Geländer oder ohne Berührungsschutzvorrichtung	nach Bild 5.46e)							
		Isolierkörpern bei Begrenzung mit Geländer oder ohne Berührungsschutzvorrichtung		nach Bild 5.46e)	e_{17}	600		625	1250		
	vor Fenstern oder von äußerer Umzäunung, die ≧ 1800 hoch ist,	zu unter Spannung stehenden Teilen[2]) oder Isolierkörpern		nach Bild 5.46g)	e_{18}	1650		1750	2500	3050	4200
	von zu transportierenden Geräten oder Einrichtungen	zu unter Spannung stehenden Teilen[2])			e_{19}	600			1400	2150	3200

[1]) Die Maschenweite ist so zu wählen, daß ein Eindringen fester Gegenstände mit einem Durchmesser ab 50 mm verhindert wird.
[2]) Bei Leiterseilen gelten die Maße für den größten Durchhang und 45° Ausschwingung.

statische Beanspruchung darf jedoch 40% der Mindestbruchlast nicht überschreiten.
Bei Leiterseilabspannungen sind Mehrfach-Isolatorenketten erforderlich, wenn bei Isolatorbruch unvertretbare Störungsausweitungen in den übrigen Anlageteilen auftreten.
Bei Mehrfach-Isolatorenketten darf durch die Durchhangsvergrößerung beim Bruch einer Teilkette der Abstand zu anderen Leitern oder geerdeten Bauteilen

$\frac{U_n}{150}$ in m (U_n Nennspannung der Anlage in kV),

mindestens jedoch 0,2 m, nicht unterschreiten. Für sich kreuzende Leiter verschiedener Nennspannung ist dabei die höhere Nennspannung zu berücksichtigen.

Außenanlagen

Berührungsschutz

In Außenanlagen sind Berührungsschutzvorrichtungen vorzusehen, deren Berührungsschutzabstände die Werte der Tabelle 5.119 nicht unterschreiten dürfen.
Bei Anlageteilen, die in der Nähe von unter Spannung stehenden Anlageteilen gewartet werden müssen und zwischen denen eine Berührungsschutzvorrichtung nicht angebracht werden kann, darf der Abstand e_{12} voneinander nach Tabelle 5.119 nicht unterschritten werden.

Gänge und Türen

Die Maße nach Tabelle 5.120 dürfen nicht unterschritten werden. In den Gang mit den Maßen nach Tabelle 5.120 dürfen keine Teile, z.B. Antriebe, vorstehende Fundamente, Gerüste, hineinragen.

Tabelle 5.120: Gangabmessungen bei Außenanlagen (in mm)

Zweck des Ganges	Mindestbreite bei Anlagenteilen auf einer Seite des Ganges	Mindestbreite bei Anlagenteilen auf zwei Seiten des Ganges	Mindesthöhe[1])
zum Bedienen	1000	1200	2000
zum Erden und Kurzschließen sowie zum Arbeiten	800		1800

[1]) Die angegebene Mindesthöhe berücksichtigt eine Schneehöhe im festgetretenen Zustand von 50 mm.

Gerüste und Abspannungen

Für die Festigkeitsberechnung von Gerüsten gilt TGL 200-0614/03. Die zulässigen Höchstzugspannungen von Leiterseilen nach Tabelle 5.118 dürfen bei −20°C nicht überschritten werden. Kurzschlußbeanspruchungen und Zusatzlasten durch Eis, Rauhreif oder Schnee bleiben unberücksichtigt.
Auf Zug beanspruchte Isolatoren, Klemmen sowie alle anderen Zwischenglieder in Leiterseilabspannungen dürfen statisch bis zu 30% ihrer Mindestbruchlast beansprucht werden. Die Kurzschlußbeanspruchung ist nicht zu berücksichtigen.
Stützer dürfen bei Kurzschluß unabhängig von der Einbaulage bis zu ihrer Mindestbruchlast beansprucht werden. Die statische Beanspruchung darf bei senkrechter Einbaulage 40% und davon abweichender Einbaulage 25% der Mindestbruchlast nicht überschreiten.

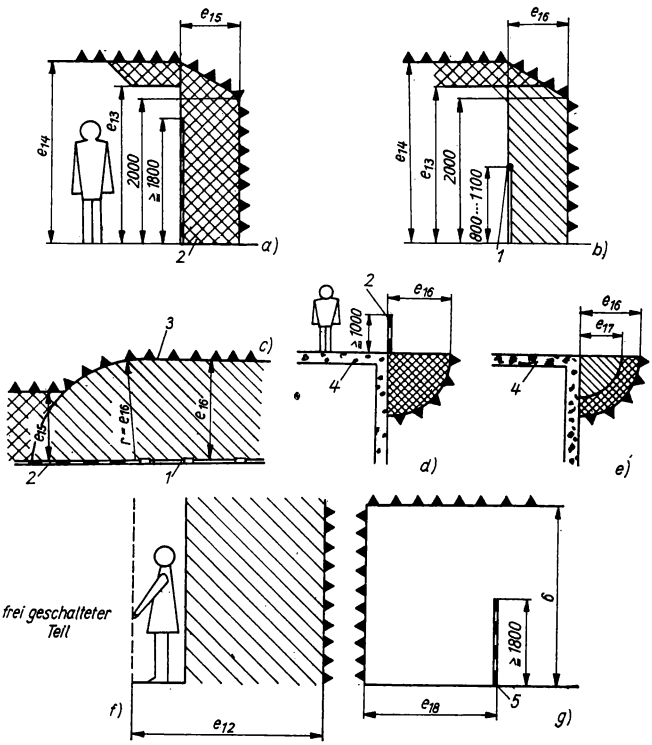


Bild 5.46. Mindestwerte für Berührungsschutzabstände bei Außenanlagen
1 Geländer, Seil, Leiste, 2 Gitter, 3 Beispiel für Übergang zwischen unterschiedlichen Berührungsschutzvorrichtungen in der Draufsicht, 4 begehbare Konstruktionsteile oder Bauwerke, 5 Außenumzäunung, 6 Bodenabstand nach TGL 200-0614/03
Legenden siehe Bild 5.44

Bei Leiterseilabspannungen sind Mehrfach-Isolatorenketten erforderlich, wenn bei Isolatorbruch unvertretbare Störungsausweitungen in den übrigen Anlageteilen auftreten.
Bei Mehrfach-Isolatorenketten darf durch die Durchhangsvergrößerung beim Bruch einer Teilkette der Abstand zu anderen Leitern oder geerdeten Bauteilen

$U_n/150$ in m
U_n Nennspannung der Anlage in kV

mindestens jedoch 0,2 m, nicht unterschreiten. Für sich kreuzende Leiter verschiedener Nennspannungen ist dabei die höhere Nennspannung zu berücksichtigen.

5.3.6.4. Kennzeichnen von Gefahrenstellen, Anbringen von Aushängen

Warnschilder in Starkstromanlagen

Die Übersicht ihrer Anwendung enthält Tabelle 5.121.
Die Warnschilder sind fest und an gut sichtbaren Stellen anzubringen. Im Freien sind emaillierte Schilder zu bevorzugen.
Für die Sicherheitsmaßnahmen beim Bedienen und Arbeiten sind, soweit für die Anlage zutreffend, folgende Warnschilder bereitzustellen:

Warnschild E »Nicht schalten, Gefahr vorhanden«
Warnschild F »Nicht einschalten, es wird gearbeitet«
Warnschild L »Vorsicht! Prüfung mit Gleichspannung«
Warnschild K »Achtung! Geerdet und kurzgeschlossen«.

Für den Einsatz der Warnschilder gilt TGL 200-0619/01.

Aushänge in Starkstromanlagen

In elektrotechnischen und abgeschlossenen elektrotechnischen Betriebsräumen ist an geeigneter Stelle eine Zusammenstellung der Notrufe auszuhängen, z. B. Notrufe für Rettungsdienst, Feuerwehr, nächster Arzt, nächstes Unfallkrankenhaus, Energieversorgungsbetrieb. Es wird empfohlen, auch die Anschriften dieser Stellen aufzuführen.

Tabelle 5.121: Übersicht über die Anwendung

Lfd. Nr.	Form	Warnschild nach TGL 200-1080 Text oder Aufdruck	Anwendung
1	A	Vorsicht! Elektrotechnische Einrichtung nicht berühren	[1]
2	B	Hochspannung Vorsicht! Lebensgefahr	
3	C	Blitzpfeil	
4	D	Vorsicht! Rückspannung	[2]
5	G	Vorsicht! Gehäuse unter Spannung	[3]
6	H	Vor Berühren entladen, erden und kurzschließen	[4]
7	J	Achtung! Entladezeit länger als eine Minute	[5]

[1]) Für Anlagen, bei denen der Berührungsschutz durch andere Maßnahmen ersetzt werden darf, gilt:
bei Nennspannungen bis 1000 V Ws oder 1500 V Gs Warnschild A oder C,
bei Nennspannungen über 1 kV Ws oder 1,5 kV Gs Warnschild B oder C,
an Zugängen zu abgeschlossenen elektrischen Betriebsräumen über 1 kV Ws oder 1,5 kV Gs Warnschild B oder C.
[2]) Entsprechend den Forderungen in Vorschriften spezieller Anlagen.
[3]) Bei betriebsmäßig unter Spannung stehenden Gehäusen, die beim Betreiben der Anlage berührt werden können.
[4]) An der Absperrung von Kondensatorenanlagen ohne selbsttätige Entladung.
[5]) Bei Kondensatoren mit selbsttätiger Entladung und einer Entladungszeit > 1 min.

Befinden sich mehrere solcher Räume in einem Gebäude, so ist der Aushang nicht in jedem Raum erforderlich, sofern es sich nicht um verschiedene, getrennte Anlagen handelt.
Bei Anlagen mit Fernsprechanschluß darf anstelle des Aushanges eine Notrufscheibe auf der Wählscheibe fest angebracht werden.
Durch den Betreiber der Anlage ist zu entscheiden, ob in elektrotechnischen und abgeschlossenen elektrotechnischen Betriebsräumen Tafeln für die »Anleitung zur Ersten Hilfe bei Unfällen« auszuhängen sind.
Vorstehend erläuterte Aushänge sind für Maststationen, Kabelverteiler und Schaltschränke nicht vorzusehen.
In elektrotechnischen und abgeschlossenen elektrotechnischen Betriebsräumen muß ein Übersichtsschaltplan vorhanden sein,

– wenn bei Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Ws oder bis 1500 V Gs aus der Beschriftung allein die Stromkreise oder die Schaltung der Anlage nicht eindeutig erkennbar sind,
– wenn bei Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV Ws oder über 1,5 kV Gs aus der Beschriftung allein die Schaltung der Anlage nicht eindeutig erkennbar ist oder wenn mehr als 6 Schaltfelder vorhanden sind.

Für Außenanlagen darf der Übersichtsschaltplan in einem anderen geeigneten Raum vorhanden sein.
Der Übersichtsschaltplan ist so anzufertigen, daß er gut lesbar bleibt. Er muß sich auf den Bereich erstrecken, der für die Betriebsführung überblickt werden muß.

5.3.6.5. Anschluß von Starkstrom-Abnehmeranlagen an die Energieversorgungsanlage, Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V

Allgemeine Forderungen

In Energieflußrichtung gesehen, müssen alle Anlagenteile vor den Verrechnungszähleinrichtungen wie Hausanschlußkästen, Hauptleitungssicherungen, Hauptleitungsabzweige und Zählertafeln plombierbar sein. Das gleiche gilt für Anlagenteile hinter den Verrechnungszähleinrichtungen, die aus tariflichen Gründen gegen unbefugten Eingriff gesichert sein müssen. Ist an diesen Anlagenteilen eine Möglichkeit zur Plombierung nicht vorhanden, sind diese Betriebsmittel vom berechtigten Hersteller der elektrotechnischen Anlage nachzurüsten.
Die Bohrungen zum Einführen der Plombenschnur müssen mindestens einen Durchmesser von 1,5 mm haben.
Der Energieversorgungsbetrieb (in der Folge EVB genannt) entscheidet über die Anwendbarkeit der netzabhängigen Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen.

Hauseinführungen

Hauseinführungen sind auf kürzestem Weg unter Beachtung der installationstechnischen Forderungen in die Gebäude einzuführen. Sie dürfen nicht in explosions-, explosivstoff- und feuergefährdeten, feuchten oder nassen Räumen enden. Die Leitungen sind so zu legen, daß bei einem Lichtbogenkurzschluß das Leitungsstück ausbrennen kann, ohne daß die Gefahr einer Brandausbreitung besteht.
Hauseinführungen müssen vieradrig ausgeführt werden, sofern nicht Plastaderleitungen Verwendung finden. Ausnahmen bedürfen der Zustimmung des EVB.
Für Hauseinführungen sind Kabel nach TGL 200-0612/03 oder Leitungen nach TGL 200-0613/02 sowie Luftkabel einzusetzen.
Gummimantelleitungen und Gummiaderleitungen sind nicht zulässig. Folgende Ausführungsformen nach den Bildern 5.47 und 5.48 sind z. B. zulässig:

Die zulässigen Biegeradien für Kabel müssen TGL 200-0612/01 und für Leitungen TGL 200-0613/02 entsprechen.
Die Kennzeichnung des Schutzleiters muß TGL 200-0602/03 entsprechen. Bei Kabel gilt für die Kennzeichnung des Schutzleiters TGL 200-1750/02.

Die Legung von Plastmantelleitungen oder Plast- und Luftkabel hat bei Wanddurchführungen in PVC- oder Keramikrohren zu erfolgen, deren lichte Weite mindestens dem 1,5fachen des Leitungs- oder Kabelaußendurchmessers entsprechen muß.
Bei brennbarer Bausubstanz sind nur Keramikrohre zulässig, die beidseitig 50 mm von der Fertigwand überstehen müssen. Die Schutzrohre sind im Gebäudeinneren mittels Asbestwickelbands oder -schnur abzudichten.
Die Leitungen oder das Kabel müssen mindestens 150 mm von der brennbaren Bausubstanz entfernt oder mitten auf einer

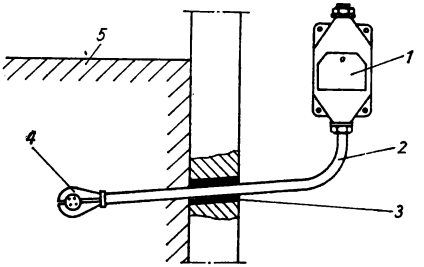


Bild 5.47. Hauseinführung, Einsatz von Starkstromkabel
1 Hausanschlußkasten, 2 Hausanschlußkabel, 3 Schutzrohr nach TGL 200-0612/02, 4 Hausanschlußmuffe, 5 Erdboden

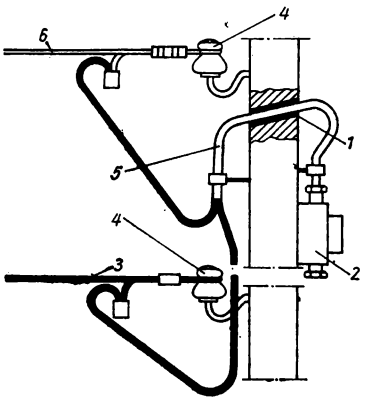


Bild 5.48. Hauseinführung, Einsatz von Plastmantelleitung oder Plastkabel
1 Schutzrohr, 2 Hausanschlußkasten, 3 isolierter Leiter, 4 Stützenisolator, 5 Plastmantelleitung oder Plastkabel, 4adrig, 6 nichtisolierter Leiter

mindestens 300 mm breiten, 10 mm dicken Asbestzementplatte nach TGL 22896/01 gelegt werden. Die Halteschellen müssen mit Isolierstoffeinlagen versehen sein.

Hausanschlußkästen

Hausanschlußkästen sind nur in 3poliger Ausführung zulässig. Ausnahmen bedürfen der Zustimmung des EVB.
Der Einsatz von Hausanschlußkästen hat in Abhängigkeit von der Art der Wanddurchführung und der zu erwartenden elektrischen Beanspruchung zu erfolgen. Sie müssen mindestens mit Sicherungssockeln Nennstrom 63 A ausgerüstet sein.
Die Einhaltung des Schutzgrades nach TGL RGW 778, bezogen auf den Einsatzort, ist zu gewährleisten.
Hausanschlußkästen sind, sofern ihre Montage innerhalb von Gebäuden erfolgt, in einem zugänglichen Raum unmittelbar nach der Wanddurchführung anzuordnen. Besteht infolge der räumlichen Anordnung des Gebäudes keine Möglichkeit, diese Bedingungen zu erfüllen, ist die Hauseinführung als Mantelleitung oder Kabel außerhalb des Gebäudes bis zu jenem Punkt zu führen, an dem eine Wanddurchführung zum zugänglichen Raum möglich ist. Die Anbringung der Hausanschlußkästen hat über der Oberkante des Fertigfußbodens in einer Höhe von 600···1800 mm zu erfolgen.
Die Montage der Hausanschlußkästen ist mit Zustimmung des EVB auch außerhalb von Gebäuden zulässig.
Hausanschlußkästen auf brennbaren Stoffen, z. B. Holz, sind von diesen durch eine Asbestzementplatte nach TGL 22896/01 zu trennen.
Werden Hausanschlußkästen in Räumen angebracht, über denen leicht brennbare Stoffe lagern, so ist bei Holzdecken ein Hausanschlußkasten Schutzgrad IP 54 zu verwenden. Bei

Anordnung der Hausanschlußkästen bis zu 500 mm von der Holzdecke, über der leicht brennbare Stoffe lagern, muß die Decke der Feuerwiderstandsklasse fw 0,5 entsprechen.

Leitungen zwischen den Hausanschlußkästen und den Verrechnungszähleinrichtungen

Hauptverteilungs-, Haupt- und Zählerzuleitungen sind in zugängliche Räume zu legen.
Bei Vorhandensein von Treppenaufgängen sind sie in den Treppenaufgang zu legen, von dem aus der Zugang zur Wohnung oder der Verrechnungszähleinrichtung erfolgt. Die Legung in Zwischendecken ist nicht zulässig.

Leiterquerschnitte

Die Leiterquerschnitte zwischen den Hausanschlußkästen und den Verrechnungszähleinrichtungen sind nach TGL 200-0612/03 oder TGL 200-0613/02, dem zulässigen Spannungsabfall sowie Tabelle 5.122 zu wählen.
Bei Aluminiumleitern mit Querschnitten bis 25 mm² und bei Kupferleitern bis 16 mm² sind Außenleiter und neutraler Leiter oder Nulleiter im gleichen Querschnitt zu legen.

Tabelle 5.122: Leiterquerschnitte

In Versorgungsnetzen mit öffentlicher Gasversorgung	Leiterquerschnitte in mm² Aluminium bei einer Anzahl von WE (Wohnungseinheiten)		
	bis 5	von 6 bis 9	von 10 bis 15
Drehstrom 3 × 380/220 V	10	16	25
Drehstrom 3 × 220 V	10	25	35

In Wohnbauten sind die Hauptleitungen bei Verwendung von Aluminium als Leitermaterial mit den in Tabelle 5.122 festgelegten Mindestquerschnitten auszuführen, sofern die zulässigen Spannungsabfälle eingehalten werden.
Für mehr als zwei Wohnungen ohne öffentliche Gasversorgung ist der nächsthöhere Leiterquerschnitt zu verwenden.
In Wohnbauten mit mehr als 15 Wohnungseinheiten ist der Leiterquerschnitt rechnerisch zu ermitteln. Er hat mindestens 35 mm² Al zu betragen.
Werden mehr als 15 Wohnungseinheiten angeschlossen, so muß eine Einrichtung – wie Sicherung – vorhanden sein, die das Herstellen des spannungsfreien Zustandes der Hauptleitung und der Zählerzuleitungen für maximal je 15 Wohnungseinheiten gestattet.
Bei Nennspannungen, die von den in Tabelle 5.122 genannten abweichen, ist der Mindestquerschnitt entsprechend der Nennspannung 3 × 220 V zu wählen.

Maximal zulässige Spannungsabfälle

In den Leitungen und/oder Kabeln von den Hausanschlußkästen bis zu den Verrechnungszähleinrichtungen ist 1% der Nennspannung zulässig.
Von den Hausanschlußkästen bis zu den Betriebsmitteln mit einem Anschlußwert bis 2 kW sind insgesamt 2% und für Betriebsmittel über 2 kW insgesamt 3% der Nennspannung zulässig.

Verrechnungszähleinrichtungen

Als Verrechnungszähleinrichtungen dürfen nur solche Betriebsmittel verwendet werden, die vom Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung zugelassen und geeicht sind.
Die Auswahl nach der Größe der Nennspannung, der zu erwartenden elektrischen Beanspruchung und den tariflich bedingten Zusatzeinrichtungen erfolgt durch den EVB.
Die Verrechnungszähleinrichtungen sind so anzubringen, daß sie dem EVB zugänglich sind.
Die Anbringungsorte müssen trocken, belüftbar und staubarm sein.
In Wohnbauten sind Verrechnungszähleinrichtungen in Treppenaufgängen oder Etagenvorräumen anzuordnen.
Können die vorstehenden Bedingungen nicht erfüllt werden, so ist der Anbringungsort vor der Montage mit dem EVB abzustimmen.
Für das Anbringen von Verrechnungszähleinrichtungen und Schaltuhren sind Zählertafeln nach TGL 12483/01···03 mit den entsprechenden Ansatzstücken zu verwenden.
Diese Forderung gilt auch bei Spannungsumstellungen, Anlagenerweiterungen und Zusammenlegungen, wenn die vorhandenen Zählertafeln bezüglich Größe, Befestigungsart, Schutzgrad und Anbringungsmöglichkeit für die Verrechnungszähleinrichtungen nicht den Forderungen nach TGL 12483/01 bis 03 entsprechen.
Verrechnungszähleinrichtungen sind lotrecht so anzubringen, daß sie gegen mechanische Beschädigung, Verschmutzung, Erschütterung und sonstige schädliche Einwirkungen geschützt sind und ein gefahrloses Arbeiten an ihnen gewährleistet ist.
Zur Erfüllung dieser Forderung können entweder Schutzschränke verwendet werden, die eine Mindesttiefe von 230 mm und allseitig einen Abstand ≧ 100 mm von der Zählertafel haben müssen, oder die Verrechnungszähleinrichtungen sind in Wandnischen zu montieren, deren Rückwand bei Mauerwerk ≧ 120 mm, bei Schwerbeton ≧ 60 mm stark sein muß. In Wohn- und Gesellschaftsbauten, die nur mit Elektroenergie versorgt werden, sind Nischen oder Schutzschränke zur Aufnahme der Verrechnungszähleinrichtungen so geräumig auszuführen, daß der Einbau von zwei weiteren Zählertafeln möglich ist, sofern nicht zentrale Steuerungen für die Inanspruchnahme des Nachttarifes vorhanden sind.
Im übrigen gelten die genannten Maße.
Der Abstand von der Oberkante des Fertigfußbodens bis zur Mitte der Zählertafel hat zwischen 1500 und 1700 mm zu betragen. Werden zwei oder mehrere Tafeln übereinander angeordnet, darf der Abstand vom Fußboden bis zur Mitte der unteren Tafel 700 mm nicht unterschreiten, bis zur Mitte der oberen Tafel 1700 mm nicht überschreiten.

Vorgefertigte Baueinheiten

Können keine standardisierten Zählertafeln Verwendung finden, müssen die Montageplätze für die Verrechnungszähleinrichtungen TGL 12483/01···03 entsprechen.
Die Zustimmung der VVB Energieversorgung ist vor der Montage einzuholen.

Wandler-Zähler-Meßsätze

Der EVB entscheidet, ob der Einsatz von Wandler-Zähler-Meßsätzen zu erfolgen hat.
Er bestimmt auch die Art und Größe der einzusetzenden Wandler.
Für den Standort der Meßgeräte gelten die Forderungen wie bei Verrechnungszähleinrichtungen.
Bei Verrechnungszähleinrichtungen mit Zusatzeinrichtungen sind Voraussetzungen zu schaffen, die ein Absinken der Umgebungstemperatur unter 5 °C verhindern.

5.3.7. Schutzmaßnahmen in elektrotechnischen Anlagen

Zum Schutz des Menschen gegen zu hohe Berührungsspannung sind in Starkstromanlagen mit Wechselspannungen über 65 V gegen Erde und Gleichspannungen über 100 V gegen Erde i. allg. Schutzmaßnahmen erforderlich. Dieser zusätzliche Schutz entbindet den Hersteller elektrotechnischer Betriebsmittel sowie den Errichter elektrotechnischer Anlagen jedoch nicht von der Pflicht, die Geräte, Maschinen und Anlagen mit der größten Sorgfalt auszuführen, damit die Wahrscheinlichkeit von Schäden so gering wie möglich ist.
Für die Schutzmaßnahmen in elektrotechnischen Anlagen gelten die *Standards*

TGL 200-0602/01
TGL 200-0602/02
TGL 200-0602/03

5.3.7.1. Begriffe

Berührungsspannung (U_B) ist die Spannung, die bei einer elektrischen Durchströmung des Menschen oder Nutztieres an diesem zwischen den Berührungspunkten auftritt (Bild 5.49).

Fehlerspannung (U_F) ist die Spannung, die bei einem Isolationsfehler zwischen nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teilen oder zwischen diesen und der Bezugserde auftritt (Bild 5.49).

Fehlerstrom (I_F) ist der Strom, der infolge Isolationsfehler über die Fehlerstelle zum Fließen kommt (Bild 5.49).

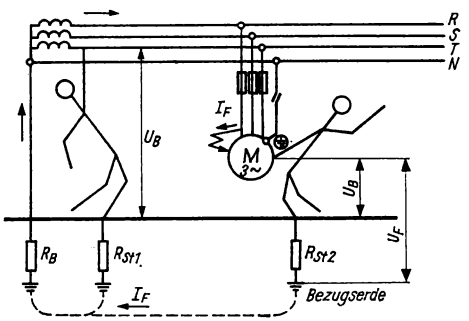


Bild 5.49. Beispiel für die Darstellung von Berührungsspannung, Fehlerspannung und Fehlerstrom
U_F Fehlerspannung, I_F Fehlerstrom, R_B Betriebserdungswiderstand, R_{St} Standortübergangswiderstand

5.3.7.2. Schutz gegen Berühren betriebsmäßig unter Spannung stehender Teile

Grundforderung

Betriebsmäßig unter Spannung stehende Teile sind so zu isolieren, abzudecken und/oder anzuordnen, daß sich Menschen – ohne Verwendung von Hilfsmitteln – und Nutztiere diesen Teilen nicht in gefahrbringender Weise nähern oder mit ihnen in Berührung kommen können.

Verzicht auf Berührungsschutz

Der Berührungsschutz darf entfallen

– in Anlagen mit Spannungen bis 50 V Ws (Effektivwert) oder bis 60 V Gs,

– in Anlagen, bei denen aus Funktionsgründen von einem Berührungsschutz abgesehen werden muß, z. B. in Schweiß-, Prüf-, Elektrolyse-, Elektrozaun- und elektromedizinischen Anlagen. In diesem Falle ist der Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung beim Berühren der aktiven Teile auf andere geeignete Weise zu gewährleisten, z. B. durch Standortisolierung, isolierendes Werkzeug, Warnschilder.

Der Verzicht auf Berührungsschutzmaßnahmen gilt nicht für

Schutzkleinspannungsstromkreise nach TGL 200-0602/03,
explosions-, explosivstoff- und schlagwettergefährdete Anlagen,
Anlagen mit Berührungsspannungen < 42 V, z. B. für Anlagen in medizinisch genutzten Räumen.

Ausführung von Schutzvorrichtungen

Die dem Berührungsschutz dienenden Teile

– müssen mindestens für die Isolationsspannung der Anlage bemessen und so beschaffen, ausgeführt und befestigt sein, daß

1. die im Betrieb zu erwartenden mechanischen, elektrischen, thermischen und klimatischen Beanspruchungen, Verschmutzungen durch Kühlmittel u. dgl. sowie

2. Änderungen ihrer Werkstoffeigenschaften oder Oberflächenbeschaffenheit
zu keiner Beeinträchtigung der Schutzwirkung, insbesondere zu keiner Minderung des Schutzgrades und zu keiner Unterschreitung der Mindestschutzabstände führen;

– dürfen außerhalb elektrotechnischer oder abgeschlossener elektrotechnischer Betriebsräume nur mit Werkzeug zu entfernen und Türen nur mit Schlüssel oder abziehbarem Griff zu öffnen sein. Das gilt nicht für Leuchten, Sicherungselemente für Schraubsicherungen und nicht für Zündanlagen in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Dreikantverschlüsse sind nur für explosions- und schlagwettergeschützte Betriebsmittel zulässig;

– müssen aus elektrisch nicht leitendem Werkstoff bestehen, sofern diese Teile als Schutzleisten oder -seile ausgeführt sind.

Mindestschutzabstände s. Bild 5.50 und Tabelle 5.123.

In Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV Ws oder über 1,5 kV Gs müssen die Mindestschutzabstände TGL 200-0601/04 entsprechen. Bei Einschubschutzplatten ist TGL 76-023 zu beachten.

Tabelle 5.123: Mindestschutzabstände in Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Ws *oder bis* 1,5 kV Gs (in mm)

Schutzvorrichtung			Mindestschutzabstand (nach Bild 5.50)				
Art		Berührungsschutzgrad (nach TGL RGW 778	a_1	a_2	b_1	b_2	c
Schutzleiste, -seil, -geländer[1]) oder keine Schutzvorrichtung		IP 00	–	200[2])	–		2500
Schutzgitter		IP 00	200		–	200	
		IP 1X	125				
		IP 2X	85		40		
		IP 3X	40				
Vollwand	elektrisch leitend; wird während des Betriebes	bewegt, z. B. Türen	IP 3X	40	–	40	–	–
		nicht bewegt, z. B. Verkleidungen	IP 4X	15		15		
	aus Isolierstoff oder mit Isolierstoff ausgekleidet		IP 5X	0		0		

[1]) Schutzleiste, -seil und -geländer sind ≈ 1 m über der Oberfläche Fertigfußboden anzuordnen.
[2]) Dieser Schutzabstand ist mindestens bis zu einer Höhe von 1800 mm, gemessen von Oberfläche Fertigfußboden, einzuhalten (s. Bild 5.50).

Bei Verwendung von Schutzseil gilt als Mindestschutzabstand der kürzeste Abstand, der sich bei maximaler Auslenkung des Seiles zwischen diesem und den nicht isolierten, betriebsmäßig unter Spannung stehenden Teilen ergibt.

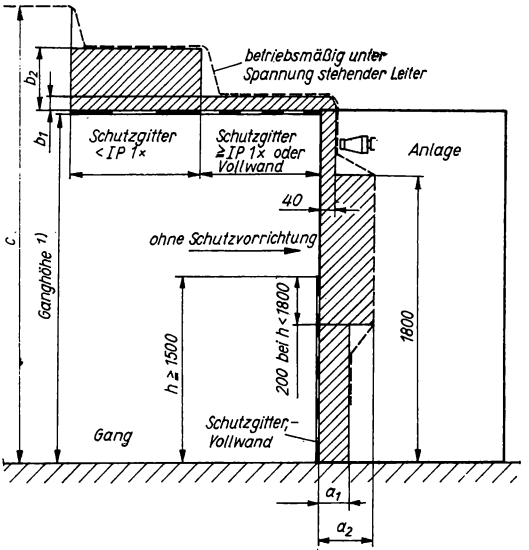


Bild 5.50. Mindestschutzabstände in Anlagen mit Nennspannungen bis 1 000 V Ws oder bis 1,5 kV Gs
Schraffierte Flächen: unzulässiger Raum für die Anordnung nicht isolierter, betriebsmäßig unter Spannung stehender Teile (Schutzraum); 1) nach TGL 200-0601/03

In Räumen, die in Kinderheimen, -gärten und -krippen dem Aufenthalt von Kindern dienen, sind

– Steckdosen dem Zugriff von Kindern zu entziehen, z. B. durch Anordnung in verschließbaren Kästen oder in mindestens 1,6 m Höhe, gemessen von Oberfläche Fertigfußboden,

– Steckdosen mit erhöhtem Berührungsschutz zu verwenden, oder es sind

– die betriebsmäßig unter Spannung stehenden Steckdosenbuchsen berührungsschutzsicher abzudecken.

Das gilt nicht für Steckdosen in Kleinspannungs- und Fernmeldeanlagen.

Schutzraum für ortsfeste Bade- und Duscheinrichtungen

In Räumen mit ortsfesten Bade- und Duscheinrichtungen dürfen innerhalb des durch die Grundfläche der Badewanne oder des Duschbeckens einerseits und die Höhe von 2250 mm

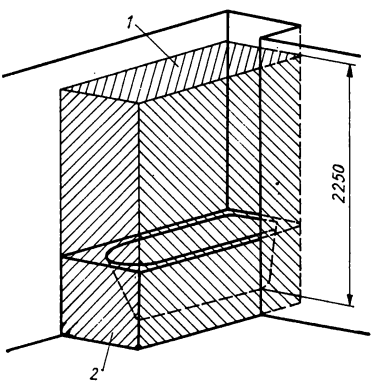


Bild 5.51. Schutzraum für ortsfeste Bade- und Duscheinrichtungen
1 Schutzraum, 2 Badewanne

– gemessen von der Standfläche in der Wanne oder im Duschbecken – andererseits begrenzten Raumes (*Beispiel* s. Bild 5.51) keine elektrotechnischen Betriebsmittel, z. B. Steckdosen, Schalter, Taster, Leuchten, Lüfter oder Raumheizgeräte, angebracht und keine Leitungen oder Kabel (auch nicht im oder unter Putz) an die den Schutzraum begrenzenden Wandflächen gelegt werden.
Das gilt nicht für ortsfest angebrachte elektrotechnische Betriebsmittel zur Warmwasserbereitung oder Gasthermen mit elektrischer Zündeinrichtung, sofern ihr Schutzgrad mindestens IP X4 nach TGL RGW 778 entspricht.
In Bade- und Duschräumen sind Steckdosen so weit entfernt vom Schutzraum der Badewanne oder dem Duschbecken anzubringen, daß das Herstellen einer Steckverbindung von der Badewanne oder dem Duschbecken aus nur unter erschwerten Bedingungen möglich ist. Als Richtwert gelten 600 mm.

5.3.7.3. Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung an betriebsmäßig nicht unter Spannung stehenden Teilen in Anlagen bis 1 000 V Ws oder 1,5 kV Gs und Betriebsfrequenzen bis 10 kHz

Zulässige Schutzmaßnahmen

Zum Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung infolge Isolationsfehlers sind nur folgende Schutzmaßnahmen zulässig:
– Schutzisolierung,
– Schutzkleinspannung,
– Schutztrennung,
– Schutzleitungssystem,
– Schutzerdung,
– Nullung,
– Fehlerspannungs-Schutzschaltung,
– Fehlerstrom-Schutzschaltung,
– Trenn-Fehlerstrom-Schutzschaltung.

Kombinationen aus mehreren dieser Schutzmaßnahmen sind zulässig, wenn dadurch die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen nicht beeinträchtigt wird.

Berührungsspannung

Als *höchstzulässige Berührungsspannung* gilt für Menschen:
65 V Ws (Effektivwert),
100 V Gs.

Für elektrotechnische Anlagen in Bahnen gilt TGL 200-0632/01. Für Nutztiere gilt TGL 200-0629/01.

Erfordernis von Schutzmaßnahmen

Schutzmaßnahmen nach TGL 200-0602/03 sind anzuwenden, wenn in Elektroenergiesystemen

1. mit betriebsmäßig geerdetem Sternpunkt, Mittelpunkt oder Außenleiter die Leiter-Erde-Spannung,

2. ohne betriebsmäßig geerdeten Sternpunkt, Mittelpunkt oder Außenleiter die Leiter-Leiter-Spannung

die Werte für die höchstzulässige Berührungsspannung (s. Abschn. Berührungsspannung) überschreitet. Bei Wechselspannung gilt der Effektivwert.
Diese Forderung gilt auch bei Erweiterung oder Änderung von Anlagen, in denen bisher keine Schutzmaßnahmen angewendet worden sind.
Für zulässige Ausnahmen gilt TGL 200-0602/03, Abschn. 1.3.2. und 1.3.4.
Bei Reparatur, Erweiterung oder Änderung von Anlagen in Räumen, die Wohnzwecken dienen und in denen bisher keine Schutzmaßnahmen mit Schutzleiter, z. B. Nullung, Schutzerdung oder FU-Schutzschaltung, angewendet worden sind, werden keine Schutzmaßnahmen gefordert.

Schutzmaßnahmen sind jedoch anzuwenden:

1. in Bade- und Duschräumen,

2. in Küchen und Toiletten, in denen metallene Rohrleitungen, z. B. Wasser-, Gas- oder Heizungsrohre, installiert sind, sofern in diesen Räumen Steckdosen oder fest angeschlossene Betriebsmittel der Schutzklasse I (mit Schutzleiteranschluß) ausgewechselt, hinzugefügt oder in ihrer Lage verändert werden,

3. in Loggien, auf Balkons, in Wohn- und Campingwagen,

4. in Korridoren, Wohn-, Schlaf-, Kinder-, Speise-, Lese-, Klub- und ähnlichen Räumen in Wohn- und gesellschaftlichen Bauten, in denen metallene Rohrleitungen, z. B. Heizungs-

rohre, installiert und die Voraussetzungen zur Anwendung der Schutzmaßnahme Nullung gegeben sind, sofern in diesen Räumen Steckdosen oder fest angeschlossene Betriebsmittel der Schutzklasse I hinzugefügt oder in ihrer Lage verändert werden.

Schutzmaßnahmen werden nicht gefordert

1. für Betriebsmittel, die an Elektroenergieerzeuger oder -übertrager mit einem Dauerkurzschlußstrom von höchstens 20 mA bei Klemmenkurzschluß angeschlossen sind,

2. für Hausanschlußkästen, Abzweig- und Wandlerkästen in Hauptverteilungs- und Hauptleitungen (Steigleitung) vor der Meßeinrichtung, in Energieflußrichtung gesehen, sowie für Zählertafeln in Abnehmeranlagen, sofern die Voraussetzungen zur Anwendung der Schutzmaßnahmen Schutzerdung (s. Abschn. Schutzerdung) oder Nullung (s. Abschn. Nullung) nicht gegeben sind.
Werden die vorgenannten Betriebsmittel in keine Schutzmaßnahme einbezogen, sind der Anschluß der nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teile an das Potentialausgleichsystem (s. Abschn. Potentialausgleich) sowie die Verbindung dieser Teile mit anderen berührbaren leitfähigen Teilen unzulässig.

3. für Elektrizitätszähler und die auf derselben Zählertafel oder unmittelbar daneben angeordneten Schaltuhren und Relais,

4. für

Metallmäntel von Leitungen, z. B. NBGY, NYRAr,
metallene Schirme von Leitungen, Litzen und Drähten, z. B. NSHC, NYMHYC, MY (St) Y
(diese Ausnahme gilt nicht für den Schirm von Heizleitungen),
Tragorgane von Leitungen, z. B. NSHT, M2YZY,
Bewehrungen von Kabeln, z. B. NAKBA, NAYYBA, PMzbc,
Tragorgane von Luftkabeln, z. B. NLAYY-T,
metallene Befestigungsteile für Leitungen und Kabel, z. B. Stahlschellen und -tragbügel,
Leitungs- und Kabelpritschen,
Spanndrähte und -seile zur Befestigung von Leitungen oder Kabeln,
metallene Rohre und Schläuche, z. B. Stahlpanzerrohre, verbleite Isolierrohre, verbleite biegsame Rohre.

5. für metallene Zug- und Abgangskästen im Unterflur-Installations-System, in denen die Leiter nicht geklemmt werden, sowie für metallene Abzweigdosen mit Isolierstoffauskleidung.

Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen

Schutzmaßnahmen dürfen nicht umgangen oder unwirksam gemacht werden.
Beim Anwenden von Schutzmaßnahmen mit Schutzleiter sind die nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Teile, die im Fehlerfall *unmittelbar* Spannung annehmen können, mit dem Schutzleiter leitend zu verbinden.
Sind die unmittelbar Spannung annehmenden Teile der Berührung unzugänglich, z. B. Unterwassermotorpumpen in nicht besteigbaren Brunnen, so ist der Schutzleiter an den berührbaren, unmittelbar Spannung annehmenden Teil, z. B. an die Austrittsstelle des Steigrohrs, anzuschließen.
Sind in einem Raum Schutzkontaktsteckdosen angeordnet, deren Schutzkontakt an einen Schutzleiter angeschlossen ist, oder sind fest angeschlossene Betriebsmittel in eine Schutzmaßnahme mit Schutzleiter einbezogen, so müssen
alle Steckdosen in diesem Raum — außer denen in Kleinspannungsstromkreisen und denen mit der Schutzmaßnahme Schutztrennung — Schutzkontakte haben,
an sämtlichen Betriebsmitteln in diesem Raum Schutzmaßnahmen entsprechend diesem Standard angewendet werden.

Potentialausgleich

Innerhalb von Gebäuden sind

— metallene Leitungssysteme, z. B. Wasser-, Gas- und Heizungsrohre, ferner Kabelmäntel, Fundamenterder, zusammenhängende leitfähige Gebäudekonstruktionen, Stahlarmierungen von Betonbauten, Erdungsleitungen für Informationsanlagen, Blitzschutzanlagen u. dgl., zusammenzuschließen, z. B. über eine Potentialausgleichsschiene im Hausanschlußraum, und mit dem Schutzleiter zu verbinden. Das gilt nicht für Schutzleiter von FU-Schutzschaltungen,

— Wasserzähler aus Isolierstoff zu überbrücken, sofern diese in metallene Wasserrohrleitungen eingebaut sind.

Für zulässige Ausnahmen gelten TGL 200-0602/03, Abschn. 1.3.4.2., TGL 200-0629/01 und TGL 200-0644.
Der Anschluß von Potentialausgleichleitungen an Wasserleitungen hat hinter dem Wasserzähler, in Fließrichtung gesehen, und an Gasleitungen hinter der Hauptabsperreinrichtung zu erfolgen.

Beispiel für den Potentialausgleich s. Bild 5.52.

Mindestquerschnitte von Potentialausgleichleitungen:

10 mm² Kupfer, 25 mm² Aluminium, 50 mm² Stahl.

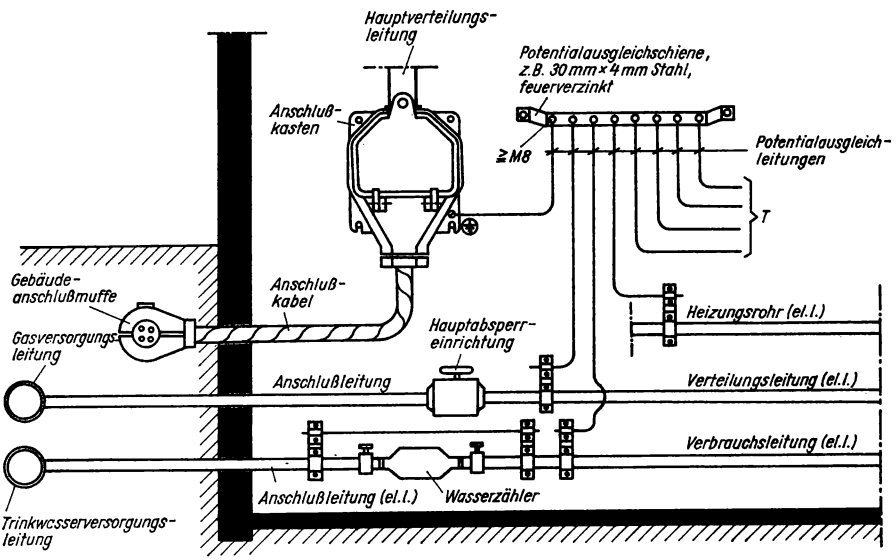


Bild 5.52. Beispiel für den Potentialausgleich bei Gebäudeanschluß über Kabel in einem nullungsfähigen Elektroenergiesystem
T Abgang zu weiteren in den Potentialausgleich einzubeziehenden Teilen, d. h. elektrisch leitend

Potentialausgleichleitungen sind so zu legen und anzuschließen, daß ihre Wirksamkeit durch die zu erwartenden äußeren Einwirkungen nicht beeinträchtigt werden kann. An den Stellen, an denen die Potentialausgleichleitungen mechanisch gefährdet sind, ist ein geeigneter Schutz vorzusehen.
Die Anschlußstellen der Potentialausgleichleitungen müssen zugänglich und bei Feuchtigkeitseinfluß gegen Korrosion geschützt sein.
Isolierte Potentialausgleichleitungen dürfen grün-gelb gekennzeichnet sein.

Schutzleiter

Mindestquerschnitt

1. Die Mindestquerschnitte des Schutzleiters sind Tabelle 5.124 zu entnehmen, wenn die Schutzmaßnahmen

Nullung,
Schutzerdung,
Schutzleitungssystem ohne ständige Überwachung des Isolationswiderstands gegen Erde der betriebsmäßig stromführenden Leiter

Tabelle 5.124: Schutzleiter-Mindestquerschnitte[1]) für die Schutzmaßnahmen Nullung, Schutzerdung, Schutzleitungssystem ohne ständige Überwachung des Isolationswiderstands

Außenleiter-Nennquerschnitt	Schutzleitermindestquerschnitt in mm² Schutzleiter			
	isoliert und gegen mechanische Beschädigung		nicht isoliert und gegen mechanische Beschädigung	
mm²	geschützt	ungeschützt	geschützt	ungeschützt
0,5	0,5[2])	4	1,0[2])	4
0,75	0,75[2])			
1,0	1,0[2])			
1,5	1,5			
2,5	2,5		1,5	
4		4	2,5	
6		6		4
10		10		6
16		16		10
25		16		16
35		16		16
50		25		25
70		35		35
95		50		50
120		70		
150		70		
185		95		
240		120		
300		150		
400		185		
500		240		

[1]) Die Schutzleitermindestquerschnitte nach Tabelle 5.124 gelten auch
bei Anschluß mehrerer Betriebsmittel an einen gemeinsamen FU- oder FJ-Schutzschalter in Elektroenergiesystemen ohne betriebsmäßig geerdeten Sternpunkt, Mittelpunkt oder Außenleiter,
bei Anschluß mehrerer Betriebsmittel an einen FU-Schalter, wenn mindestens eines der Betriebsmittel Verbindung zu einem Erder (< 3 Ω) hat. In diesem Fall ist der Schutzleiter zwischen dem geerdeten und dem nicht geerdeten Betriebsmittel entsprechend dem Außenleiterquerschnitt des nicht geerdeten Betriebsmittels nach Tabelle 5.124 zu bemessen.
[2]) Für feste Legung in Installationsanlagen unzulässig.

angewendet werden und die Nennspannung der Anlage 500 V nicht übersteigt.
Beträgt die Nennspannung der Anlage mehr als 500 V, muß der Schutzleiter — ausgenommen die Schutzleiterschiene in Schalt- und Verteilungsanlagen — dem Außenleiter mindestens leitwertgleich sein.
Für zulässige Ausnahmen gilt TGL 200-0602/03, Abschn. 1.6.1.3.

Für Leiterbrücken zwischen dem Schutzleiter und den leitfähigen berührbaren Teilen der in die Schutzmaßnahme einzubeziehenden Betriebsmittel dürfen die Werte der Tabelle 5.124 unterschritten werden, wenn die Erwärmung bei Kurzschluß keine nachteiligen Auswirkungen auf die Funktion der Betriebsmittel hat.

Die Mindestquerschnitte des Schutzleiters nach Tabelle 5.124 beziehen sich auf gleichen Werkstoff von Außen- und Schutzleiter. Bestehen Außen- und Schutzleiter aus unterschiedlichen Werkstoffen, so ist der Schutzleiter-Mindestquerschnitt leitwertgleich umzurechnen (Tabellen 5.125 und 5.126).

Schutzleiter aus Aluminium müssen

bei mechanisch geschützter Legung, z. B. bei Verwendung von Mantelleitungen oder Kabeln oder bei Legung des Schutzleiters im oder unter Putz, in Rohren oder Kanälen, einen Mindestquerschnitt von 2,5 mm²,

bei mechanisch ungeschützter Legung, z. B. bei auf Putz gelegten Aderleitungen ohne zusätzliche Abdeckung, einen Mindestquerschnitt von 10 mm² haben.

2. *Isolierte Schutzleiter*, die in Erde gelegt werden, müssen sich bei Leiterquerschnitten unter 10 mm² in einer Mantelleitung oder in einem Kabel befinden.
Isolierte Schutzleiter, die im Erdreich an Erder angeschlossen werden, müssen in Kupfer und mit einem Mindestquerschnitt von 10 mm² ausgeführt sein.

Tabelle 5.125: Schutzleiter-Mindestquerschnitte für die Schutzmaßnahme Schutzleitungssystem mit ständiger Überwachung des Isolationswiderstands[1])

Außenleiter-Nennquerschnitt in mm²		Schutzleiter-Mindestquerschnitt in mm²		
Kupfer	Aluminium	Kupfer	Aluminium[2])	Stahl
bis 16	bis 25	leitwertgleich dem Außenleiter		
über 16	über 25	16	25	100

[1]) Ausnahme s. Fußnote [1]) der Tabelle 5.126.
[2]) s. Abschn. Schutzleiter, Absatz 2.

Tabelle 5.126[1]): Schutzleiter-Mindestquerschnitte für die Schutzmaßnahmen FU-Schutzschaltung[2]), FJ-Schutzschaltung[2]), TFJ-Schutzschaltung

Art der Legung des Schutzleiters	Schutzleiter-Mindestquerschnitt in mm²		
	Kupfer	Aluminium[3])	Stahl
fest und mechanisch geschützt, z. B. im oder unter Putz, in Rohren oder Kanälen sowie bei Verwendung von Mantelleitungen oder Kabeln	1,5	2,5	50
mechanisch ungeschützt, z. B. bei Legung von Aderleitungen auf Putz ohne zusätzliche Abdeckung	4	10	

[1]) Die Tabelle 5.126 gilt auch, wenn die Schutzmaßnahme Schutzleitungssystem mit ständiger Überwachung des Isolationswiderstands gegen Erde der betriebsmäßig stromführenden Leiter und Abschaltung der Anlage spätestens nach Unterschreitung des Isolationswiderstands von 25 Ω/V, bezogen auf die Nennspannung der Anlage, angewendet wird.
[2]) Ausnahmen s. Fußnote [1]) der Tabelle 5.124.
[3]) s. Abschn. Schutzleiter, Absatz 2.

Für in Erde liegende, nichtisolierte Schutzleiter gelten die Mindestquerschnitte und Werkstoffe für Erder nach TGL 200-0603/02.

Trennen des Schutzleiters

Das alleinige Unterbrechen des Schutzleiters, z. B. mittels Schalter oder Sicherungen, ist unzulässig.
Sind Schutzleiter zusammen mit den betriebsmäßig stromführenden Leitern schaltbar, so muß die Kontaktgabe des Schutzleiters beim Einschalten oder beim Herstellen einer Steckverbindung gegenüber den anderen Leitern voreilend und die Kontakttrennung beim Unterbrechen nacheilend sein.
Bei Schaltern mit Sprungbetätigung für Ein- und Ausschaltung ist gleichzeitige Kontaktgabe und -trennung des Schutzleiters und der betriebsmäßig stromführenden Leiter zulässig.

Leitfähige Konstruktionselemente, Rohre und Kabelmäntel als Schutzleiter

Leitfähige Konstruktionselemente, wie Schalt- und Krangerüste, Stahlarmierungen von Betonbauten, ferner leitfähige Rohre, Kabelmäntel, konzentrische Leiter von Kabeln, Kabelpritschen und Gehäuse, die konstruktiv eine Einheit bilden, dürfen als Schutzleiter verwendet werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:
Der Schutzleiter darf betriebsmäßig keinen Strom führen. Diese Bedingung gilt nicht für Kabelmäntel und konzentrische Leiter von Kabeln.
Die Konstruktionselemente, Rohre, Kabelmäntel und konzentrischen Leiter von Kabeln müssen leitend verbunden, Wasserzähler einschl. Absperreinrichtungen müssen überbrückt sein.
Für den *Mindestquerschnitt der Überbrückungsleitung* gilt TGL 200-0602/03, Abschn. 1.6.1, jedoch mindestens 10 mm² Kupfer, 25 mm² Aluminium, 50 mm² Stahl.
Metallene Türscharniere und Einhängevorrichtungen gelten als leitende Verbindung.
Die Konstruktionselemente, Rohre, Kabelmäntel und konzentrischen Leiter von Kabeln müssen dem erforderlichen Querschnitt des Schutzleiters mindestens leitwertgleich sein.
Durch Ausbau von Konstruktionselementen, Rohren und Kabeln darf die durchgängige leitende Verbindung nicht unterbrochen werden.

Als Schutzleiter sind unzulässig:

Metallmäntel von Leitungen, z. B. Rohrdrähte,
Stahl- und Aluminiumbandbewehrungen einschließlich der Stahlgegenwendel von Kabeln,
Spanndrähte und -seile zur Befestigung von Leitungen und Kabeln, z. B. bei der Spanndrahtinstallation,
Tragorgane von Leitungen, z. B. von der starken Gummischlauchleitung NSHT, und von Luftkabeln.
Ausnahme nach TGL 200-0641/02.

Schutzleiter an ortsveränderlichen Betriebsmitteln

An ortsveränderlichen Betriebsmitteln muß sich der Schutzleiter mit den betriebsmäßig stromführenden Leitern in einer gemeinsamen Umhüllung befinden.
Der Schutzleiter muß in Leitungen, die an der Anschlußstelle des Betriebsmittels auf Zug oder Drehung beansprucht werden können, so lang ausgeführt oder so angeordnet sein, daß er beim Versagen der Zugentlastung oder des Verdrehungsschutzes erst *nach* den betriebsmäßig stromführenden Adern mechanisch beansprucht wird.

Kennzeichnung

Beim Einsatz von Leitungen, außer Freileitungen, dürfen
nur grün-gelb gekennzeichnete Adern oder Aderleitungen[1]),
bei Stegleitungen NFY nur jeweils die mit dem Buchstaben J[1]) gekennzeichneten Adern,
bei Drillingsleitungen nur jeweils die mittleren Adern
als Schutzleiter verwendet werden.
Beim Einsatz von Kabeln dürfen, soweit nicht der Kabelmantel oder der konzentrische Leiter als Schutzleiter dient, nur die Adern als Schutzleiter verwendet werden, die grün-gelb oder mit der Zahl Null gekennzeichnet sind.[1])
Für *zulässige Abweichungen* gilt TGL 200-0602/03, Abschn. 1.6.5.3 und 1.6.5.4.

Beispiel: Die Forderungen gelten nicht für die Kennzeichnung des Schutzleiters in Anlagen, die ohne installationstechnischen Aufwand, insbesondere ohne das Auswechseln der Leitungen und Kabel, auf eine andere Spannung oder Stromart umgestellt werden und in denen nach der Umstellung die Schutzmaßnahme Nullung Anwendung findet.

[1]) Die Kennzeichnung hat auf der gesamten Schutzleiterlänge durch den Hersteller des Kabels zu erfolgen.

In diesem Fall ist am Hausanschlußkasten, an zentralen Verteilungen, an der Zählertafel, an Sicherungskästen, Schutzkontaktsteckdosen und festen Anschlußstellen für Betriebsmittel der Schutzklasse I der Schutzleiter an seinen Anschlußenden in einer von den betriebsmäßig stromführenden Leitungen oder Adern unterscheidbaren Farbe einheitlich zu kennzeichnen. An geeigneten Stellen, z. B. an der Zählertafel, ist auf die besondere Art der Kennzeichnung des Schutzleiters hinzuweisen.

Beispiel für den Text eines Schiebebildes: Achtung! Umgestellte Anlage, Schutzleiter nicht im gesamten Verlauf gekennzeichnet! Bei mehradrigen Leitungen und Kabeln, die als Hauptverteilungs-, Haupt- und Zählerzuleitungen (Steigeleitungen) dienen, sowie bei Hauseinführungsleitungen darf die grün-gelbe Ader oder Leitung auch für den neutralen Leiter in nicht nullungsfähigen Elektroenergiesystemen verwendet werden.
Bei nicht isolierten Schutzleitern darf die Kennzeichnung entfallen, wenn (z. B. durch die Art der Legung des Schutzleiters) eine Verwechslung mit betriebsmäßig stromführenden Leitern ausgeschlossen ist.
Bei Verwechslungsgefahr ist die Kennzeichnung des nicht isolierten Schutzleiters nach TGL 200-0601/02 durchzuführen.

Isolierung

Schutzleiter, die sich mit betriebsmäßig stromführenden Leitungen in einer gemeinsamen Umhüllung befinden, sind wie diese zu isolieren.
Das gilt nicht für bestehende Anlagen, in denen als Nulleiter nicht isolierte oder umhüllte Leitungen verwendet werden.

Steckverbindung

Der Einsatz von Schutzkontaktsteckdosen ist nur mit angeschlossenem Schutzleiter zulässig. Das gilt nicht für Schutzkontaktsteckdosen mit der Schutzmaßnahme Schutztrennung.
An zweipoligen Schutzkontaktsteckdosen ist bei Anwendung der Schutzmaßnahme Nullung der Nulleiter zuerst an die Schutzkontaktklemme und danach an eine der Hauptleiterklemmen anzuschließen.
Stecker für Betriebsmittel der Schutzklasse I (mit Schutzleiteranschluß) müssen Schutzkontakte haben, an die der Schutzleiter anzuschließen ist.
Stecker ohne Schutzkontakte, die in Schutzkontaktsteckdosen eingeführt werden können, dürfen nur für Betriebsmittel der Schutzklasse II (mit Schutzisolierung) verwendet werden.

Schutzisolierung (Bild 5.53)

Die Schutzisolierung darf ausgeführt werden als Schutzisolierumhüllung, Schutzzwischenisolierung, verstärkte Isolierung.
Der für die Schutzisolierung verwendete Isolierstoff muß eine solche mechanische, elektrische und thermische Festigkeit sowie chemische Beständigkeit haben, daß die Schutzmaßnahme bei bestimmungsgemäßem Gebrauch der Betriebsmittel wirksam bleibt.

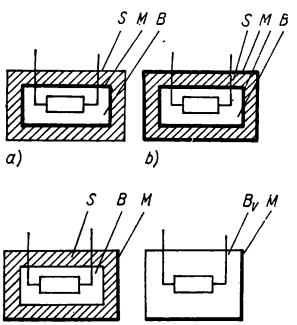


Bild 5.53. Ausführungsformen der Schutzmaßnahme Schutzisolierung
a) Schutzisolierumhüllung, b) Schutzzwischenisolierung, c) verstärkte Isolierung
S Schutzisolierung; B Betriebsisolierung, normal; Bv Betriebsisolierung, verstärkt; M Metallumhüllung

Schäden an der Schutzisolierung dürfen nur unter Verwendung von Original-Ersatzteilen oder nach den Anweisungen des Herstellers beseitigt werden.
An den leitfähigen, der Berührung zugänglichen Teilen von Betriebsmitteln der Schutzklasse II darf kein Schutzleiter angeschlossen werden, es darf auch keine Schutzleiteranschlußstelle vorhanden sein.
Betriebsmittel der Schutzklasse II sind mit dem Schutzisolierungszeichen ⧈ nach TGL 34364 zu kennzeichnen.

Schutzkleinspannung (Bild 5.54)

Nachstehende Werte dürfen nicht überschritten werden:

Nennlastspannung 42 V,
Leerlaufspannung 50 V.

Bei Wechselspannung gilt der Effektivwert.

Zum Erzeugen von Schutzkleinspannungen sind nur folgende Betriebsmittel zulässig:

Schutztransformatoren nach TGL 200-1766,
Generatoren,
Umformer mit elektrisch getrennten Wicklungen,
Akkumulatoren,
galvanische Elemente.

In Schutzkleinspannungs-Stromkreisen dürfen die unter Spannung stehenden Leiter nicht betriebsmäßig geerdet und nicht mit Leitern anderer Stromkreise verbunden sein.

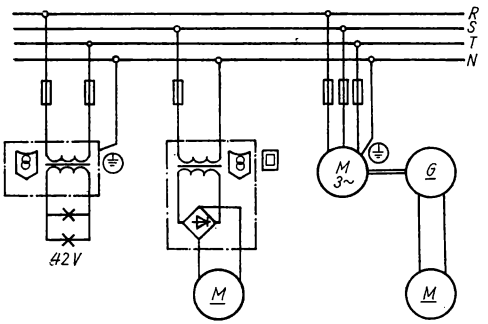


Bild 5.54. Beispiele für Schaltungen zum Erzeugen von Schutzkleinspannung

Schutzkleinspannungs-Stromkreise dürfen sich nicht zusammen mit anderen Stromkreisen in einer mehradrigen Leitung und bei Verwendung von Aderleitungen sich nicht mit ihnen in Rohren, Leitungskanälen oder in einem Leitungsbündel befinden.
Steckverbinder in Schutzkleinspannungs-Stromkreisen müssen den Bedingungen nach TGL 200-0611/02 genügen und dürfen keine Schutzkontakte haben.
Geräte und Leitungen müssen mindestens für 250 V isoliert sein.
An den leitfähigen, der Berührung zugänglichen Teilen von Betriebsmitteln der Schutzklasse III (Schutzkleinspannung) nach TGL 21366 dürfen keine Schutzleiter angeschlossen und keine Schutzleiteranschlußstellen vorhanden sein.

Schutztrennung (Bild 5.55)

Die galvanische Trennung des Betriebsstromkreises von speisenden Elektroenergiesystemen hat durch folgende Betriebsmittel zu erfolgen:

Trenntransformatoren nach TGL 200-1765,
Motor-Generatoren,
Umformer mit galvanisch getrennten Wicklungen.

An die vorgenannten Betriebsmittel darf jeweils nur ein Gerät oder eine Steckdose angeschlossen werden.
Im schutzgetrennten Betriebsstromkreis dürfen die betriebsmäßig stromführenden Leiter nicht geerdet und nicht mit Leitern anderer Stromkreise verbunden werden.
Beim Einsatz ortsveränderlicher Geräte der Schutzklasse I, z. B. Elektrowerkzeuge, in engen Räumen mit metallenem Standort, z. B. in Kesseln, ist das Gehäuse des Geräts über eine Potentialausgleichleitung mit dem Standort zu verbinden.

Das Betriebsmittel (Trafo, Motor-Generator oder Umformer) ist außerhalb des engen Raumes aufzustellen. Für den mechanisch ungeschützten Teil der Potentialausgleichleitung gilt ein Mindestquerschnitt von 4 mm² Cu. Ist diese Leitung isoliert, so darf sie grün-gelb gekennzeichnet werden.
Befinden sich im schutzgetrennten Betriebsstromkreis Steckverbinder, Schalter u. dgl. der Schutzklasse I, so sind diese untereinander und bei Verwendung eines Gerätes der Schutzklasse I auch mit diesem über eine Potentialausgleichleitung zu verbinden. Die Potentialausgleichleitung muß sich mit den betriebsmäßig stromführenden Leitern in einer gemeinsamen Umhüllung befinden, dem Außenleiter mindestens leitwertgleich und grün-gelb gekennzeichnet sein.

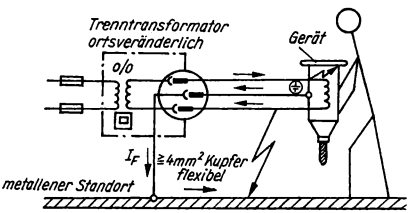


Bild 5.55. Beispiel für den Potentialausgleich zwischen Geräten und metallenem Standort bei Anwendung der Schutztrennung

Schutzleitungssystem (Bild 5.56)

Das Schutzleitungssystem darf nur angewendet werden, wenn im Betriebsstromkreis kein Leiter, auch nicht der Sternpunkt des Systems, unmittelbar geerdet ist und wenn der Betriebsstromkreis keine galvanische Verbindung zu Stromkreisen anderer Elektroenergiesysteme hat.
Die nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Anlageteile sind untereinander und mit den der Berührung zugänglichen zusammenhängenden leitfähigen Konstruktionselementen, Rohrleitungssystemen, Kabelmänteln u. dgl. über einen Schutzleiter zu verbinden. Ausnahme s. TGL 200-0644.
Der Schutzleiter darf nicht mit dem neutralen Leiter des Betriebsstromkreises verbunden sein.

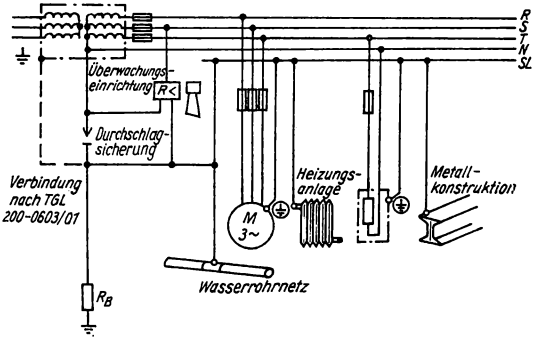


Bild 5.56. Beispiel für das Schutzleitungssystem in einem Drehstromsystem

Ist in ortsfesten Anlagen mit ortsfestem Elektroenergieerzeuger oder -übertrager nicht gewährleistet, daß bei einem Doppelkörperschluß der Abschaltstrom I_a[1]) fließt, muß der Isolationswiderstand gegen Erde der betriebsmäßig stromführenden Leiter ständig überwacht werden. Die Isolationsüberwachungseinrichtung muß spätestens dann signalisieren oder die Anlage abschalten, wenn der Isolationswiderstand gegen Erde der betriebsmäßig stromführenden Leiter unter 25 Ω/V, bezogen auf die Nennspannung der Anlage, sinkt.
Diese Forderungen gelten nicht für elektrotechnische Versuchsanlagen.
In Drehstromanlagen muß die Überwachung des Isolationswiderstandes gegen Erde der betriebsmäßig stromführenden

[1]) S. Abschn. Schutzerdung; $I_a = kI_n$.

Leiter, sofern diese gefordert wird, nach dem Prinzip der Gleichspannungsüberlagerung erfolgen.
Ist ein unter Spannung stehender Leiter des Betriebsstromkreises, z. B. der Sternpunkt eines Drehstromsystems, über eine Durchschlagsicherung geerdet, muß, sofern eine Isolationsüberwachungseinrichtung gefordert wird, diese den durchschlagenen Zustand der Durchschlagsicherung signalisieren oder die Anlage beim Ansprechen der Durchschlagsicherung abschalten.

Schutzerdung (Bild 5.57)

Die nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Anlagenteile sind über einen Schutzleiter mit dem Schutzerder zu verbinden.

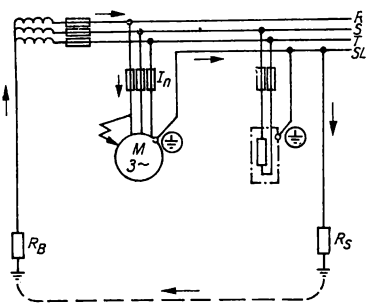


Bild 5.57. Beispiel für die Schutzerdung mit Rückfluß des Fehlerstroms durch das Erdreich

Dabei gilt:

1. Bei Rückfluß des Fehlerstroms durch das Erdreich berechnet sich der Erdungswiderstand der Schutzerdungsanlage nach Gleichung (1). Das gilt auch für solche Elektroenergiesysteme, in denen kein Leiter des Betriebsstromkreises unmittelbar geerdet ist.

$$R_S \leqq \frac{U_{B\,zul}}{I_a} \tag{1}$$

$$I_a = kI_n \tag{2}$$

R_S Erdungswiderstand der Schutzerdungsanlage,
$U_{B\,zul}$ höchstzulässige Berührungsspannung nach Abschn. Erfordernis von Schutzmaßnahmen,
I_a Abschaltstrom der Überstromschutzeinrichtung,
I_n Nennstrom der Schmelzsicherung oder des Leitungsschutzschalters oder der eingestellte Wert des magnetischen Überstromauslösers bei Motorschutz- und Leistungsschaltern,
k Abschaltfaktor nach Tabelle 5.127.

2. Bei Rückfluß des Fehlerstroms über das metallene Wasserrohrnetz, über Kabelmäntel oder andere Leiter zum Elektroenergieerzeuger oder -übertrager, z. B. zum Sternpunkt eines Drehstromsystems oder zum Mittelpunkt eines Gleichstromsystems,
müssen diese Leiter mit den natürlichen Erdern im Bereich der Anlage, über die ein Erdschluß entstehen kann, verbunden sein und
muß die Impedanz der Fehlerstrombahn der Gleichung (3) genügen.

$$Z_{Sch} \leqq \frac{U_{LE}}{I_a} \tag{3}$$

Z_{Sch} Impedanz der Fehlerstrombahn (Schleifenimpedanz),
U_{LE} Leiter-Erde-Spannung,
I_a Abschaltstrom der Überstromschutzeinrichtung nach Gleichung (2).

3. Die Benutzung metallener Leitungssysteme, z. B. des Wasserrohrnetzes, als Fehlerstromrückleiter gemäß Absatz 2. ist nur mit Zustimmung des Rechtsträgers der Leitungssysteme zulässig.

Tabelle 5.127: Zuordnung der Abschaltfaktoren zu den Überstromschutzeinrichtungen

Art der Überstromschutzeinrichtung		Abschaltfaktor k	
		für die dem Verbraucher unmittelbar vorgeordnete Überstromschutzeinrichtung	für alle übrigen nicht unter Spalte 2 fallenden Überstromschutzeinrichtungen
Schmelzsicherung	flink, träg →	3,5	2,5
	träg bis 50 A		
	ab 63 A	5	
Leitungsschutzschalter		3,5	
Motorschutz- und Leistungsschalter mit magnetischer Überstromauslösung	Auslösung unverzögert	1,25	
	Auslösung verzögert	1,5	

Nullung (Bild 5.58)

Die nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Anlageteile sind mit dem Schutzleiter (Nulleiter) zu verbinden.

Dabei gilt:

1. Bei einem einpoligen Kurzschluß muß mindestens der Abschaltstrom I_a nach Gleichung (2) fließen. Es gelten die Bedingungen nach den Gleichungen (3) und (4). Ausnahmen s. Absätze 2. und 3.

$$I_{k(1)} \geqq I_a \tag{4}$$

$I_{k(1)}$ Dauerkurzschlußstrom bei einpoligem Kurzschluß nach TGL 200-0604/02.

2. Kann die Bedingung nach Gleichung (4) nicht erfüllt werden, ist die Nullung nur dann zulässig, wenn die Anlage beim Überschreiten der Nulleiterspannung — gemessen zwischen Nulleiter und Bezugserde — über die höchstzulässige Berührungsspannung (s. Abschn. Berührungsspannung) selbsttätig und allpolig, einschließlich des Schutzleiters, abgeschaltet wird (Nulleiterspannungs-Überwachung). Ausnahme s. Absatz 3.

3. Die Bedingungen nach den Absätzen 1. und 2. gelten nicht für bestehende Freileitungsnetze bis zum Hausanschlußkasten, sofern

der Schutzleiter unterhalb der Außenleiter angeordnet ist,
Schutz- und Außenleiter keine massiven Leiter sind,
Schutz- und Außenleiter aus Kupfer oder Aluminium bestehen, deren Querschnitte mindestens

16 mm² bei Kupfer, 25 mm² bei Aluminium

und bei Hauseinführungsleitungen mindestens

10 mm² bei Kupfer, 16 mm² bei Aluminium

betragen und

als Hauseinführungsleitungen in Dachständern mehradrige Leitungen, z. B. Mantelleitungen, oder Kabel eingesetzt worden sind.

4. Der Schutzleiter ist an möglichst vielen Stellen zu erden, mindestens jedoch in der Nähe des Elektroenergieerzeugers oder -übertragers und in Freileitungsnetzen zusätzlich in der Nähe der Enden des Netzausläufers. Natürliche Erder, insbesondere metallene Wasserrohrleitungen, sind mit dem Schutzleiter zu verbinden.

5. Die Forderung nach Absatz 4. gilt nicht für ortsveränderliche Anlagen mit ortsveränderlichem Elektroenergieerzeuger oder -übertrager. In diesem Fall ist der Schutzleiter jedoch mit den natürlichen Erdern, wie leitfähige Rohrleitungssysteme, im Bereich der Anlage, über die ein Erdschluß entstehen kann, uz verbinden.

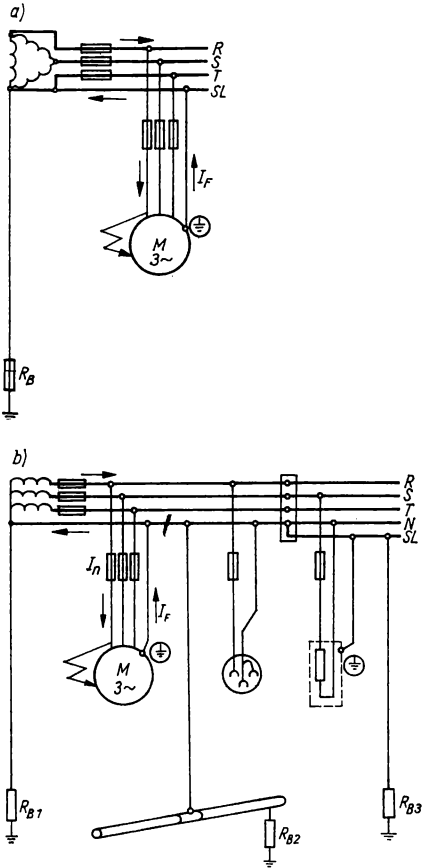


Bild 5.58. Beispiel für die Nullung in
a) Drehstrom-Dreileitersystem, b) Drehstrom-Vierleitersystem

Betriebsmäßig stromführende Schutzleiter müssen sich in einer gemeinsamen Umhüllung mit den Außenleitern befinden. Das gilt nicht für Steg- und Sonderstegleitungen in Drehstromanlagen und für Einleiterkabel als Schutzleiter. Zu einem Sicherungskreis gehörende Stegleitungen müssen unmittelbar nebeneinander liegen.

Fehlerspannungs-Schutzschaltung (Bild 5.59)

Die nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Anlageteile sind über einen Schutzleiter mit dem Fehlerspannungsauslöser des Fehlerspannungs-Schutzschalters (FU-Schutzschalter) und dieser ist über eine Hilfserdungsleitung mit dem Hilfserder zu verbinden.
Dient der FU-Schutzschalter als Anregeglied für ein Schaltgerät, so darf die Gesamtausschaltzeit von FU-Schalter und Schaltgerät 0,2 s nicht überschreiten.
Für die Hilfserdungsleitung gelten die Mindestquerschnitte nach Tabelle 5.126. Isolierte Hilfserdungsleitungen, die im Erdreich an Hilfserder angeschlossen werden, müssen in Kupfer, Mindestquerschnitt 10 mm², ausgeführt werden.
Für nichtisolierte Hilfserdungsleitungen im Erdreich gelten die Querschnitte und Werkstoffe für Erder nach TGL 200-0603/02.

Der Erdungswiderstand der Hilfserdungsanlage darf

bei einer Berührungsspannung von 24 V 200 Ω,
bei einer Berührungsspannung von 65 V und 100 V 800 Ω

nicht überschreiten.

Die isolierte Hilfserdungsleitung ist grün-gelb zu kennzeichnen. Der Schutzleiter und die mit ihm in leitender Verbindung stehenden Betriebsmittel einerseits sowie die Hilfserdungsleitung und der Hilfserder andererseits sind so voneinander zu isolieren, daß eine Überbrückung des FU-Auslösers ausgeschlossen ist. Für die Verlegung der Schutzleiter und der Hilfserdungsleitung gilt TGL 200-0602/03, Abschn. 8.6.

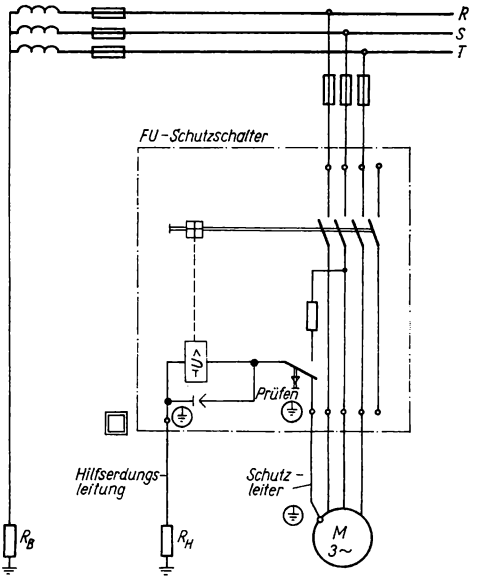


Bild 5.59. Beispiel für die FU-Schutzschaltung in einem Drehstrom-Dreileitersystem

Fehlerstrom-Schutzschaltung (Bild 5.60)

In den Betriebsstromkreis der zu überwachenden Betriebsmittel ist ein Fehlerstrom-Schutzschalter (FI-Schutzschalter) oder ein durch ein Fehlerstrom-Relais (FI-Relais) angeregtes Schaltgerät einzusetzen, und die berührbaren leitfähigen Teile der Betriebsmittel sind zu erden.
Es dürfen nur FI-Schutzschalter nach TGL 20480 verwendet werden.
Dient ein FI-Relais als Anregeglied für ein Schaltgerät, so darf die Gesamtausschaltzeit von FI-Relais und Schaltgerät 0,2 s nicht überschreiten.

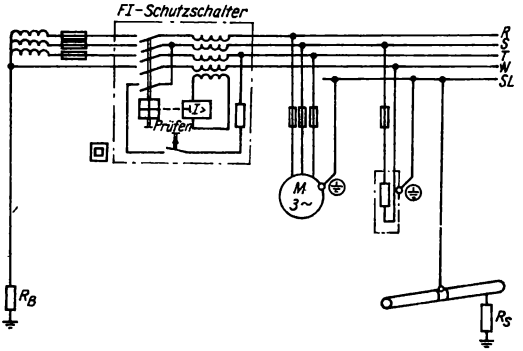


Bild 5.60. Beispiel für die FI-Schutzschaltung in einem Drehstrom-Vierleitersystem

Der Erdungswiderstand der Schutzerdungsanlage ist nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$R_S \leqq \frac{U_{B\,zul}}{I_{fn}}$$

R_S Erdungswiderstand der Schutzerdungsanlage,
$U_{B\,zul}$ höchstzulässige Berührungsspannung nach Abschn. Berührungsspannung,
I_{fn} Nennfehlerstrom des FI-Schutzschalters oder FI-Relais.

Für die Verlegung des Schutzleiters gilt TGL 200-0602/03, Abschn. 9.4. und 9.5.

Trennfehlerstrom-Schutzschaltung (Bild 5.61)

Die betriebsmäßig stromführenden Leiter und der Schutzleiter sind an ein Versorgungsgerät anzuschließen. Für das Versorgungsgerät gelten die Bedingungen nach TGL 200-0602/03, Abschn. 10.2.
Der Schutzleiter ist in der Nähe des Versorgungsgeräts zu erden oder bei Anlagen auf Schiffen mit dem metallenen Schiffskörper zu verbinden. Der Erdungswiderstand darf 500 Ω nicht überschreiten.

Isolationswiderstand Außenleiter gegen Schutzleiter ≧ 20 kΩ
Leiter-Erde-Kapazität je betriebsmäßig stromführenden Leiter ≦ 100 nF

Schutzleiter und die betriebsmäßig stromführenden Leiter sind getrennt zu verlegen.

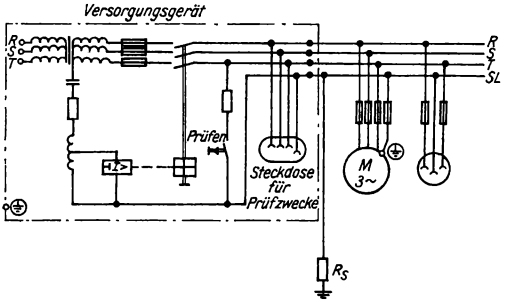


Bild 5.61. Beispiel für die TFI-Schutzschaltung in einem Drehstromsystem

Prüfungen

Die Prüfungen der zulässigen Schutzmaßnahmen sind nach TGL 200-0602/03, Abschn. 11., durchzuführen.

5.3.8. Erdung in elektrotechnischen Anlagen

Es gelten folgende wichtige Standards:

»Erdung in elektrotechnischen Anlagen«

TGL 200-0603/01	Begriffe
TGL 200-0603/02	Grundforderungen, Bemessung, Ausführung
TGL 200-0603/03	Starkstromanlagen
TGL 200-0603/08	Prüfung von Erdungsanlagen
TGL 200-0603/21	Montage von Erdungsanlagen, künstliche Erder

5.3.8.1. Grundforderungen, Bemessung, Ausführung

Es sind folgende wichtigen Grundforderungen zu beachten:

— Erdungsanlagen sind so zu errichten, daß bei allen zu erwartenden Beanspruchungen ihre Funktionsfähigkeit und Schutzgüte gewährleistet sind.

— Vorzugsweise sind natürliche Erder[1]), und nur in Ausnahmefällen, z. B. wenn keine natürlichen Erder vorhanden sind, sind künstliche Erder[2]) zulässig.

— Die Wirksamkeit natürlicher Erder und Erdungsleitungen ist bei Arbeiten an diesen zu gewährleisten bzw. bei Störungen unverzüglich wiederherzustellen.

— Bei beabsichtigten Unterbrechungen von Erdern oder Erdungsleitungen muß die Trennstelle durch einen Leiter von mindestens 16 mm² Cu oder einen leitwertgleichen Querschnitt überbrückt werden.

Verwendbarkeit natürlicher Erder und Erdungsleitungen

Für natürliche Fundamenterder ist im Beton ein Bindemittel auf Silikatbasis, z. B. Portlandzement, zu verwenden. Bei Verwendung von Bindemitteln auf Aluminatbasis, z. B. Tonerdezement, oder auf Kunststoffbasis sind die Bewehrungsstähle als Erder nicht zulässig.
Kabel, leitfähige Konstruktionselemente und metallene Rohrleitungen dürfen als Erder oder Erdungsleitung benutzt werden, wenn dafür die Bedingungen nach TGL 200-0603/02, Abschn. 3.2.···3.4., eingehalten werden. So darf z. B. bei leitfähigen Konstruktionsteilen wie Schaltgerüsten, Stahlkonstruktionen u. ä. durch den Ausbau von Konstruktionsteilen die durchgängige leitfähige Verbindung nicht unterbrochen werden.

Thermische Bemessung der Erder und Erdungsleitungen

Erdungsleitungen sind für den Erdschlußstrom[3]) oder den Erdkurzschlußstrom[4]) zu bemessen.
Erdungssammelleitungen in Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV sind entsprechend der in der Anlage bei Doppelerdschluß oder Erdkurzschluß zu erwartenden Stromstärke zu bemessen.
Erdungssammelleitungen in Form von Schaltgerüsten, Kabelpritschen o. ä. gelten als ausreichend bemessen, wenn sie mindestens an beiden Enden, bei Längen über 10 m außerdem alle angefangenen 10 m mit dem Erder verbunden sind.
In Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V sind bei Verwendung von Erdungsleitungen als Schutzleiter die Forderungen nach TGL 200-0602/03 zu erfüllen.

Richtwerte für die Strombelastbarkeit nicht isolierter Leiter s. Tabelle 5.128 und Bild 5.62.

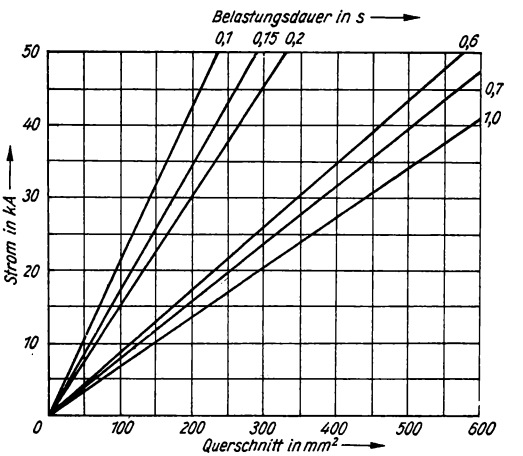


Bild 5.62. Zulässiger Belastungsstrom für Leiter aus Bandstahl bei einer Endtemperatur von 200 °C

[1]) mit der Erde oder mit Wasser unmittelbar oder über Beton in Verbindung stehende Metallteile, deren ursprünglicher Zweck nicht die Erdung ist, die aber gleichzeitig als Erder wirken, z. B. metallene Rohrleitungen, Gleise, Kabelmäntel, metallene Gebäudekonstruktionen
[2]) Leiter aus Metall, z. B. Bandstahl, oder anderem leitendem Werkstoff, der ausschließlich als Erder verwendet wird
[3]) Fehlerstrom, der bei Erdschluß an der Fehlerstelle vom Betriebsstromkreis über Erde oder einen geerdeten Leiter fließt
[4]) Fehlerstrom, der bei Erdkurzschluß an der Fehlerstelle vom Betriebsstromkreis über Erde oder einen geerdeten Leiter fließt. Er wird als Anfangskurzschlußwechselstrom nach TGL 200-0604/01 angegeben.

Tabelle 5.128: Richtwerte für die Strombelastbarkeit von Erdungsleitungen, bezogen auf 200 °C Erdtemperatur und 100 Hz Nennfrequenz

Querschnitt	Dauerstrom in A für			Nennkurzzeitstrom in A für 1 s für		
mm²	Stahl	Aluminium	Kupfer	Stahl	Aluminium	Kupfer
16	–	–	150	–	–	2500
25	–	–	200	–	–	4000
35	–	200	280	–	3700	5500
50	(150)	(250)	(480)	(3300)	5300	8000
70	(180)	(320)	(590)	(4700)	7400	11500
100	(240)	(430)	(780)	(6700)	10500	16000
120	(275)	(480)	(900)	(8000)	12600	19200
200	(420)	(760)	(1380)	(13500)	21000	32500

Werte in Klammern gelten nur für Flachprofil

Tabelle 5.129: Abmessungen für künstliche Erder

Halbzeug/Werkstoff			Mindestabmessungen im Erdreich	Mindestabmessungen in Beton, Betongüte unter B 225	Mindestabmessungen in Beton, Betongüte ab B 225	Bemerkungen
Bandstahl TGL 7976		Querschnitt	100 mm²	120 mm²	100 mm²	–
St 33 TGL 7960		Dicke	3 mm	4 mm	3 mm	–
Rundstahl TGL 7970	Durchmesser bei	St 33 TGL 7960	10 mm	12 mm	10 mm	–
				10 mm	6 mm	für Steuererder, z. B. in Bauten der Tierhaltung
		St 50 TGL 7960	24 mm	–	–	für Staberder
E-Winkelstahl TGL 9555 St 38u-2 TGL 7960 oder Winkelstahl TGL 0-1028 St 38u-2 TGL 7960		Querschnitt	100 mm²	–	–	–
		Dicke	4 mm	–	–	für Staberder
Stahlrohr TGL 9013		Außendurchmesser	24 mm	–	–	–
St 35 hb TGL 9414		Wanddicke	3 mm	–	–	–

Liegt die Belastungsdauer unter 1 s, z. B. bei Ausschaltung in der Schnellstufe, so ergibt sich die höchstzulässige Strombelastbarkeit nach Gleichung (5):

$$I_{zul} = \frac{I_{th}}{\sqrt{t}} \qquad (5)$$

I_{zul} zulässige Strombelastbarkeit in A,
I_{th} Nennkurzzeitstrom in A, bezogen auf eine Belastungsdauer von 1 s,
t Belastungsdauer in s.

Thermische Bemessung in Verbindung mit Bewehrungsstählen in Stahlbeton und Kabeln nach TGL 200-0603/02, Abschn. 4.2. und 4.3.

Halbzeug, Werkstoff, Mindestabmessungen

Für künstliche Erder gelten die Werte der Tabelle 5.129.

Für künstliche Erdungsleitungen ist vorzugsweise Stahl nach Tabelle 5.130 zu verwenden.

Anordnung der Erder und Erdungsleitungen

Erder sind mindestens 0,7 m tief zu verlegen, Ausnahmen nach TGL 200-0603/02, Abschn. 6.1.1.

Tabelle 5.130: Abmessungen für künstliche Erdungsleitungen

Halbzeug/Werkstoff	Mindestabmessungen	Bemerkungen
Bandstahl TGL 7976	50 mm²	–
St 33 TGL 7960	100 mm²	bei Anordnung innerhalb von Wänden, Stützen oder ähnlichen Baukonstruktionsteilen
Rundstahl TGL 7970	50 mm²	–
St 33 TGL 7960	10 mm Durchmesser	Erdungsleitungen in Betonbettung
Stahlseil TGL 21226/03	50 mm²	– in Betonbettung unzulässig
Kupferprofil oder -seil	16 mm²	in Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV Wechselspannung und über 1,5 kV Gleichspannung bei mechanisch geschützter Legung
Aluminiumprofil oder -seil	35 mm²	

Die Anordnung der Fundamenterder ist im Abschn. 6.2. festgelegt. Es gilt z. B.: Bei Platten-, Wannen- oder Streifenfundamenten ist mindestens ein Bewehrungsstahl nach Tabelle 5.129 durchgehend zu verschweißen. Er soll einen Ring oder ein Maschennetz bilden. An ihn sind die Erdungsleitungen anzuschließen.
Erdungsleitungen sind so anzuordnen, daß die im Betrieb zu erwartenden äußeren Einwirkungen zu keiner unzulässigen Beeinträchtigung ihrer Gebrauchseigenschaften führen können und daß keine Brandgefahr entstehen kann.
Erdungsleitungen sind bei Durchführung durch Decken oder Wände sowie beim Austritt aus dem Erdreich mechanisch, z. B. durch Schutzrohre, zu schützen, sofern mechanische Beanspruchungen zu erwarten sind.
Geräte oder Anlageteile, die mit geerdeten Grundplatten, Stahlgerüsten usw. fest und nach TGL 200-0603/02, Abschn. 7., leitend verbunden sind, gelten als geerdet und erfordern keine gesonderte Erdungsleitung.
In Erdungsleitungen sind Schalter, Sicherungen oder ohne Werkzeug lösbare Verbindungen unzulässig.
Anschlüsse an Fundamenterder sind oberirdisch vorzunehmen.
Verbindungsstellen von Rohrleitungen mit der gemeinsamen Erdungsanlage nach TGL 200-0603/03 sind vorzugsweise beim Gebäudeein- oder -austritt sowie in der Nähe der Elektroenergie-Übertragungs- oder Wandlungsanlage anzuordnen.
Ringrohrleitungssysteme sind mindestens an zwei möglichst weit voneinander entfernten Stellen an die Erdungsanlage anzuschließen; das gilt nicht für Druckluftringleitungen in Schaltanlagen, wenn die Druckluftrohrleitungen in jeder Zelle oder in jedem Schaltfeld geerdet sind. Diese Ausnahme gilt auch bei Klebeverbindungen in Druckluftrohrleitungen außerhalb einer Zelle oder eines Schaltfeldes.

Verbindungen

a) Allgemeines

Als Erdungsverbindungen sind alle Verbindungen zulässig, die beständig gegen die zu erwartenden elektrischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen sowie gegen Korrosion sind, z. B. Schweiß-, Schraub-, Klemm-, Preß-, Lötverbindungen.
Bei Stahlkonstruktionen, z. B. Gittermaste, Kesselgerüste, Rohrleitungen, ausgenommen Kranfahrschienen, gelten die technologisch bedingten Schraub-, Schweiß- und Nietverbindungen unabhängig von den Forderungen nach den Absätzen b) und c) als Erdungsverbindung, sofern nicht durch isolierende Zwischenstücke, wie Dichtungen, Muffen, Hülsen, die durchgehende elektrisch leitende Verbindung auch über die Schrauben unterbrochen ist.
Elektrisch isolierende Rohrverbindungen sind bei Verwendung der Rohrleitung als Erder oder Erdungsleitung leitend zu überbrücken, wenn dadurch nicht andere elektrotechnische Maßnahmen, z. B. Korrosionsschutz, unwirksam gemacht werden. Im Zweifelsfalle sind die Maßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannung vorrangig zu verwirklichen.
Schraubverbindungen von Schaltgerüsten, die als Erdungsleitung dienen, sind nach Absatz c) auszuführen.
Als Erdungsverbindungen gelten auch metallene Lager, Scharniere und Einhängevorrichtungen ohne isolierenden Anstrich.
In Stahlbetonbauten sind die als Erdungsleitungen und Erder vorgesehenen Bewehrungsstähle zu schweißen. Schraub- oder Klemmverbindungen sind nur zulässig, wenn das Schweißen einen unökonomischen Aufwand verursachen würde, z. B. auf kleineren Baustellen.

b) Schweißverbindungen

Der Schweißnahtquerschnitt muß mindestens dem Querschnitt des kleinsten verschweißten Leiters entsprechen. Er darf bei Rundstahl 150 mm² nicht unterschreiten.
Verbindungen von Rundstahl sind vorzugsweise zu schweißen.

c) Schraubverbindungen

Bei Schraubverbindungen von Flachprofilen untereinander, z. B. Bandstahl, muß der Gewindedurchmesser der Schrauben

- bei Erdern mindestens 10 mm,
- bei Erdungsleitungen mindestens 10 mm, bei Verwendung von 2 Schrauben mindestens 8 mm

betragen.
Bei Schraubverbindungen müssen die Kontaktstellen plan und metallisch blank sein, oder es sind außengezahnte Zahnscheiben der Form A nach TGL 0-6797 zu verwenden.
Zahnscheiben sind unzulässig bei Erdern und Erdungsleitungen mit metallischem Korrosionsschutzüberzug sowie aus Buntmetall.
Schraubverbindungen sind, soweit nicht Zahnscheiben verwendet werden, mittels Federringen nach TGL 7403 und Scheiben nach TGL 0-125 oder mittels Federscheiben nach TGL 2927 gegen Lockern zu sichern.

d) Klemmverbindungen

Als Verbindungsmaterial für Rundstahl werden, wenn nicht geschweißt werden kann, empfohlen:

- Verbindungsklemmen A oder C,
- Leitungsverbinder nach TGL 200-0512/05,
- Abzweigklemmen.

Anschlüsse an Rohrleitungen mittels Rohrschellen vorzugsweise nach TGL 200-0512/09.

Korrosionsschutz

Erder und Erdungsleitungen sind nach TGL 200-0603/02, Abschn. 8., gegen Korrosion zu schützen. So gilt z. B.:

— Verbindungen sind durch Korrosionsschutzanstrich zu schützen, ausgenommen hiervon sind Verbindungen, bei denen sämtliche Bestandteile korrosionsgeschützt, z. B. verzinkt, ausgeführt sind.

— Zur Vermeidung von Kontaktkorrosion beim Verbinden von Erdungsleitungen aus unterschiedlichem Material ist TGL 18703/01, 02 zu berücksichtigen.

— Künstliche Erder aus Stahl müssen feuerverzinkt sein. Künstliche Erdungsleitungen aus Stahl müssen feuerverzinkt oder galvanisch verzinkt sein. Unverzinkter Stahl darf jedoch verwendet werden, z. B. für natürliche Erder und künstliche Erdungsleitungen in Erdungsanlagen mit einer vorgesehenen Lebensdauer bis zu 5 Jahren.

Kennzeichnung

Nicht isolierte Erdungsleitungen sind mit Schwarz 1010 TGL 21196 zu kennzeichnen.
Eine teilweise Kennzeichnung durch einen 50 mm breiten schwarzen Querstreifen mindestens an den Enden und an den Abzweigen der Erdungsleitungen ist zulässig.
Für isolierte Erdungsleitungen wird eine grün-gelbe Kennzeichnung, wie für Schutzleiter nach TGL 200-0602/03, empfohlen.
Natürliche Erdungsleitungen dürfen durch Schilder mit der Aufschrift »Erdungsleitung« an ihren Enden, Abzweigen oder an markanten Stellen, z. B. an der Stirnseite von Schaltgerüsten, gekennzeichnet werden.
Bewehrungsstähle in Stahlbetonbauten, die als Erdungsleitung oder Fundamenterder verwendet werden, sind während der Bauphase rot zu markieren.
Kennzeichnung betriebsmäßig geerdeter Außenleiter erfolgt nach TGL 200-0601/02.
Kennzeichnung der Schutzleiter in Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Wechselspannung oder 1,5 kV Gleichspannung erfolgt nach TGL 200-0602/03.

Inbetriebnahme

Vor der Inbetriebnahme ist die Erdungsanlage nach TGL 200-0603/08 zu prüfen.

Erdungsplan

Von der Erdungsanlage, mit Ausnahme der Erdungsanlagen von Masten und von Abnehmeranlagen, die aus einem Energieversorgungsnetz mit Nennspannungen bis 1000 V versorgt werden, ist ein *Erdungsplan* anzufertigen.
Dieser muß mindestens enthalten:

— *künstliche Erder:* Anordnung, Art, Abmessung, Werkstoff und dessen Oberflächenbeschaffenheit, Legungstiefe, Legungsdatum,

— *Erdungsleitungen:* Anschlußstellen an künstliche und natürliche Erder,

— *Verbindungsstellen* zu anderen Erdungsanlagen.

Der Erdungsplan ist bei Änderungen der Erdungsanlage zu revidieren.

5.3.8.2. Starkstromanlagen

Die Erdung ist erforderlich, z. B.

— in Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV für die nicht betriebsmäßig unter Spannung stehenden metallenen Teile, an denen im Fehlerfall, z. B. durch Isolationsfehler oder Licht-

bogen, Gefährdungsspannungen auftreten können. Dazu gehören z. B.

metallene Teile, wie Schaltgerüste, Rohrleitungen, Geräte, Kabelpritschen für Kabel mit Nennspannungen über 1 kV ohne geerdeten Mantel,
metallene Endverschlüsse, Mäntel, Bewehrungen oder Schirme von Kabeln,
Schutzgitter, Verkleidungen und nicht als Werkzaun dienende Schutzzäune aus Metall,
metallene Flansche von Durchführungen,
in Anlagen aus bewehrtem Beton metallene Gebäudeteile, wie Treppen, Leitern, Rahmen von Türen und Fenstern;

– für die zum Betriebsstromkreis gehörenden metallenen Anlagenteile, wenn die ordnungsgemäße Funktion der elektrotechnischen Anlage dies voraussetzt.
Dazu gehören z. B.

Transformatorsternpunkte in Netzen mit unmittelbarer Sternpunkterdung,
Erdschlußdrosseln und Sternpunktwiderstände in Netzen mit mittelbarer Sternpunkterdung,
Strom- und Spannungswandler entsprechend den Bedingungen nach TGL 200-0787,
Meßwiderstände von Generatorsternpunkten,

– in Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V, sofern die Schutzmaßnahmen nach TGL 200-0602/03 dieses erfordern.

– wenn die Isolationskoordination nach TGL 20445 Erdpotential erfordert.

Die Erdung ist nicht erforderlich, z. B.

– für metallene Kabelkanal- und Kabelabdeckungen,

– für metallene Verkleidungen und Schutzrohre für Kabel und Leitungen,

– für Vorrichtungen zur Befestigung durchschlagfester Isolatoren in Anlagen mit Nennspannungen bis 30 kV,

– für die Stern- und Mittelpunkte ortsveränderlicher Elektroenergieerzeuger und -übertrager in Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V Wechselspannung oder 1,5 kV Gleichspannung.

Die Erdung ist unzulässig, z. B.

– wenn dadurch Schutzmaßnahmen nach TGL 200-0602/03 unwirksam werden wie Schutzleitungssystem oder TFI-Schutzschaltung,

– wenn die Funktion der Anlage, z. B. bei Steuerspannungssystemen, beeinträchtigt wird.

Bemessung der Erdungsanlage

Erdungsanlagen müssen gewährleisten, daß bei Fehlern Gefährdungsspannungen vermieden werden. Als *Gefährdungsspannungen* gelten alle Spannungen oberhalb der Kurve $U_{B\,zul}$ nach Bild 5.63 und zusätzlich bei Fehlern in Netzen mit Nennspannungen bis 1000 V die Spannungen, die größer als die zulässigen Berührungsspannungen nach den jeweiligen Standards sind, z. B. TGL 200-0602/03, TGL 200-0629/01.
Gefährdungsspannungen gelten als ausgeschlossen, wenn die Erdungsspannung die zulässige Berührungsspannung nicht überschreitet.
Bei Nennspannungen über 1 kV gilt die Gefährdungsspannung auch dann als ausgeschlossen, wenn folgende Beziehung gilt:

$$U_E = I_p Z_E = 125\ V$$

U_E Erdungsspannung,
Z_E Erdungsimpedanz,
I_p potentialanhebender Strom nach Tabelle 5.131. Er ist der elektrischen Bemessung der Erdungsanlage zugrunde zu legen.

Für die thermische Bemessung gilt TGL 200-0603/02.

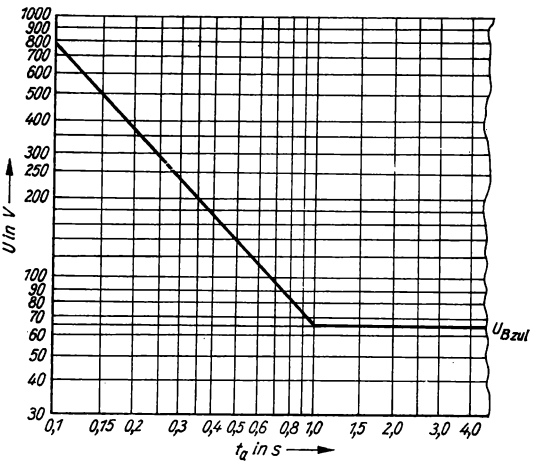


Bild 5.63. Gefährdungsspannungen
$U_{B\,zul}$ höchstzulässige Berührungsspannung, t_a Gesamtausschaltzeit der zugeordneten Ausschalteinrichtungen

Tabelle 5.131: Berechnung des potentialanhebenden Stromes I_p

Netzart			I_p in Kabelnetzen, in Industrieanlagen und Gebieten mit geschlossener Bebauung	I_p in allen anderen Netzen
Netze mit isoliertem Sternpunkt			$0{,}4 \cdot I_C$ [1]	$r \cdot I_C$ [1]
Netze mit Resonanz-Sternpunkterdung	in Anlagen mit Erdschlußdrosseln		$0{,}4 \cdot \sqrt{I_{Sp}^2 + I_{Rest}^2}$ [1]	$r \cdot \sqrt{I_{Sp}^2 + I_{Rest}^2}$ [1]
	in Anlagen ohne Erdschlußdrosseln		$0{,}4 \cdot I_{Rest}$ [1]	$r \cdot I_{Rest}$ [1]
Netze mit Resonanz-Sternpunkterdung und vorübergehender niederohmiger Sternpunkterdung bis zu 10 s	in Anlagen, in denen vorübergehend geerdet wird		$0{,}1 \cdot I''_{k(1)}$	$r \cdot I''_{k(1)}$
	in allen übrigen Anlagen	mit Erdschlußdrosseln	$0{,}4 \cdot \sqrt{I_{Sp}^2 + I_{Rest}^2}$ [1]	$r \cdot \sqrt{I_{Sp}^2 + I_{Rest}^2}$ [1]
		ohne Erdschlußdrosseln	$0{,}4 \cdot I_{Rest}$ [1]	$r \cdot I_{Rest}$ [1]
Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung und $U_n < 110$ kV			$0{,}1 \cdot I''_{k(1)}$	$r \cdot I''_{k(1)}$
Netze mit niederohmiger oder starrer Sternpunkterdung und $U_n \geqq 110$ kV			$r \cdot I''_{k(1)}$	

[1]) Anstelle dieser potentialanhebenden Ströme ist der Doppelerdschlußstrom mit dem dazugehörigen Reduktionsfaktor einzusetzen, wenn die selbsttätige Abschaltung des Doppelerdschlusses nicht gewährleistet ist.

I_C kapazitiver Erdschlußstrom, I_{Sp} Spulenstrom, I_{Rest} Erdschlußreststrom, $I''_{k(1)}$ einpoliger Anfangskurzschlußwechselstrom nach TGL 200-0604/01, r Reduktionsfaktor

Der *Reduktionsfaktor* ist jeweils durch Messung zu ermitteln oder für Kabel in Netzen mit niederohmiger Sternpunkterdung und Nennspannungen bis 110 kV aus TGL 200-0603/02 oder für Freileitungen in Netzen mit Nennspannungen von 110 kV und darüber aus TGL 200-0605/03 zu entnehmen. In Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder Resonanzsternpunkterdung ist bei Fehlen eines Meßwertes der Reduktionsfaktor $r = 1$ zu setzen.

Durchführung der Erdung

Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen können zusammengeschlossen werden oder als gemeinsame Erdungsanlage errichtet werden, wenn keine Gefährdungsspannung auftreten kann. Das ist z. B. der Fall beim Zusammenschluß mit allen vorhandenen natürlichen und künstlichen Erdern in vermaschten Netzen, wie sie städtische und industrielle Netze darstellen.
Müssen getrennte Erdungsanlagen errichtet werden, z. B. in Ausläuferstationen mit Freileitungsnetzen und Abnehmeranlagen ohne natürliche Erder, so ist die elektrische Erdung nachzuweisen, und es sind Maßnahmen gegen einen späteren unbeabsichtigten Zusammenschluß zu treffen.
Bild 5.64 ist ein Beispiel für eine gemeinsame Erdungsanlage.
Weitere Festlegungen, z. B. zur Erdung im Kabelnetz, sind TGL 200-0603/03, Abschn. 3.5.···3.7., zu entnehmen.

Ergänzung von Erdungsmaßnahmen in Hochspannungsnetzen

Kann das Auftreten von Gefährdungsspannungen (s. Bild 5.63) durch Erdungsmaßnahmen allein nicht verhindert werden, so wird zur Gewährleistung der Schutzgüte mindestens eine der folgenden Maßnahmen empfohlen:
- Isolierung des Bedienungsstandortes,
- Potentialausgleich des Bedienungsstandortes,
- isolierender Anstrich,
- Einzäunung.

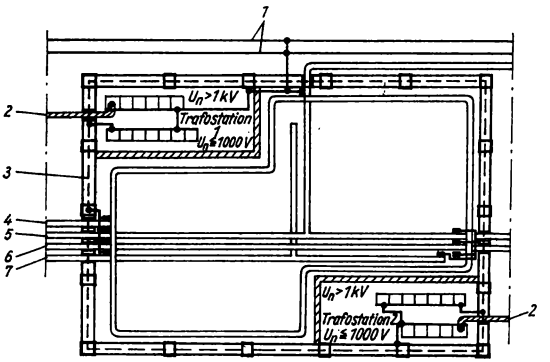
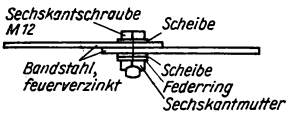
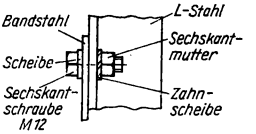
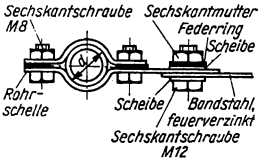
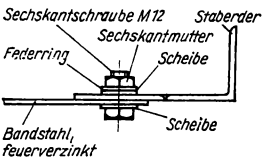


Bild 5.64. Beispiel für gemeinsame Erdungsanlage
1 Anschlußgleis, 2 Kabel, 3 Fundamenterder, 4 Heizung, 5 Wasser, 6 Druckluft, 7 Gas

Montage von Erdungsleitungen

Tabelle 5.132: Schraubverbindungen für Bandstahl (Ausführungsbeispiele)

Verbindungsart	Verbindungselement	Bild
Bandstahl mit Bandstahl	Sechskantschraube nach TGL 0-601 Sechskantmutter nach TGL 0-555 Federring nach TGL 7403 Scheibe nach TGL 0-125	
Bandstahl mit Profilstahl	Sechskantschraube nach TGL 0-601 Sechskantmutter nach TGL 0-555 Zahnscheibe A nach TGL 0-6797 Scheibe nach TGL 0-125	 bei Erdungsleitungen M 10
Bandstahl mit Metallrohr oder mit Rundstaberder TGL 200-0512/14	Rohrschelle A TGL 200-0512/09 feuerverzinkt	 Durchmesser d in mm bei Metallrohr: 22, 26, 34, 42, 48, 50, 70, 80, 100 bei Rundstaberder: 26
Bandstahl mit Staberder TGL 200-0512/13	Sechskantschraube nach TGL 0-601 Sechskantmutter nach TGL 0-555 Federring nach TGL 7403 Scheibe nach TGL 0-125	

5.3.9. Betreiben elektrotechnischer Anlagen

Es gelten folgende wichtige *Standards*:

»Betreiben elektrotechnischer Anlagen«

TGL 200-0619/01	Sicherheitstechnische Forderungen für Starkstromanlagen
TGL 200-0619/02	Vorbeugender Brandschutz und Brandbekämpfung
TGL 200-0619/03	Schlüsselberechtigung für abgeschlossene elektrotechnische Betriebsräume
TGL 200-0619/04	Schriftliche Freigabe für Arbeiten an Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV Ws oder 1,5 kV Gs
TGL 200-0619/05	Kommandosprache und Kommandoführung in Starkstromanlagen
TGL 200-0619/06	Reinigen von Isolatoren durch Abspritzen unter Spannung
TGL 200-0619/07	Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen mit Nennspannungen bis 1000 V Ws oder 1500 V Gs
TGL 200-0619/08	Instandhalten von Starkstromanlagen
TGL 200-0619/10	Allgemeine Begriffe für Starkstromanlagen

5.3.9.1. Sicherheitstechnische Forderungen für Starkstromanlagen

Für das Bedienen und Arbeiten werden unterschiedliche Qualifikationen der Werktätigen gefordert. Verantwortliche für das Durchführen von Sicherheitsmaßnahmen sind vom Fachmann und leitenden Mitarbeiter[1]) festzulegen.

Fachkundiger Werktätiger muß sein,

— wer für Prüfungen oder Messungen oder für das Einsetzen oder Entfernen von Schmelzeinsätzen isolierte Einrichtungen an unter Spannung stehende Teile heranführt,

— wer den spannungsfreien Zustand einer Anlage zum Arbeiten herstellt und sichert,

— wer für das Durchführen von Sicherheitsmaßnahmen verantwortlich ist.

Für die turnusmäßige Belehrung der Werktätigen gilt die ABAO 900/1. Berechtigungs- und Befähigungsnachweise müssen nach den dafür geltenden Vorschriften zusätzlich berücksichtigt werden, z. B. Schaltberechtigung nach ASAO 901.
Fachunkundige Werktätige dürfen abgeschlossene elektrotechnische Betriebsräume nur nach vorheriger Unterweisung betreten und müssen beaufsichtigt werden.
Erwachsene fachunkundige Personen dürfen Schmelzeinsätze mit Schraubkappe bis 63 A sowie Glühlampen und Entladungslampen bis 1000 V einsetzen oder entfernen.

Verantwortlichkeit für das Durchführen der Sicherheitsmaßnahmen zum Arbeiten

Vor Beginn von Arbeiten ist vom Anlagenbetreiber oder in dessen Auftrag festzulegen, wer für den jeweiligen Arbeitsauftrag für das Durchführen der Sicherheitsmaßnahmen verantwortlich ist.
Müssen die Aufgaben für das Durchführen der Sicherheitsmaßnahmen auf mehrere Verantwortliche aufgeteilt werden, sind diese so einzusetzen, daß die Aufgaben eindeutig abgegrenzt sind.

Die *Aufgabenbereiche* der Verantwortlichen sind unterteilt in

— *Verantwortlicher für Schalthandlungen*

Er muß z. B. die Schalthandlungen und Maßnahmen zum Freimeldebereitmachen an den Schaltstellen durchführen oder durchführen lassen.

— *Verantwortlicher für die Freigabe der Arbeitsstelle*

Er muß z. B. die Freimeldung vom Verantwortlichen für Schalthandlungen entgegennehmen und sich über den Schaltzustand informieren lassen.

— *Verantwortlicher für das Durchführen der Arbeiten*

Er muß z. B. vor Beginn der Arbeiten alle Beteiligten in die Arbeitsstelle einweisen.

— *Aufsichtsführender an der Arbeitsstelle*

Er muß z. B. alle an der Arbeit Beteiligten und den Arbeitsablauf beobachten und gewährleisten, daß alle Beteiligten sich so verhalten, daß keine Gefährdung eintritt.

[1]) leitender Mitarbeiter im Sinne der Arbeitsschutzverordnung

Herstellen und Sichern des spannungsfreien Zustandes vor Arbeitsbeginn (freigabebereit machen)

Freischalten

Die Teile der Anlage, an denen gearbeitet werden soll, müssen freigeschaltet werden.
Sofern vom Sternpunkt Spannung auf das freigeschaltete Anlageteil übertragen werden kann, muß auch hierfür eine Trennstrecke im Leiter hergestellt werden.
Kondensatoren, deren selbsttätige Entladung nicht gesichert ist, müssen mit Vorrichtungen entladen werden, die der Spannung und Ladung des Kondensators angepaßt sind.

Gegen Wiedereinschalten sichern

Betriebsmittel, mit denen freigeschaltet wurde, sind gegen unbeabsichtigtes oder selbsttätiges Wiedereinschalten zu sichern. Hierzu gehören auch Betriebsmittel, die im Betriebszustand bereits ausgeschaltet waren. Folgende *Maßnahmen* sind durchzuführen:

— Soweit an den Betriebsmitteln Einrichtungen zum Sichern gegen Wiedereinschalten vorhanden sind oder sich dafür benutzen lassen, sind diese zu benutzen.
Bei Kraftantrieb sind die Mittel für die Antriebskraft oder Steuerung der Einwirkung auf den Antrieb zu entziehen.

— Für die Dauer der Arbeiten ist an Schaltgriffen oder Antrieben von Schaltern, an Steuerorganen, Drucktastern, Sicherungssockeln, Leitungsschutzschaltern und anderen Betriebsmitteln, mit denen ein Anlageteil unter Spannung gesetzt werden kann, ein Warnschild »Nicht einschalten, es wird gearbeitet . . .« anzubringen.

Wurden Schmelzeinsätze oder einschraubbare Leitungsschutzschalter zum Herstellen des spannungsfreien Zustandes benutzt, so müssen diese allpolig entfernt sein und so aufbewahrt werden, daß sie für Unbefugte nicht zugängig sind.
In *Ausnahmefällen*, z. B. bei Trennern, die mit Schaltstange betätigt werden, genügt das eindeutig zugeordnete Warnschild in der Nähe.
Bei *Anwahlsteuerung* darf auf das Warnschild verzichtet werden. Es wird die Anwendung von Warnzeichen empfohlen, die gegen ein Betätigen der Anwahltaste sichern oder eine Fehlanwahl erkennbar machen, z. B. auf einer Rückmeldemeßtafel.
Für das Eingrenzen und sofortige Beseitigen von Störungen in Netzen mit schwer erreichbaren, unbesetzten Schaltstellen mit Nennspannungen über 1 bis 30 kV gilt:
Der »Verantwortliche für die Schalthandlungen« darf für Schaltstellen, die betriebsmäßig bereits ausgeschaltet waren, auf das Sichern gegen Wiedereinschalten verzichten, wenn alle Schaltstellen, von denen die Arbeitsstelle unter Spannung gesetzt werden kann, innerhalb eines Schaltbefehlsbereiches liegen.

Spannungsfreiheit feststellen

Die allpolige Spannungsfreiheit ist stets dort festzustellen, wo geerdet und kurzgeschlossen werden soll und wo sich die Arbeitsstelle befindet.
Bei Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V ist die Spannungsfreiheit mit zweipoligen Spannungsanzeigern oder mit Meßinstrumenten festzustellen. Spannungsanzeiger und Meßinstrumente sind vor dem Benutzen auf Funktion zu prüfen.
Bei Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV ist die Spannungsfreiheit mit Spannungsanzeigern festzustellen. Diese sind vor und nach dem Benutzen auf Funktion zu prüfen.
Das Feststellen der Spannungsfreiheit mit Hilfe des Spannungsanzeigers entfällt für Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV, soweit noch keine geeigneten Spannungsanzeiger gefertigt werden, oder wenn die freigeschalteten Anlageteile so angeordnet sind, daß die Spannungsfreiheit an ihnen nicht festgestellt werden kann. Soweit andere Möglichkeiten zur Kontrolle der Spannungsfreiheit bestehen, sind diese vor dem Erden und Kurzschließen zu nutzen.

Erden und Kurzschließen

Siehe Tabellen 5.133 und 5.134.

Gegen benachbarte unter Spannung stehende Teile schützen

Bei Arbeiten in der Nähe von Anlageteilen, die unter Spannung stehen, sind Maßnahmen für »Arbeiten in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen« durchzuführen.
Bei Kabeln, die im Einflußbereich von wirksam geerdeten Hochspannungsleitungen oder von Bahnanlagen liegen, gilt:
Bei Kabeln mit durchgehender metallener Umhüllung ist diese wegen der auftretenden Ausgleichs- oder Induktionsströme an der Arbeitsstelle vor dem Trennen zu überbrücken. Der Leiter ist leitwertgleich oder mindestens in 16 mm² Cu auszuführen.

Tabelle 5.133: Erden und Kurzschließen an Schaltstellen

Anlagenart	Forderungen
Freileitungen	Bei Freileitungen mit Nennspannungen über 1 kV muß vor dem Erden und Kurzschließen an der Arbeitsstelle an jeder Schaltstelle, von der die Arbeitsstelle unter Spannung gesetzt werden kann, kurzschlußfest geerdet und kurzgeschlossen werden. Für Freileitungen mit Nennspannungen bis 30 kV gilt diese Forderung auch als erfüllt, wenn an jeder Seite, von der die Arbeitsstelle unter Spannung gesetzt werden kann, kurzschlußfest geerdet und kurzgeschlossen ist. Bei Masttrennern darf an einem der nächsten Maste geerdet und kurzgeschlossen werden.
Kabelanlagen	Bei Arbeiten an Kabeln oder an Betriebsmitteln mit Nennspannungen über 1 kV, die unmittelbar an Kabel angeschlossen sind und bei denen an der Arbeitsstelle nicht geerdet und kurzgeschlossen werden kann, ist an den Schaltstellen kurzschlußfest zu erden und kurzzuschließen. Wo mit Rücksicht auf Unterschiede im Erdpotential zur Vermeidung von Ausgleichströmen Metallmantelkabel mit Isoliermuffen ausgerüstet oder metallmantellose Kabel gelegt sind, braucht nur eine Schaltstelle geerdet und kurzgeschlossen zu werden. Die anderen Schaltstellen müssen kurzgeschlossen werden. Zum Herstellen und Entfernen jeder dieser Kurzschließungen ist jedoch an der betreffenden Stelle vorübergehend zu erden. Die Erdungen an anderen Schaltstellen müssen während dieser Zeit entfernt sein.

Tabelle 5.134: Erden und Kurzschließen an der Arbeitsstelle

Anlagenart	Forderungen
Alle Anlagen	Anlageteile, an denen gearbeitet werden soll, müssen an der Arbeitsstelle geerdet und kurzgeschlossen werden. Ausgenommen hiervon sind die zulässigen Abweichungen nach TGL 200-0619/01. Es darf erst geerdet und kurzgeschlossen werden, wenn die Freimeldung vom »Verantwortlichen für die Schalthandlungen« vorliegt. Das Fehlen der Spannung ohne Freimeldung ist keine Bestätigung dafür, daß die Freischaltung vollzogen ist. Die Erdung und Kurzschließung soll vom Arbeitsplatz aus sichtbar sein. Sie muß den gesamten Bereich der Arbeitsstelle schützen. Für den Fall, daß bei der Arbeit die Leitung unterbrochen wird oder die Arbeiten an einer Unterbrechungsstelle vorgenommen werden, z. B. an einer aufgetrennten Leitung, muß an beiden Seiten der Unterbrechungsstelle geerdet und kurzgeschlossen werden. Wenn an allen Schaltstellen, von denen die Arbeitsstelle unter Spannung gesetzt werden kann, kurzschlußfest geerdet und kurzgeschlossen ist, genügen an der Arbeitsstelle Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen für einen Nennkurzzeitstrom von 5 kA.
Abweichend davon gilt für	
Freileitungen	An Freileitungen mit Nennspannungen bis 1000 V müssen alle Leiter einschl. des neutralen Leiters sowie der Schalt- und Steuerdrähte, z. B. bei Straßenbeleuchtung, in unmittelbarer Nähe der Arbeitsstelle möglichst geerdet, in jedem Fall aber kurzgeschlossen werden. Bei Arbeiten im Einflußbereich von Hochspannungsfreileitungen eines wirksam geerdeten Netzes sind die hierbei möglichen Gefährdungen zu berücksichtigen.
Kabelanlagen	Beim Übergang von Kabel auf Freileitung ist bei Kabelarbeiten an den Übergangsstellen zu erden und kurzzuschließen. Für Arbeiten an Kabeln oder an Betriebsmitteln mit Nennspannungen über 1 kV, die unmittelbar an Kabel angeschlossen sind und bei denen an der Arbeitsstelle nicht geerdet und kurzgeschlossen werden kann, gilt TGL 200-0619/01, Abschn, 3.4.5.2.
Transformatoren, Auswechseln von Sicherungseinsätzen	Für das Auswechseln von Sicherungseinsätzen auf der Oberspannungsseite von Transformatoren über 1 bis 30 kV gilt: Beim Auswechseln der Sicherungseinsätze von Hand ohne isolierende Hilfsmittel darf vom Erden und Kurzschließen auf der Oberspannungsseite des Transformators abgesehen werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind: — Die Unter- und Oberspannungsseite müssen freigeschaltet sein; die Trennstrecken für die Oberspannung müssen vom Standort der Schalthandlung und vom Arbeitsplatz aus allpolig sichtbar sein. — Die Betriebsmittel, mit denen freigeschaltet wurde, sind gegen Wiedereinschalten zu sichern. Für die Oberspannungsseite gilt zusätzlich: Das Betriebsmittel muß so gesichert sein, daß auch ein Wiedereinschalten vom Arbeitsplatz her, z. B. dadurch, daß der Arbeitende unbewußt Halt am Gestänge des Trennerantriebes sucht, verhindert wird. — An der Arbeitsstelle ist die Spannungsfreiheit festzustellen. Bei Außenanlagen, z. B. bei Maststationen, ist die Spannungsfreiheit mindestens auf der Unterspannungsseite am Transformator festzustellen.
Innenanlagen	In Innenanlagen mit Nennspannungen über 1 bis 30 kV darf vom Erden und Kurzschließen beiderseits von Unterbrechungsstellen abgewichen werden, wenn an allen Seiten, von denen die Arbeitsstelle unter Spannung gesetzt werden kann, kurzschlußfest geerdet und kurzgeschlossen ist. Spannungswandler müssen stets geerdet und kurzgeschlossen werden.
Druckgasisolierte Anlagen	Bei Arbeiten an druckgasisolierten Anlagen darf vom Erden und Kurzschließen abgesehen werden, wenn der spannungsfreie Zustand durch geeignete Maßnahmen, z. B. durch geerdete Barrieren in der geöffneten Strombahn, gesichert ist. Ladungsenergie muß vor Beginn der Arbeiten abgeleitet sein.

Bei Arbeiten an den Kabeladern hat sich der Arbeitende gegen die mögliche Berührungsspannung, z. B. hervorgerufen durch Induktionsspannung, zu schützen und wie bei Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen zu verhalten. Hiervon darf abgewichen werden, wenn durch Berechnung oder Messung festgestellt wird, daß sowohl im Betriebszustand als auch bei Erdkurzschlüssen der beeinflussenden Anlage die in TGL 200-0603/03 angegebene zulässige Berührungsspannung an der Arbeitsstelle nicht überschritten wird.

Zum Arbeiten freigeben

darf die Arbeitsstelle nur der dafür benannte Verantwortliche und nur dann, wenn der spannungsfreie Zustand hergestellt und gesichert ist.

Unterspannungsetzen nach beendeter Arbeit

Die nicht mehr erforderlichen Werkzeuge, Hilfsmittel und Materialien sind von der Arbeitsstelle *zu entfernen*, die entbehrlichen Personen sind zurückzuziehen. Alle an der Arbeit Beteiligten sind darauf hinzuweisen, daß die Anlage als unter Spannung stehend zu betrachten ist.
Die für die Arbeit getroffenen *Sicherheitsmaßnahmen* dürfen nur auf Anweisung des Verantwortlichen für die Freigabe der Arbeitsstelle aufgehoben werden. Sie sind so aufzuheben, daß keine Gefährdung auftreten kann. Beim Entfernen von Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen ist die Kurzschließung vor der Erdung zu entfernen.
Betriebsmäßige Schutzverkleidungen und Warnschilder sind wieder ordnungsgemäß anzubringen.
Die Arbeitsstelle darf nur vom Verantwortlichen für die Freigabe der Arbeitsstelle zum *Unterspannungsetzen* freigegeben werden und erst dann, wenn die Forderungen nach den beiden vorstehenden Absätzen erfüllt sind. Für Personen, die allein arbeiten, gilt dies sinngemäß.

Arbeiten in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen

Allgemein gilt:

Fachunkundige Werktätige müssen durch einen Aufsichtführenden an der Arbeitsstelle beaufsichtigt werden. Hiervon darf abgewichen werden, wenn die unter Spannung stehenden Teile so gesichert wurden, daß keine unzulässige Näherung entstehen kann, oder wenn eine Schlüsselberechtigung erteilt wurde.
Die an der Arbeit Beteiligten müssen anliegende Kleidung tragen. Für einen festen Standort, bei dem beide Hände frei sind, ist zu sorgen. Der Arbeitende hat stets darauf zu achten, daß zu benachbarten unter Spannung stehenden Anlageteilen keine unzulässige Näherung entsteht. Dies gilt auch für das Aufbewahren von Gegenständen, z. B. von Kleidungsstücken oder Montagematerial.

Unzulässige Näherung

Die unzulässige Näherung bezieht sich auf die Werktätigen und auf die Gegenstände, mit denen sie hantieren, z. B. Leitungsschienen.
Als unzulässige Näherung zu benachbarten unter Spannung stehenden Teilen mit Nennspannungen bis 1000 Volt gilt das Berühren dieser Teile.
Als unzulässige Näherung zu benachbarten unter Spannung stehenden Teilen mit Nennspannungen über 1 kV gilt das Unterschreiten der Abstände, die durch Einrichtungen zum Schutz gegen Berühren oder zufälliges Berühren vorgegeben werden. Sind solche Einrichtungen an der Arbeitsstelle nicht vorhanden, gilt das Unterschreiten der Werte nach Tabelle 5.135 als unzulässige Näherung.

Tabelle 5.135: Mindestabstände, deren Unterschreitung als unzulässige Näherung gilt

Nennwert der Betriebsspannung	Innenanlagen: Anlageteile von innen oder unmittelbar vom Freien aus zugänglich	Freileitungen, Außenanlagen, Außenarbeiten an Gebäuden
kV	mm	mm
über 1···30	500	1500
über 30···110	1150	2000
über 110···220	1750	3000
über 220···380	2900	4000

Die Mindestabstände dürfen z. B. bei folgenden Arbeiten unterschritten werden:
— für das Durchführen und Aufheben von Maßnahmen zum Herstellen und Sichern des spannungsfreien Zustandes,
— für Messungen und Prüfungen und das Besteigen von Masten.

Zu beachten ist dabei, daß die Abstände größer als die in TGL 200-0601 angegebenen Luftstrecken sein müssen.

Sichern der Arbeitsstelle

Besteht bei Arbeiten an nicht unter Spannung stehenden Teilen die Gefahr, daß sich der Arbeitende zufällig benachbarten unter Spannung stehenden Teilen unzulässig nähert, so gilt:
Für die benachbarten unter Spannung stehenden Teile ist vor Aufnahme der Arbeiten der spannungsfreie Zustand nach TGL 200-0619/01, Abschn. 3.1.···3.4., herzustellen und zu sichern,

oder

die benachbarten unter Spannung stehenden Teile sind nach TGL 200-0602/02 durch hinreichend feste und zuverlässig anzubringende Abdeckungen oder durch Absperrungen so zu sichern, daß Gefahren ausgeschlossen werden.
Sind diese Maßnahmen nicht möglich, so gelten die Forderungen für Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen.
In Schaltanlagen mit Nennspannungen über 1 kV sind die Grenzen der Arbeitsstelle kenntlich zu machen.
Besteht während der Arbeiten die Gefahr, daß das zum Arbeiten freigegebene Schaltfeld mit unter Spannung stehenden Schaltfeldern verwechselt werden kann, so sind entsprechende Schutzvorrichtungen anzubringen. Hierzu sind z. B. Absperrleinen oder Fahnen zu verwenden.

Rote Fahnen bezeichnen die Grenze der Arbeitsstelle, die nicht überschritten werden darf.

Grüne Fahnen bezeichnen die Arbeitsstelle, für die der spannungsfreie Zustand hergestellt und gesichert ist, oder den Zugang zu dieser Arbeitsstelle.

Erstreckt sich ein Schaltfeld über mehrere Geschosse, sind in jedem Geschoß Warnschilder so anzubringen, daß das zum Arbeiten freigegebene Schaltfeld eindeutig gekennzeichnet ist, auch wenn nicht in allen Geschossen gearbeitet wird.
Für Arbeiten an offenen, einseitig unter Spannung stehenden Trennern in Hochspannungsanlagen bis 30 kV gilt ergänzend:
Zulässig sind nur Arbeiten zum Lösen und Befestigen der spannungsfreien Schienenanschlüsse.
Müssen Leitern oder sperrige Gegenstände in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen bewegt werden, so muß ein Aufsichtsführender zugegen sein.
Einziehbare und absenkbare Leitern oder Arbeitsbühnen sind für den Transport in elektrotechnischen Anlagen einzuziehen und abzusenken.
Sofern Anlageteile unterhalb einer Arbeitsstelle unter Spannung bleiben müssen, z. B. bei Freileitungen, sind die Beschäftigten auf die erhöhten Gefahren, die z. B. durch das Herunterfallen von Gegenständen entstehen können, aufmerksam zu machen.
Liegen bei Freileitungen mehrere Systeme mit Nennspannungen über 1 kV auf gemeinsamen Stützpunkten, so dürfen Arbeiten an einem freigabebereit gemachten System nur vorgenommen werden, wenn an allen zum Arbeiten freigegebenen Masten Maßnahmen gegen ein Verwechseln der Systeme getroffen sind, z. B. durch Bezeichnen mit Nummern, Zeichen, Farben und durch genaue Einweisung.
Diese Maßnahmen können dadurch ergänzt werden, daß die zur Arbeit eingeteilten Werktätigen z. B. Armbinden mit dem gleichen Merkmal tragen, mit dem das freigeschaltete System bezeichnet ist.
Werkzeug, Material und ähnliches muß so hochgezogen werden, daß keine unzulässige Näherung zu unter Spannung stehenden Teilen entsteht. Werktätige, die in derartigen Arbeiten nicht geübt sind, müssen vor Beginn der Arbeiten besonders eingewiesen werden.

5.3.9.2. Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen mit Nennspannungen bis 1000 V Ws oder 1,5 kV Gs

Hierunter sind Arbeiten zu verstehen, bei denen betriebsmäßig unter Spannung stehende Teile mittelbar oder unmittelbar berührt werden. Für derartige Arbeiten sind schriftliche Festlegungen (*Montageanweisungen*) notwendig, die das Arbeiten nach bestimmten Arbeitsverfahren regeln. Sind die Montageanweisungen nicht standardisiert, sind sie betrieblich zu erarbeiten und vom Betriebsleiter zu bestätigen. Montage-

anweisungen müssen u. a. folgende wesentliche Festlegungen enthalten:

Arbeitsablauf und Arbeitsverfahren,
zu verwendende Ausrüstungen für die durchzuführenden Arbeiten,
Anzahl der an der Arbeit beteiligten Werktätigen.

Arbeitsaufträge für Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen dürfen nur vom fachlich zuständigen, leitenden Mitarbeiter erteilt werden und nur, wenn die Maßnahmen für die Sicherheit der Werktätigen gewährleistet sind.
Für die Anlagenwartung und Störungsbeseitigung sind auch langfristige Arbeitsaufträge zulässig.
Die Werktätigen, die Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen ausführen dürfen, sind schriftlich zu benennen. Sie müssen gesundheitlich geeignet sein. Die gesundheitliche Eignung ist in Zeitabständen von 5 Jahren erneut festzustellen.
Für folgende Tätigkeiten genügt es, wenn die allgemeinen Forderungen für das Bedienen und Arbeiten nach TGL 200-0619/01 eingehalten werden:

Für das Heranführen isolierter Einrichtungen an unter Spannung stehende Teile

– bei elektrischen Prüfungen oder Messungen, z. B. beim Heranführen von Spannungsanzeigern oder Drehfeldrichtungsanzeigern,
– beim Einsetzen oder Entfernen von Schmelzeinsätzen,
– beim Herstellen und Sichern des spannungsfreien Zustandes.

Ausbildung der Werktätigen

Die Arbeiten dürfen nur von fachkundigen Werktätigen ausgeführt werden. Fachkundige Werktätige, die nicht Fachmann sind, müssen mindestens 2 Jahre an solchen Anlagen gearbeitet haben, an denen sie an unter Spannung stehenden Teilen arbeiten sollen.
Die Werktätigen müssen über den Inhalt der TGL 200-0619/07 unterwiesen sein und das anzuwendende Arbeitsverfahren beherrschen.
Arbeiten nach Montageanweisungen sind im spannungsfreien Zustand zu trainieren, bevor an Teilen gearbeitet wird, die unter Spannung stehen.
Jeder Werktätige oder jede Arbeitsgruppe muß im Besitz der Montageanweisung sein, die für die jeweilige Arbeit zutrifft.

Durchführen der Arbeiten

Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen dürfen nur mit Arbeitsauftrag durchgeführt werden.
Die für die Arbeit eingesetzten Werktätigen müssen während der Arbeit ständig an der Arbeitsstelle anwesend sein.
Vor Beginn der Arbeiten ist durch *Sichtkontrolle* festzustellen, ob die Ausrüstung für das Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen sauber, trocken und in ordnungsgemäßem Zustand ist. Teile der Ausrüstung, die an der Arbeitsstelle gelagert werden müssen, z. B. isoliertes Werkzeug, sind so zu lagern, daß sie nicht beschmutzt oder feucht werden.
Es ist *unzulässig*, mit unbekleideten Armen, unbekleidetem Oberkörper oder kurzen Hosen zu arbeiten oder elektrisch leitfähige Gegenstände, z. B. Schmuck, am Körper zu tragen. Werkzeug darf nicht in der Kleidung getragen werden.
Beleuchtung und Bewegungsfreiheit an der Arbeitsstelle müssen so sein, daß sicher gearbeitet werden kann. Es muß ferner gewährleistet sein, daß die Arbeitsstelle bei Gefahr unverzüglich verlassen werden kann.
Der Standort muß sicher sein, damit beide Hände zum Arbeiten frei sind.
Nicht an der Arbeit Beteiligte sind von der Arbeitsstelle fernzuhalten.
Bei Regen darf nur unter einer Überdachung, z. B. unter einem Montagezelt, gearbeitet werden.
In feuergefährdeten Räumen muß die Arbeitsstelle von leicht brennbaren Stoffen beräumt sein, und es müssen geeignete Feuerlöschgeräte bereitstehen.
Die Arbeiten dürfen nicht begonnen oder müssen abgebrochen werden

– bei wahrnehmbaren Gewittern und
– wenn erkannt wird, daß sich aus dem Anlagenzustand Gefahren ergeben können.

Nach jeder Arbeit ist die verwendete Ausrüstung für Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen durch Sichtkontrolle auf ordnungsgemäßen Zustand zu kontrollieren. Soweit erforderlich, ist sie sauber und trocken zu machen.

Ausrüstung für Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen

Je nach der Art der Arbeit gehören zur Ausrüstung

isolierte Werkzeuge, z. B. Schraubendreher, Seitenschneider,
Körperschutzmittel, z. B. isolierender Arbeitsschutzanzug, isolierendes Schuhwerk,
sicherheitstechnische Mittel, z. B. Isoliermatten zur Standortisolierung, die eine entsprechende Schutzgüte haben, wie z. B. im Arbeitsbericht des Institutes für Energieversorgung festgelegt.
Die Ausrüstungen sind gesondert aufzubewahren und grundsätzlich nur für Arbeiten an unter Spannung stehenden Teilen zu verwenden.
In Zeitabständen von 6 Monaten ist zusätzlich zu den üblichen Sichtkontrollen eine turnusmäßige nachweispflichtige Sichtkontrolle auf ordnungsgemäßen Zustand durchzuführen.

5.3.10. Prüfung elektrotechnischer Anlagen

Für die Prüfung elektrotechnischer Anlagen gelten die *Standards*:

TGL 200-0618	Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V,
TGL 26469/10···18	Gekapselte Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV,
TGL 200-0645/03	Fabrikfertige Baueinheiten für Nennspannungen bis 1000 V, Prüfung.

5.4. Installationstechnik

5.4.1. Allgemeines

Unter Installationstechnik versteht man das Errichten, das Aufstellen bzw. das Anschließen von technischen Geräten. Auf Informations- und Starkstromanlagen bezogen, versteht man darunter das Legen bzw. das Montieren von Kabeln, Leitungen, Rohren und Geräten zum Zweck der Übertragung von Informationen und zur Fortleitung und Anwendung elektrischer Energie.
Die Installation ist entsprechend den baulichen Gegebenheiten unterschiedlich, jedoch nicht in der Form, daß eine bestimmte Installationsart an eine ganz bestimmte Bauweise bzw. Nutzung des Baukörpers gebunden ist. Ausschlaggebend für die Anwendung einer Installationsart müssen neben den baulichen Gegebenheiten die jeweiligen Bedürfnisse und somit die technische Zweckmäßigkeit und die Wirtschaftlichkeit (technische und ökonomische Parameter) der Installationsart sein.

5.4.2. Installationsarten

Die Installationsarten kann man gliedern in solche, die in Gebäuden anwendbar sind, also bei Haus- oder Innenleitungsnetzen, und in solche, die im Freien zur Anwendung kommen, also bei Außenleitungsnetzen.

Haus- oder Innenleitungsnetze haben beispielsweise bei Informationsanlagen die Aufgabe, die Endeinrichtungen dieser Anlagen innerhalb eines Baukörpers untereinander mit einer Zentraleinrichtung oder einer zentralen Schalteinrichtung zu verbinden.

Außenleitungsnetze verbinden die Haus- oder Innenleitungsnetze mehrerer Baukörper miteinander oder mit dem Haus- oder Innenleitungsnetz des Gebäudes, in dem sich die Zentraleinrichtung oder die zentrale Schalteinrichtung befindet. Außerdem dienen sie dazu, Einrichtungen, die sich im Freien befinden, wie Feuermelder, Lautsprecher, Straßenleuchten, untereinander oder mit der Zentraleinrichtung oder der zentralen Schalteinrichtung zu verbinden. Als Beispiel seien die Fernsprech-Ortsnetze genannt, die die über eine ganze Ortschaft verteilten Fernsprechteilnehmer durch ein Außenleitungsnetz mit der zentralen Fernsprechvermittlungseinrichtung verbinden.
Außerdem kann eine Unterteilung in *sichtbare* und *verdeckte Installationsarten* erfolgen.
Es wird angestrebt, in Wohn- und Gesellschaftsbauten aus architektonischen und hygienischen Gesichtspunkten, z. B. in medizinischen Einrichtungen, grundsätzlich eine verdeckte Installation vorzunehmen. Bei einer derartigen Installation werden die Leitungen, Rohre und Installationsbauelemente

weitgehend der Sicht entzogen. Voraussetzung für die Anwendung ist, daß für die Unterbringung der Leitungen, Rohre usw. in Wänden, Fußböden oder Decken des Baukörpers die bautechnischen Voraussetzungen gegeben sind. Bei Anwendung der verdeckten Installation muß der Einbau der Leitungsnetze aus bautechnischen bzw. aus wirtschaftlichen Gründen – Vermeidung von zusätzlichen Stemm- und Putzarbeiten – gleichzeitig mit der Errichtung des Rohbaus erfolgen. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei der eventuellen späteren Erweiterungsmöglichkeit zu widmen, d. h., die Leitungsnetze sollten so gelegt werden, daß sie sich bei Bedarf ohne Schwierigkeiten entsprechend den Bedürfnissen der Nutzer ändern oder erweitern lassen. Ein markantes Beispiel sind Fernsprechanlagen. Die Wahl einer der verdeckten Installationsarten richtet sich vorwiegend nach den baulichen Gegebenheiten. Bis zur Einführung der modernen industriellen Bauweisen, z. B. der Stahlbetonskelett-Montagebauweise, war die Unterputz-Installation die üblichste Form der verdeckten Installation. Bei den modernen industriellen Bauweisen finden in verstärktem Maße Unterflur-, Zwischendecken-Installationen usw. Anwendung.

In Industriebauten, bei denen der architektonische Eindruck nicht so stark im Vordergrund steht wie bei Wohn- und Gesellschaftsbauten, wird vorwiegend eine sichtbare Installation vorgenommen. Außerdem gestattet auch die Konstruktion von Werkhallen, landwirtschaftlichen Gebäuden usw. in vielen Fällen nicht die Anwendung einer verdeckten Installation: Die Formen der sichtbaren Installation sind sehr variabel. Sie reichen von der Befestigung der Leitungen mittels Schellen (z. B. Schraubschellen) direkt auf der Wand über Tragbügel-Installationen bis zu freitragenden Installationen (Spanndraht-Installation). In allen Fällen ist jedoch darauf zu achten, Leitungen usw. so zu montieren, daß mechanische Beschädigungen durch äußere Einwirkungen vermieden werden. Durch Angleichen der Leitungsführung an die architektonisch oder an die durch die Innenausstattung gegebenen Linien kann eine bedingte »unsichtbare Installation« erreicht werden. In jedem Fall ist zu empfehlen, die Installation vor dem Anstrich oder der Renovierung der Räume auszuführen, damit nach der Montage keine oder nur geringe Ausbesserungsarbeiten erforderlich werden. Gleichzeitig besteht so die Möglichkeit, die eventuell in der Farbgestaltung unterschiedlichen Installationsmaterialien durch den für den Raum vorgesehenen Farbanstrich der Umgebung anzupassen.

Nachstehend erfolgt eine Beschreibung über Art und Anwendung der gebräuchlichsten Installationsarten in Gebäuden und im Freien und der dabei zu beachtenden Fakten.

5.4.2.1. Unterputz-Installation

Die Unterputz-Installation ist eine Installationsart, bei der *Installationsrohre*, nachfolgend nur Rohre genannt, *bündig mit der ungeputzten Wandoberfläche* in Mauerschlitzen oder Aussparungen gelegt und anschließend *durch Putz verdeckt* werden. Zur Vermeidung von Stemmarbeiten ist es zweckmäßig, die Schlitze bereits bei der Errichtung des Rohbaus vorzusehen, d. h. beim Mauern durch Versetzen von Mauersteinen zu berücksichtigen bzw. bei monolithischer Bauweise durch entsprechende Maßnahmen an der Verschalung, wie Aufnageln von Leisten, zu gewinnen.

In die Rohre werden Drähte oder Leitungen eingezogen. Die Rohre müssen so gelegt werden, daß es möglich ist, die Drähte oder Leitungen auszuwechseln bzw. neue Drähte oder Leitungen zur Erweiterung des Leitungsnetzes einzuziehen. Das nachträgliche Einbringen von Leitungen ohne Rohr oder Kanal in Wänden (Stemmen oder Fräsen) ist nur gestattet, wenn die Imputz-Installation oder das Legen von Rohren oder Kanälen aus bauseitig bedingten Gründen nicht durchführbar ist. Damit wird erreicht, daß der Vorteil dieser Installationsart – nachträgliches Einziehen ohne Maurer- und Stemmarbeiten – voll genutzt werden kann und nicht Leitungen ohne Rohr gelegt werden, die nur mit hohem Kostenaufwand ausgewechselt werden können. Diese Nachteile sollten der mit niedrigerem Kostenaufwand durchführbaren Imputz-Installation vorbehalten bleiben. Unzulässig ist das nachträgliche Einbringen von Leitungen, Rohren und Zubehör in geschüttete Wände oder Decken und in Betonfertigteile.

Die Leitungs-, Rohr- oder Kanalführungen in Wänden dürfen nur waagerecht und senkrecht – rechtwinklig zueinander – vorgenommen werden. Nur in geschütteten Decken sind schräge Führungen zulässig. Die Putzschicht muß auf der gesamten Länge über Rohren und Kanälen $\geq$ 10 mm und über Leitungen $\geq$ 5 mm betragen. An gemauerten Wänden oder Wänden aus Gips mit einer Dicke $\leq$ 100 mm dürfen Schlitze und Aussparungen nur durch Fräsen hergestellt werden.

Die Befestigung der Leitungen und Rohre sollte vorzugsweise mit Gipsbändern erfolgen. Die Installation an Schornsteinen und Abgaseschächten ist nicht gestattet. Dosen und Kästen für Starkstromanlagen sind möglichst außerhalb des Handbereichs anzuordnen; werden sie im Handbereich angebracht, dann sind solche zu verwenden, bei denen die Deckel nur mit Werkzeugen entfernt werden können. Außerdem sind nur solche Schalter, Steckdosen und Taster zu verwenden, bei denen die Abdeckungen ebenfalls nur mit Werkzeugen entfernt werden können. Drähte für Informations- und für Starkstromanlagen dürfen nicht in ein gemeinsames Rohr eingezogen werden. Abmessungen der Installation sind aus Bild 5.65 ersichtlich.

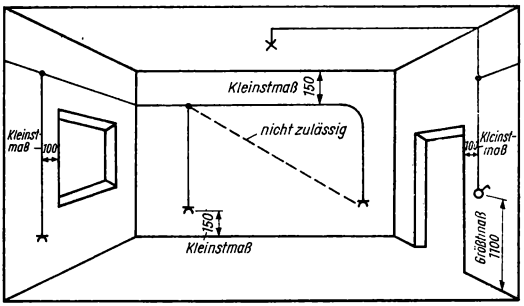


Bild 5.65. Unterputz-Installation

5.4.2.2. Imputz-Installation

Hierbei erfolgt das *Legen der Leitungen* direkt *auf dem ungeputzten Mauerwerk* (Rohmauer). Das geschieht vorwiegend in den Fällen, in denen das Einlassen oder Ausstemmen von Aussparungen oder Schlitzen aus statischen Gründen nicht statthaft ist oder das Ausstemmen mit großen Schwierigkeiten, z. B. bei Betonwänden, verbunden ist.

Die Imputz-Installation (Bild 5.66) sollte nur für solche Anlagen angewendet werden, deren Leitungsnetze auf längere Zeit nicht geändert oder erweitert zu werden brauchen, z. B. bei Feuermelde- und elektrischen Uhrenanlagen.

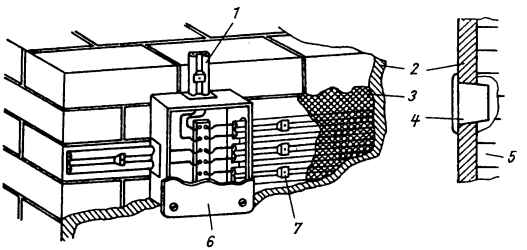


Bild 5.66. Imputz-Installation
1 Stegleitung, 2 Putzschicht, 3 Drahtgeflecht, 4 Dose, 5 Mauerwerk, 6 Verteiler, 7 Befestigungsschellen

Bei Fernsprechanlagen empfiehlt es sich, diese Installationsart nur im Wohnungsbau oder in anderen Bauten nur vom letzten Verteiler bis zum Anschlußpunkt mit entsprechenden Reserveleitungen anzuwenden, da bekanntlich die Leitungsnetze solcher Anlagen größeren Veränderungen unterliegen. Die Befestigung der Leitungen, vorwiegend Steg- und Mantelleitungen, kann mit Gipsbändern oder geeigneten Befestigungsschellen erfolgen; bei Stegleitungen sind das Stahlnägel mit Isolierstoffkeil. Die Befestigung muß gewährleisten, daß die Leitungen durch das Aufbringen der Putzschicht nicht abgedrückt werden.

Die Anwendung der Imputz-Installation ist nur statthaft, wenn nach dem Verputzen der Wände die Leitungen mit einer Putzschicht von $\geq$ 5 mm bedeckt werden.

Das Legen der Leitungen auf oder hinter brennbaren Stoffen – wie Holz – ohne Putzschicht ist nicht statthaft. Wie bei der Unterputz-Installation darf die Leitungsführung an Wänden nur waagerecht und senkrecht – rechtwinklig zueinander –

erfolgen; schräge Leitungsführungen sind nur an Decken zulässig. Der mechanische Schutz der Leitungen ist durch die Putzschicht gegeben. Die Leitungen dürfen nicht in Schütt- oder Stampfbeton gelegt werden. Für diese Installationsart stehen speziell angepaßte Bauelemente, wie Dosen, Kästen und Verteiler, zur Verfügung. Sie werden eingegipst, angeschraubt oder angeklebt. Das erfolgt auf der ungeputzten Wand (Rohmauer) oder durch geringfügiges Ausstemmen derselben. Werden mehrere Leitungen parallel geführt, sind sie vor dem Verputzen mit einem Drahtgeflecht oder ähnlichem zu überspannen. Damit wird eine gute Haftbarkeit des Putzes gewährleistet. Bezüglich der Befestigungshöhe von Schaltern usw. sowie deren Abdeckung und bezüglich der Abstände von Öffnungen des Baukörpers gelten die gleichen Bedingungen wie bei der Unterputz-Installation.

5.4.2.3. Aufputz-Installation

Die Aufputz-Installation ist eine Installationsart, bei der die Leitungen, Rohre und Bauelemente *auf dem oberflächenfertigen Baukörper* gelegt bzw. angebracht werden, d. h., die Leitungen und Rohre werden mit Hilfe von Befestigungselementen wie Nagel-, Schraub-, Abstandschellen usw. unmittelbar an Wänden, Stahlkonstruktionen oder Decken befestigt (Bild 5.67).

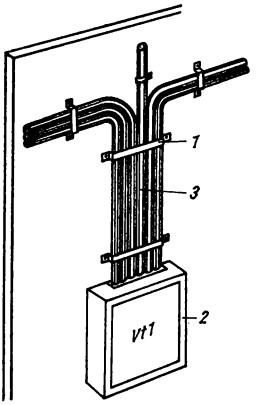


Bild 5.67. Aufputz-Installation von Leitungen und Verteiler
1 Sammelschelle, 2 Verteiler, 3 Leitungen

Je nach der Beschaffenheit des Befestigungsuntergrundes werden die Befestigungselemente mittels Nägel oder Schrauben befestigt bzw. direkt aufgeklebt. In den Fällen, wo das Einschlagen von Nägeln, das Einsetzen von Dübeln oder direktes Ankleben von Schellen nicht möglich ist, z. B. bei feuchten Betonwänden, kann die Installation in der Art erfolgen, daß Traversen, auf die Schellen aufgeklebt bzw. aufgeschraubt oder Kabelhänger aufgeschweißt worden sind, mittels Schießdübel am Baukörper befestigt werden. Die Leitungen müssen einen ausreichenden mechanischen Schutz aufweisen. Wenn der Leitungsmantel dies nicht gewährleistet, sind sie in entsprechende Rohre einzuziehen. Die Legung von Aderleitungen ohne Rohr ist nicht gestattet. Es ist zu beachten, daß Schläuche nicht als Rohre gelten. In feuchten Räumen, wie in chemischen Betrieben, Küchen, Wäschereien usw., sind die Leitungen in Abstand vom Baukörper zu legen, um zu verhindern, daß sich an den Berührungsstellen der Leitungen mit dem Mauerwerk Feuchtigkeit ansammelt und dies zur Beschädigung der Leitungen führt.
Die Aufputz-Installation gestattet es, daß die Leitungsnetze sehr variabel aufgebaut und leicht den örtlichen Verhältnissen angepaßt werden können. Entsprechende nachträgliche Erweiterungen sind ohne große Schwierigkeiten möglich. Durch das gehäufte Legen von Leitungen und Rohren haben sich eigenständige Installationsarten, wie Kanal- und Tragbügel-Installation, Pritschen-Installation usw., herausgebildet, die nachfolgend noch näher beschrieben werden. Durchbrüche für Leitungen und Rohre oder Aussparungen für Dübel usw. sind vor der Aufputz-Installation und vorzugsweise bei der Errichtung des Rohbaus vorzusehen. Leitungen bzw. Drähte für Informations- und Starkstromanlagen dürfen nicht gemeinsam in ein Rohr eingezogen werden.

5.4.2.4. Unterflur-Installation

Durch die Anwendung der industriellen Stahlbeton-Skelett- und der Großblock-Bauweise gewinnt diese Installationsart zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig werden die einzelnen Geschosse, z. B. von Verwaltungs- und Bürobauten, oft nicht mehr durch Zwischenwände in verschieden große Einzelräume aufgeteilt, sondern es werden sog. Großraumbüros geschaffen, die maximal eine ganze Gebäude-Etage umfassen. Da die Arbeitsplätze in diesen großen Räumen sich nicht nur entlang der Fensterfront, sondern auch in größeren Abständen von der Außenwand befinden, ergibt sich das Problem, Leitungsauslässe bzw. Anschlußpunkte an beliebigen Stellen innerhalb des Raumes zu installieren. Dämm- und Sperrschichten dürfen nicht angestemmt bzw. durchbrochen werden, der mehrschichtige Aufbau der verwendeten Wandelemente verbietet das Legen von Rohren und Leitungen auf, unter und im Putz. Das Anstemmen von Betonelementen ist überhaupt nicht bzw. nur unter einschneidenden Einschränkungen möglich. Eine unsichtbare Legung der Leitungen oder Rohre ist demzufolge mit den herkömmlichen Installationsmethoden kaum möglich. Der Aufwand für die Installation von Leitungsnetzen muß bei diesen Gegebenheiten, hervorgerufen durch die Stahlbeton-Skelett- und die Großblock-Bauweise, gegenüber der traditionellen Bauweise zwangsläufig größer werden. Um jedoch eine technisch und ökonomisch günstige Lösung zu erzielen, wurde ein Unterflur-Installationssystem (UFI-System) geschaffen, das in die Dämmschicht der Deckenkonstruktion zwischen der Rohdecke und dem Fußbodenbelag eingebracht wird.
Dieses Unterflur-Installationssystem besteht aus einem Netz doppelzügiger rechteckiger Plastkanäle, welche rasterförmig (individuellen Wünschen der Nutzer entsprechend auch davon abweichend) in die Estrichschicht der Geschoßdecken eingebettet werden. Die Doppelzügigkeit der Plastkanäle gestattet die getrennte Führung von Leitungen für Informations- und Starkstromanlagen in einem Kanal. Wenn auf einer Strecke ein Kanal nicht alle zu führenden Leitungen aufnehmen kann, besteht die Möglichkeit, mehrere Kanäle parallel zueinander anzuordnen. Die erforderlichen Bauteile dieses UFI-Systems sind so gestaltet, daß beliebiges Führen der Leitungen sowie nachträgliches Entfernen bestehender Anschlüsse möglich ist.
Eine Unterscheidung nach dem Einsatz in Gesellschafts- oder Industriebauten erfolgt nicht. Die nach dem Baukastenprinzip entwickelten Bauteile und ihre Elemente sind konstruktiv so gestaltet worden, daß sie maximal austauschfähig sind.
Das Unterflur-Installationssystem ist anwendbar, wenn der Fußbodenaufbau über der Rohdecke eine Dicke von mindestens 60 mm und höchstens 130 mm aufweist, gemessen von der Oberfläche der Glattschicht bis zur Oberfläche der Nutzschicht. Bei einem Fußbodenaufbau über 130 mm müssen zusätzliche Maßnahmen, wie Unterfütterung der Bauteile, ergriffen werden. Die Anwendung des UFI-Systems ist bei Fußbodennutzschichten aus Betonestrich, Anhydritestrich, geklebten Gummi-, PVC- oder Faserbelägen möglich. Bei Betonwerkstein und Parkett als Fußbodennutzschicht ist die Anwendung individuell zu untersuchen. Zum UFI-System gehören die verschiedensten Bauelemente, wie Zug- und Abgangskästen, Aufsatzkästen, Steckhülsen mit Blindplatten usw., mit denen ein beliebiges Leernetz gestaltet werden kann und die je nach den Erfordernissen zusammengesetzt werden können. Hierzu s. Bild 5.68 und Tabelle 5.136.
An den Kreuzungspunkten des Kanalrasters und außerhalb der Kreuzungspunkte dienen die kombinierten *Zug- und Abgangskästen* zur Verbindung der Kanäle untereinander und zur Herausführung von Leitungen aus dem Kanalsystem zu den Anschlußpunkten. Unabhängig von der Lage der Kanäle lassen sich die Zug- und Abgangskästen durch Nivellierschrauben auf ein einheitliches Niveau einrichten. Damit ist eine genaue Anpassung an die Dicke des Fußbodenaufbaus gewährleistet. Zum Anschluß von Betriebsmitteln, wie Fernsprechapparate, elektrische Rechenmaschinen usw., stehen *Aufsatzkästen* zur Verfügung, die mit Steckeinrichtungen und kleinen Verteilern versehen sind bzw. versehen werden können. Diese Aufsatzkästen können entweder auf den Zug- und Abgangskästen oder mit zwei Gewindehaken über gebohrten Fußbodenauslässen befestigt werden.
Gebohrte *Fußbodenauslässe* sind dann erforderlich, wenn speziell in Gesellschaftsbauten nach Fertigstellung des Fußbodenaufbaus Änderungen in der Möblierung (Veränderung der Arbeitsplätze) eintreten. Durch sie wird die Variabilität des UFI-Systems wesentlich erhöht. Beim Bohren der Fußbodenauslässe, wozu ein handelsüblicher Dosensenker verwendet wird, ist darauf zu achten, daß der Unterflurkanal nicht mit angebohrt wird, da sonst die bereits eingezogenen

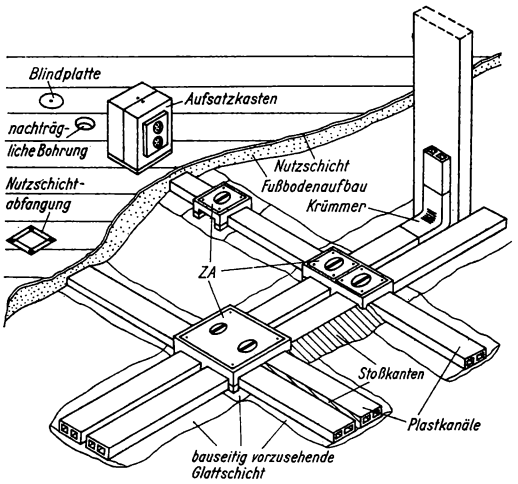


Bild 5.68. Unterflur-Installations-System
ZA kombinierter Zug- und Abgangskasten, unter ZA Mörtel oder Gips, unter Kanäle Granulat

Tabelle 5.136: Bauteile der Unterflur-Installation

Lfd. Nr.	Benennung	Kurzbezeichnung	Darstellung
1	Zug- und	ZA 1/1 – 60/80	
2	Abgangskasten	ZA 1/1 – 80/95	
3		ZA 1/1 – 95/130	
4		ZA 2/1 – 60/80	
5		ZA 2/1 – 80/95	
6		ZA 2/1 – 95/130	
7		ZA 2/2 – 60/80	
8		ZA 2/2 – 80/95	
9		ZA 2/2 – 95/130	
10	Plastkanal	P 25 – 60/95	
11	einschl. Muffe	P 40 – 95/130	
12	Muffe	M 25 – 60/95	
13		M 40 – 95/130	
14	Krümmer	K 25 – 60/95	
15	einschl. Muffe	K 40 – 95/130	

Tabelle 5.136 (Fortsetzung)

Lfd. Nr.	Benennung	Kurzbezeichnung	Darstellung
16	Nutzschicht-	N 1/1	
17	abfangung	N 2/1	
18		N 2/2	
19	Steckhülse mit Blindplatte	SB (nur für Gesellschaftsbauten)	
20	Gewindehaken-	G 60/95	
21	Paar	G 95/130	
22	Aufsatzkasten	AK 1/10	
23		AK 1/11	
24		AK 1/12	
25		AK 1/13	
26		AK 2/10	
27	Aufsatzkasten	AK 2/J	

Leitungen beschädigt werden können. Der Kanal ist separat entweder mit thermischen oder mechanischen Mitteln zu öffnen. Werden als Fußbodennutzschicht Gummi-, PVC- oder Faserbeläge verwendet, ist der Einsatz von Nutzschichtabfangungen notwendig (s. Bild 5.68).
Sofern Aufsatzkästen nicht mehr benötigt werden, ist der Aufsatzkasten zu entfernen und gegen eine Nutzschichtabfangung auszuwechseln, die den darunterliegenden Zug- und Abgangskasten verdeckt. Nicht mehr benötigte gebohrte Fußbodenauslässe werden durch Steckhülsen mit Abdeckplatte verschlossen. Zur Unterbringung von größeren Verteilern, Relaisbeikästen von Fernsprech-Vorzimmeranlagen, Laut-

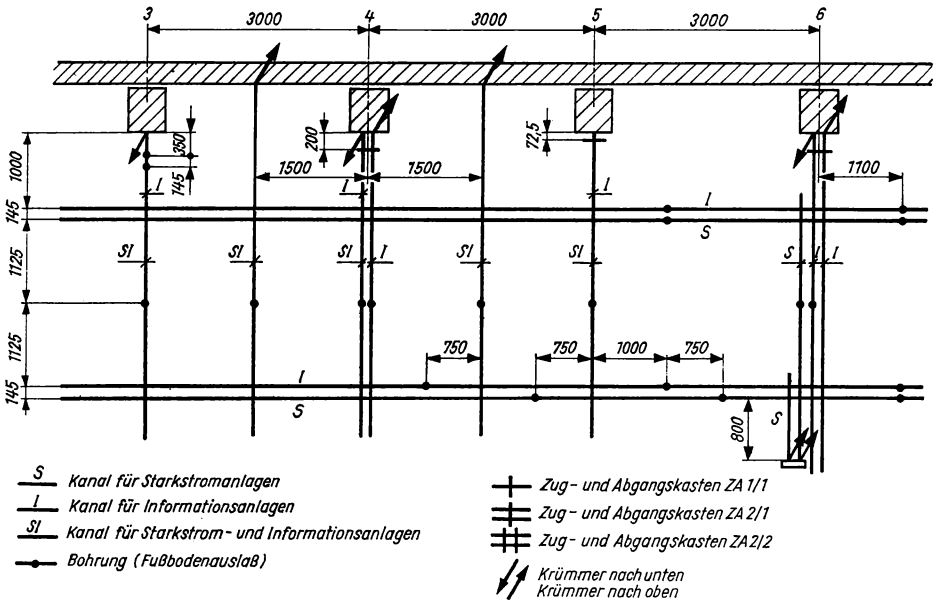


Bild 5.69. Auszug aus einem Legeplan für das Unterflur-Installationssystem

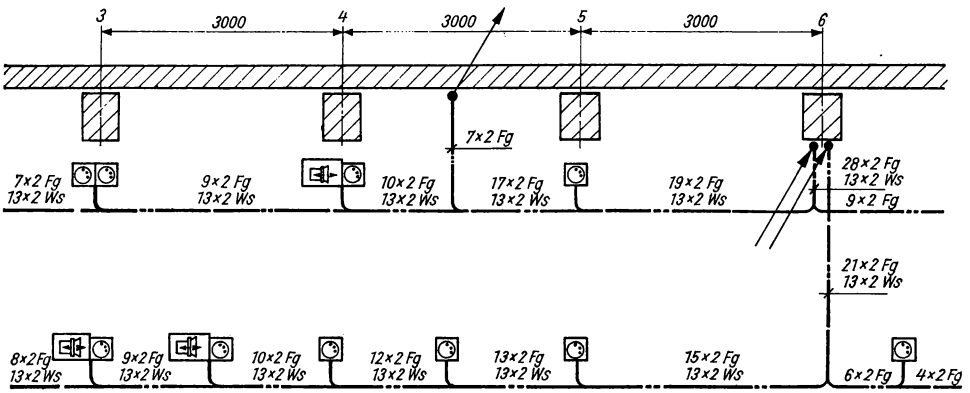


Bild 5.70. Installationsplan für Informationsanlagen in Verbindung mit Legeplan gemäß Bild 5.69
Fg Leitung für Fernsprechanlage, Ws Leitung für Wechselsprechanlage, Erddraht für Fg und Ws 1,5 mm² Cu

sprechern usw. können Zustellmöbel, die in der Höhe und Tiefe den modernen Schreibtischen angepaßt sind, verwendet werden.
Leitungen dürfen nur in Aufsatzkästen geklemmt werden, in Fußbodenauslässen ist es nicht gestattet. In den Zug- und Abgangskästen dürfen Leitungen von Informationsanlagen und Leitungen von Starkstromanlagen nur dann geklemmt werden, wenn eine Abschottung durch Trennwände gegeben ist. Werden innerhalb der Zug- und Abgangskästen Starkstromleitungen geklemmt, müssen die Zug- und Abgangskästen über die Schutzleiter-Anschlußschraube in die Schutzmaßnahme mit einbezogen werden.
Grundlage für eine ordnungsgemäße Montage des UFI-Systems ist der *Legeplan*. Die Bemaßung im Legeplan muß von konstanten baulichen Punkten ausgehen. Sämtliche Maße müssen sich auf die Mitte der Kanäle, der Zug- und Abgangskästen oder Fußbodenauslässe beziehen. Gleichzeitig muß ein Installationsplan aufgestellt werden, dem die Lage der Netzverteiler, Steige- und Abschlußpunkte und die Leitungsbündel deckungsgleich mit der Kanalanordnung gemäß Legeplan einzutragen sind (Bilder 5.69 und 5.70). Außer diesem beschriebenen Unterflur-Installationssystem gibt es noch andere Möglichkeiten der Leitungslegung im Fußbodenaufbau, z. B. Leitungen in Rohren und ohne Rohre für Festanschlüsse, Leitungen in Betonkanälen für veränderlichen Anschluß, auf die jedoch, da ihnen nicht die gleiche Bedeutung zugemessen werden kann, nicht näher eingegangen wird.

5.4.2.5. Vouten-Installation

Installationsleitungen oder -rohre werden vorwiegend in Vouten gelegt (Bild 5.71). Vouten sind z. B. aus Gips geformte, oben offene Wandleisten, die in geringem Abstand von der Decke horizontal an der Wand angeordnet werden und Leitungen, Rohre oder Leuchten kaschieren. Sie müssen gegenüber den zu erwartenden mechanischen Beanspruchungen (Leitungs-

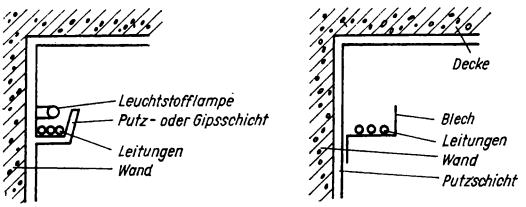


Bild 5.71. Vouten-Installation

last) widerstandsfähig sein und vorzugsweise in Leichtbauweise und korrosionsgeschützt hergestellt sein. Diese Vouten-Installation verliert bei der modernen industriellen Bauweise immer mehr an Bedeutung und wird überwiegend, wenn überhaupt erforderlich bzw. durchführbar, durch die sog. Leitungsrinnen-Installation abgelöst.

5.4.2.6. Zwischendecken-Installation

Leitungen und Rohre werden in dem durch Zwischendecken gebildeten Deckenraum gelegt. Diese Deckenräume können sowohl begehbar als auch nicht begehbar sein. Auf begehbaren Zwischendecken können Leitungen und Rohre freiliegend (unbefestigt), jedoch möglichst geradlinig und parallel zu den Baufluchten gelegt werden. Auf nicht begehbaren Zwischendecken müssen sie befestigt werden. Das Legen von Aderleitungen ohne Rohr ist nicht gestattet. In nicht begehbaren Zwischendecken können die Befestigungsabstände der Leitungen und Rohre, sofern diese nicht auf der Zwischendecke aufliegen, den konstruktiven Bedingungen der Roh- und Zwischendecken angepaßt werden, wenn die dadurch gegebenen Befestigungsabstände 1500 mm nicht überschreiten. Es ist darauf zu achten, daß aus der Zwischendecke herausführende, frei hängende Leitungen mit einer freien Länge von über 1500 mm vor dem Austritt aus der Zwischendecke durch geeignete Mittel zugentlastet werden. Bei der Montage von Kästen, Verteilern und Geräten ist auf jeden Fall die mögliche mechanische Belastung zu beachten. Es ist nicht gestattet, Stegleitungen an oder auf begehbaren Zwischendecken zu legen. In diesen Fällen ist nur Sonderstegleitung zu verwenden. Dosen und Kästen müssen bei Anbringung in nicht begehbaren Zwischendecken von außen zugänglich sein.

5.4.2.7. Wandkanal- und Schachtinstallation

Die Wandkanal- und Schachtinstallation ist eine Installationsart, bei der die Leitungen und Rohre in unmittelbar zum Baukörper gehörenden Wandkanälen oder Schächten gelegt werden (Bild 5.72). Diese werden nach der Legung mit abnehmbaren Abdeckungen verschlossen. Schächte sind bauseitig gebildete Räume, die vor allem senkrechtes Legen gestatten. Im einfachsten Falle erhält man Wand- oder Fußbodenkanäle durch das Abdecken einer Mauernische oder einer Fußbodenaussparung. In Erweiterung der Wandkanal-Installation kann man von einer Leitungskanal-Installation sprechen, und zwar dann, wenn keine Mauernischen oder Fußbodenaussparungen zur Verfügung stehen und auch aus technischen und ökonomischen Gründen Leitungskanäle aus Stahlblech oder Plast angewendet werden. Hierzu s. den Abschn. Kanal- und Tragbügel-Installation.

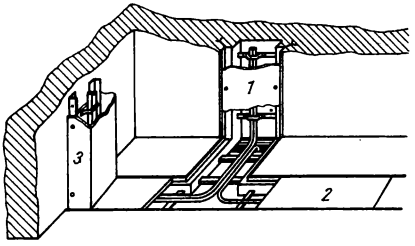


Bild 5.72. Wandkanal- und Schachtinstallation
Kanäle: 1 unter Putz, 2 im Fußboden, 3 auf Putz

Bei der Wandkanal-Installation sind folgende *Forderungen* zu beachten: Die Wandkanäle sind vorwiegend geradlinig und rechtwinklig horizontal-vertikal anzuordnen. Bei den Abdeckungen ist zu beachten, daß sie vorwiegend in Leichtbauweise hergestellt werden und korrosionsgeschützt sind. Eine Befestigung der Leitungen ist nur in den Fällen erforderlich, in denen ein Heraushängen oder Herausfallen möglich ist. Die Befestigung kann durch Anbinden, Anklemmen oder Anschellen erfolgen. Leitungsverbindungen sind nur in entsprechenden Dosen, Kästen oder an Klemmen zulässig. Klemmen und Klemmringe für Starkstromanlagen sind in Wandkanälen nur zulässig, wenn deren Abdeckungen aus isolierendem Werkstoff bestehen und nur mit Werkzeugen entfernt werden können. Leitungen für Informations- und Starkstromanlagen können in einem Kanal gemeinsam gelegt werden, sofern keine störende Beeinflussung entsteht.

5.4.2.8. Kanal- und Tragbügel-Installation

Bei der modernen Großblockbauweise — Montage von oberflächenfertigen Bauteilen — gewinnt diese Installationsart an Bedeutung. Auch an den Stellen eines Leitungsnetzes, an denen eine Vielzahl von Leitungen geführt werden muß, z. B. in der Nähe von Zentraleinrichtungen oder von zentralen Schalteinrichtungen, ist die Anwendung von Leitungskanälen zweckmäßig. Im Gegensatz zur Wandkanal-Installation werden die meist rechteckförmigen Kanäle aus Stahlblech oder Plast auf dem oberflächenfertigen Baukörper, an Abhängungen oder Abstützungen befestigt. Die Leitungskanäle mit unterschiedlichen Abmessungen sind so ausgeführt, daß sich mindestens ein Seitenteil zum Einlegen der Leitungen abnehmen läßt. Tragbügel sind haken-, ösen- oder U-förmige Tragorgane, die das offene oder gekapselte und gehäufte Legen von Leitungen ermöglichen. Eine Befestigung der Leitungen braucht nur in senkrecht geführten Kanälen zu erfolgen. In waagerecht geführten Kanälen ist, soweit notwendig, nur eine Bündelung der Leitungen vorzunehmen. Der Abstand von Tragbügeln bei offenem Legen von Leitungen mit Querschnitten bis 4 mm² darf maximal 500 mm bei waagerechter und 1000 mm bei senkrechter Anordnung betragen. Klemmstellen in Kanälen und hinter Abdeckungen von Tragbügeln sind nur in Dosen, Kästen oder Klemmen zulässig. Der zufälligen Berührung zugängliche Klemmen, z. B. Klemmringe, sind nur zulässig, wenn die Deckel der Leitungskanäle oder die Abdeckungen von Tragbügeln aus nichtleitendem Werkstoff bestehen und im Handbereich nur mit Werkzeugen entfernt werden können. Die Legung von Leitungen für Starkstrom- und Informationsanlagen in einem Leitungskanal ist nur dann gestattet, wenn keine störende Beeinflussung entsteht. Werden Aderleitungen verwendet, dann ist auf der ganzen Länge ein Abstand von mindestens 10 mm oder eine entsprechende Abschottung (isolierende Trennwand) erforderlich.

5.4.2.9. Spanndraht-Installation

Die Spanndraht-Installation (Bild 5.73) ist eine Installationsart, bei der die Legung von Kabeln und Leitungen an *Spanndraht* oder *Spannseil* (*Tragelement*) erfolgt.
Die Anwendung hat vorzugsweise in Industriebauten und im Freien zu erfolgen. In Fabrik- und Lagerhallen bereitet die Installation von Leitungen oft große Schwierigkeiten, wenn Pfeiler, Unterzüge, Maschinen oder Installationen anderer Gewerke, z. B. für lufttechnische Anlagen, eine Installation entsprechend den beschriebenen Installationsarten nicht ermöglichen oder sie zu aufwendig und demzufolge unökonomisch gestalten. In gesellschaftlichen Bauten sollte sie nur dort angewendet werden, wo die Ansichtsgüte nicht beeinträchtigt wird, z. B. in Zwischendecken, Kellerräumen oder Installationsgeschossen. Die Installation hat vorwiegend in horizontaler

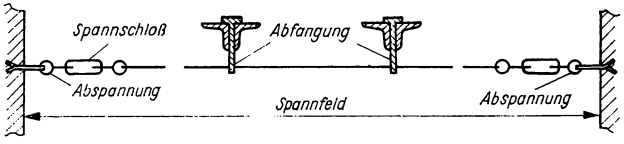


Bild 5.73. Spanndraht-Installation

Ebene zu erfolgen; sie kann jedoch auch vertikal und unter der Voraussetzung, daß Baukörper durch ablaufendes Wasser nicht beschädigt werden, schräg vorgenommen werden.
Die *Abspannung* ist eine Verankerung des Spanndrahts oder -seils an den Endpunkten einer Spannweite. Die *Verankerung* ist mit einer Spannvorrichtung (Spannschloß) zum Spannen des Tragelements und zur Einregulierung des Durchhangs zu versehen. Das *Tragelement* ist das Spannseil oder der Spanndraht zwischen zwei Abspannungen. Als *Abfangung* bezeichnet man Auflagen für das Tragelement (Spannseil oder -draht) zwischen zwei Abspannungen, die zur Verminderung des Durchhangs ohne Einfluß auf die auftretende Seil- oder Drahtkraft dienen.
Die *Spannweite* ist der Abstand zwischen zwei Abspannungen. Das *Spannfeld* ist die Gesamtheit der für die Spanndraht-Installation zwischen zwei Abspannungen benötigten Montageteile wie Wandhaken, Spannschloß, Spannseil usw.
Bei *Anwendung der Spanndraht-Installation* sind u. a. folgende Forderungen zu berücksichtigen: Der Korrosionsschutz der Tragelemente muß den auftretenden chemischen Beanspruchungen entsprechen. Die zu verwendenden Tragelemente müssen grundsätzlich verzinkt sein. Innerhalb einer Spannweite sollte ein Tragelement aus einem Stück bestehen.
Die größte Spannweite darf 50 m nicht überschreiten.
Mehrere hintereinanderliegende Spannfelder sind zugunabhängig zu unterteilen.
Bei Spannweiten bis zu 10 m Länge ist nur ein Spannschloß zu verwenden, sofern die Spanndrähte oder -seile nicht mit über 50% der zulässigen Zugbeanspruchung belastet werden. Bei höherer Belastung und größerer Länge sind auf beiden Seiten des Spannfeldes Spannschlösser vorzusehen.
Es ist zu sichern, daß der Baukörper bzw. die Bauelemente, wie Unterzüge, Stützen usw., an denen die Abspannung erfolgt, die auftretenden Kräfte sicher aufnehmen. In Zweifelsfällen ist die Stellungnahme von Fachkräften des Bauwesens einzuholen.
Bei Nachinstallationen ist auf jeden Fall die Belastbarkeit des Tragorgans und der Bauelemente zu überprüfen.
Kreuzungen mit Verkehrswegen sind möglichst rechtwinklig auszuführen.
In Gebäuden sind die erforderlichen Mindesthöhen entsprechend den örtlichen Gegebenheiten festzulegen.
Je nach den Erfordernissen können Spannfelder mit einem oder mit zwei Tragorganen erstellt werden. Sie sind vorzugsweise in den Ausführungen nach Tabelle 5.137 vorzunehmen.

Tabelle 5.137: Ausführungsarten der Spanndraht-Installation

Ausführungsart	Installationsebene	Anzahl der Tragelemente eines Systems	Lage des Systems
horizontal – einfach	waagerecht	1	–
horizontal – zweifach-flach		2	flach
horizontal – zweifach-hochkant			hochkant
vertikal – einfach	senkrecht	1	–
vertikal – zweifach		2	

Die Abspannung kann mit verschiedenen Bauelementen erfolgen, so mit Steinschrauben, Haken mit Gewinde für Holz, Sonderkonstruktionen entsprechend der jeweiligen Form und Art des Befestigungsgrundes (Bilder 5.74···5.79). Zur Befestigung der Leitungen oder Rohre werden u. a. Spanndraht-

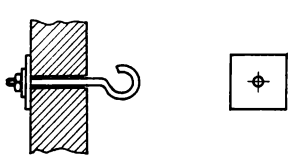


Bild 5.74. Haken mit Gewinde und mit Platte (Plattengröße ist in Abhängigkeit vom Befestigungsuntergrund festzulegen)

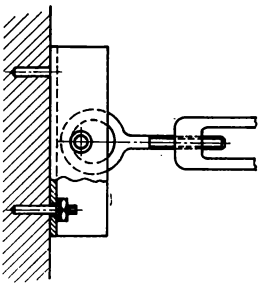


Bild 5.75. Abspannung am Bauwerk

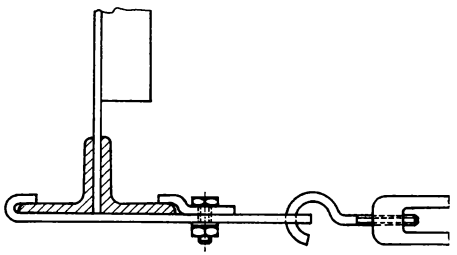


Bild 5.76. Abspannung am Stahlprofil

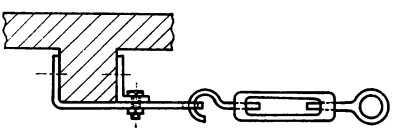


Bild 5.77. Abspannung am Unterzug

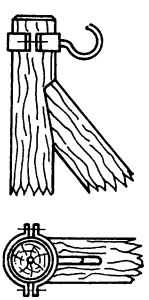


Bild 5.78. Abspannung am Mast

schellen (Bild 5.80), Tragringe (Bild 5.81), Hängeschellen aus Plast oder Stahl und Perfolband verwendet. Sind mehrere Leitungen oder Rohre parallel zu führen (Bündel- bzw. Mehrfachlegung), wofür die Spanndraht-Installation besonders geeignet ist, dann werden auch zwei Tragorgane verwendet. Für Informationsanlagen sind in Tabelle 5.138 die gebräuchlichsten Ausführungen und Befestigungsarten der Leitungen zusammengefaßt.
Beim Wickelverfahren erfolgt die Befestigung der Leitung ohne Befestigungsmaterial am Tragorgan (Bild 5.82). Es ist nur bei Legung *einer* Leitung anzuwenden; eine Mehrfachlegung ist nicht gestattet. Die Legung erfolgt zweckmäßigerweise so, daß der Leitungsring über das Tragorgan geschoben wird und die Leitungsenden nach beiden Seiten auseinandergezogen werden. Wie aus Tabelle 5.138 ersichtlich, ist die Anwendung nur für eine Streckenlast je m bis maximal 3 N vorgesehen. Auch aus ökonomischen Gründen ist die Anwendung bei höher dimensionierten Leitungen nicht sinnvoll. Die Befestigung mit PVC-Lochband erfolgt so, daß das Lochband straff um die

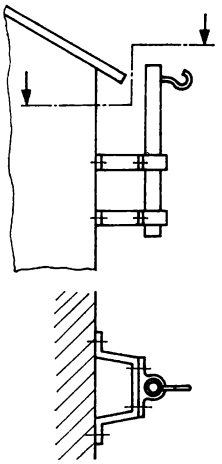


Bild 5.79. Abspannung mit Rohrständer

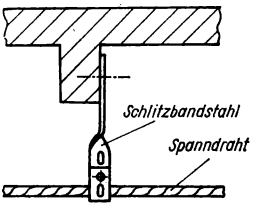


Bild 5.80. Abfangung

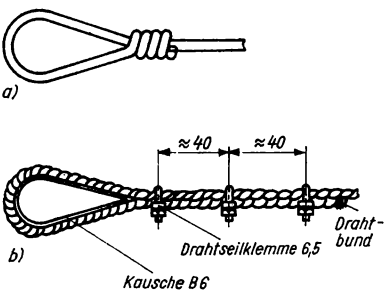


Bild 5.81. Endbunde
a) bei Stahldraht, b) bei Drahtseil

Tabelle 5.138: Zuordnung der Befestigungsart zu der Ausführungsart der Spanndraht-Installation in Informationsanlagen

Ausführungsart	Streckenlast N/m	Art der Befestigung
horizontal — einfach	≦ 3	Wickelverfahren
	≦ 30	Perfolband PVC-Lochband mit Einsteckknopf Hängeschelle
vertikal — einfach		Perfolband
horizontal — zweifach-flach	> 30	Bügel D
horizontal — zweifach-hochkant		Bügel E
vertikal — zweifach		

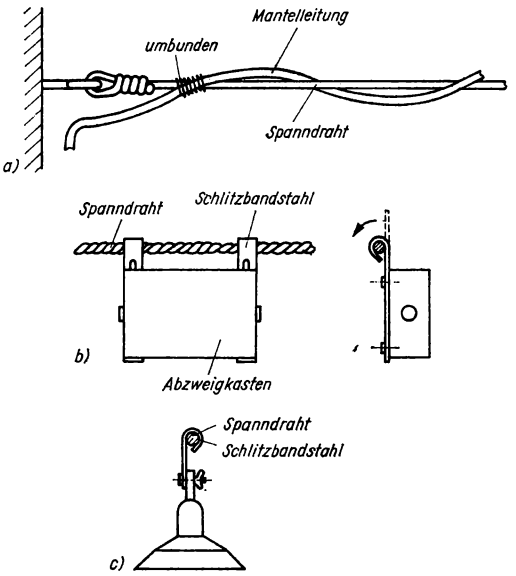


Bild 5.82. Befestigung am Tragorgan
a) Mantelleitung, b) Abzweigkasten, c) Leuchte

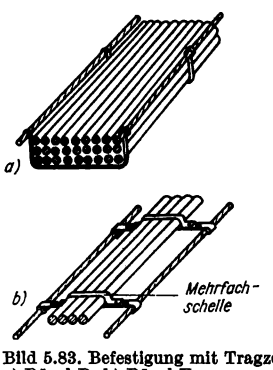


Bild 5.83. Befestigung mit Tragzeilen und Bügeln
a) Bügel D, b) Bügel E

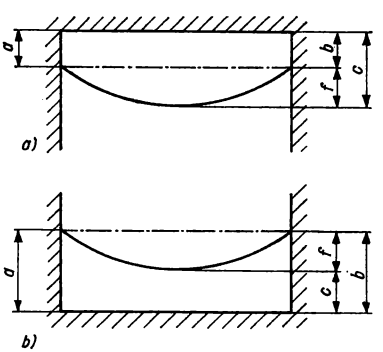


Bild 5.84. Bestimmungen des Durchhangs
a) $f = c - \frac{a+b}{2}$, b) $f = \frac{a+b}{2} - c$

Leitung oder das Leitungsbündel und das Tragorgan gelegt wird und die Enden mit einem Einsteckknopf zusammengeschaltet werden. Die Befestigung mit Perfolband darf dort nicht erfolgen, wo mit Säure- oder Phenoldämpfen zu rechnen ist. Bei der Legung von mehr als 7 Leitungen sind zwei Tragorgane zu verwenden (Bild 5.83). Dabei können Bügel, wie in Tabelle 5.138 angeführt, verwendet werden. Bei der Bemessung des Durchhangs sind die Festlegungen in Vorschriften (Einheitliches Standardwerk der Elektrotechnik) zu berücksichtigen (Bild 5.84).

5.4.2.10. Pritschen-Installation

Die Pritschen-Installation ist eine Installationsart, bei der die *Tragorgane aus durchgehenden Auflagen*, genannt *Bahnen*, bzw. *unterbrochenen Auflagen*, genannt *Rosten*, zur Aufnahme von Leitungen und Rohren bestehen. Die verschiedenen Varianten (Bild 5.85) gestatten die Befestigung der Pritschen an Wänden, Decken und auf Fußböden. Diese Installationsart gewinnt zunehmend in Industriebauten, z. B. auf Grund der größeren Abstände der Stützen und Pfeiler in den Baukörpern und des dadurch bedingten Einsatzes von weitspannenden Tragorganen, an Bedeutung. Es ist zu beachten, daß Aderleitungen nicht ohne Rohr an oder auf Pritschen gelegt werden dürfen. Für Leitungen bis zu einem Querschnitt von 4 mm² darf der Abstand der Auflagen bei Rosten 500 mm bei waagerechter und 1000 mm bei senkrechter Anordnung nicht überschreiten. Bei waagerecht-flacher Lage der Pritschen ist eine Befestigung der Leitungen und Rohre nicht erforderlich.

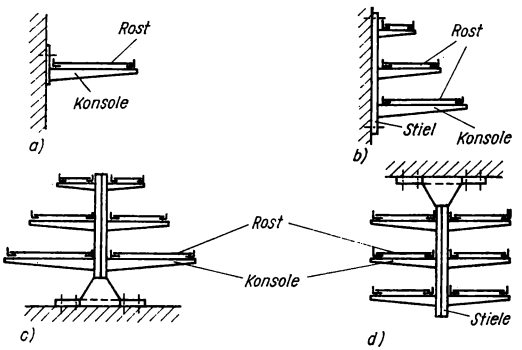


Bild 5.85. Pritschen-Installation
a), b) Befestigung an Wänden, c) am Fußboden, d) an der Decke

5.4.2.11. Rohrtrassen-Installation

Unter Rohrtrassen-Installation versteht man eine *aus Rohren, Festpunkt- und Distanzstegen bestehende Anordnung mit/ohne Verteilungspunkten*, bei der durch geeignete Zusammenfassung der Rohre die Stabilität gegeben ist (Bild 5.86). Dabei hat die Anordnung der Distanz- und Festpunktstege entsprechend den Rohrdurchmessern und der Art der verwendeten Rohre zu erfolgen, und zwar so, daß ein Durchbiegen der Rohrtrasse ohne zusätzliche mechanische Beeinflussung nicht auftritt. Der maximale Abstand zwischen Distanz- und Festpunktstegen darf jedoch bei waagerechter Legung 1000 mm und bei senkrechter Legung 1500 mm nicht überschreiten.

5.4.2.12. Fußleisten- und Wandkanal-Installation

Außer den vorgenannten Installationsarten, die bis auf die Spanndraht-Installation, die auch im Freien angewendet wird, nur in Gebäuden Anwendung finden, ist noch die speziell herausgebildete *Kanal-Installation*, das sog. Fußleisten- und Wandkanal-System, kurz *FWK-System* genannt, zu erwähnen.
Das Fußleisten- und Wandkanal-System ist eine besondere Ausführungsart der Kanal- und Tragbügel-Installation. Es besteht aus verschiedenartigen Bauteilen, z. B. Grund-, Abdeck- und Ausgleichprofil, Geräteträger, Verbindungselemente, mit denen ein *beliebiges Kanalnetz* im Bereich von Fußböden, Wänden oder Decken gebildet werden kann (Bilder 5.87 und 5.88). Mit Hilfe von Haltewinkeln ist auch eine freitragende Legung an Brüstungen o. ä. möglich.

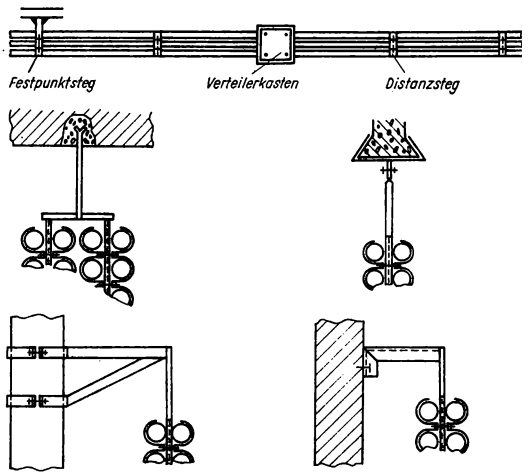


Bild 5.86. Rohrtrassen-Installation

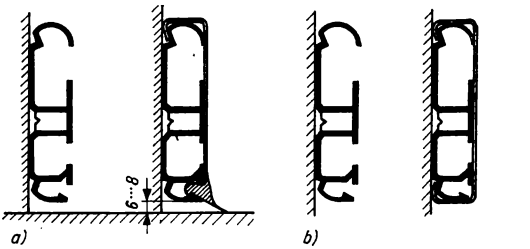


Bild 5.87. Prinzipdarstellung des Fuß- und Wandleistenkanals
a) Fußleistenkanal, bestehend aus Grundprofil, asymmetrischem Abdeckprofil, Ausgleichsprofil, b) Wandleistenkanal, bestehend aus Grundprofil, symmetrischem Abdeckprofil

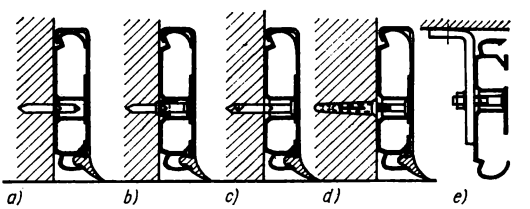


Bild 5.88. Befestigungsarten des Fuß- und Wandleistenkanals
a), b) mit Dübelbolzen, c) mit Stahlnagel, d) mit Formstoffdübel, e) mit Haltewinkel

Die vollisolierte Ausführung des FWK-Systems ermöglicht das kombinierte Legen von Leitungen für Informations- und Starkstromanlagen bei Verwendung der verschiedenen Installationsgeräte, wie Steckdose für Fernsprechgeräte, Antennensteckdose, Steckdose mit Schutzkontakt usw. Die Bauteile bestehen aus schlagfesten, oberflächenfertigen Plastwerkstoffen. Installationsgeräte können an jeder beliebigen Stelle des Kanalnetzes in kastenförmigen Geräteträgern montiert werden.
Es ist durch Kanalabzweigstücke möglich, Kombinationen mit dem UFI-System herzustellen. Im Bereich der Kanal-Abzweigstücke können zur Herstellung von Leitungsabzweigen Klemmleisten angebracht werden. Die Befestigung der Geräteträger, Klemmleisten und Abzweigstücke ist ohne Schraubverbindungen möglich.

5.4.2.13. Installation mit selbsttragenden Leitungen

Anstelle der bekannten Luftkabelmontage, Leitung/Kabel am Tragorgan mit Schellen befestigt, werden in zunehmendem Maße selbsttragende Leitungen verwendet. Die Anwendung erfolgt hauptsächlich dort, wo eine Kabellegung im Erdreich technisch große Schwierigkeiten bereitet, z. B. in felsigem Boden, oder mit hohen Kosten verbunden ist. Außerdem wendet man sie zum Aufbau von Außenleitungsnetzen für Fernsprechanlagen in wenig erschlossenen Gebieten an oder dort, wo mit häufiger Änderung der Leitungsführung zu rechnen ist. Dies kann u. a. bei provisorischen Baustellennetzen auf Großbaustellen, bei Anschlußleitungen zu Tongruben oder in Tagebauen der Fall sein. Ein weiterer Anwendungsfall ist dann gegeben, wenn Außenleitungsnetze an Baukörpern geführt werden und kurze Entfernungen von Gebäude zu Gebäude zu überbrücken sind. Diese selbsttragenden Leitungen sind einmal so aufgebaut, daß sich *Tragorgan* und *eigentliche Leitung* getrennt voneinander in einer gemeinsamen Ummantelung befinden. Als Tragorgan wird hierbei Drahtseil verwendet. Zum anderen gibt es selbsttragende Leitungen, bei denen das Tragorgan ein Stahldrahtgeflecht aus flachen verzinkten Stahldrähten ist. Dieses Stahldrahtgeflecht befindet sich zwischen Innen- und Außenmantel der Leitung und ist somit gegen Korrosion geschützt. Leitungen mit solchem Tragorgan werden mit Hilfe spezieller Keil-Spannklemmen zwischen zwei Verankerungen abgespannt. Diese Keil-Spannklemmen pressen die Leitung fest zwischen zwei keilförmig ausgebildete Plastteile und nehmen so die auftretenden Kräfte sicher auf.

5.4.2.14. Erdkabel-Installation

Bei dieser Installation werden Kabel unmittelbar *ins Erdreich* gelegt. Zu diesem Zweck werden Kabelgräben ausgehoben, die je nach Beschaffenheit des Erdreiches und dem Grad der Gefährdung eine Tiefe von etwa 60 cm···120 cm haben und nach der Kabellegung wieder verfüllt werden (Bild 5.89). Das

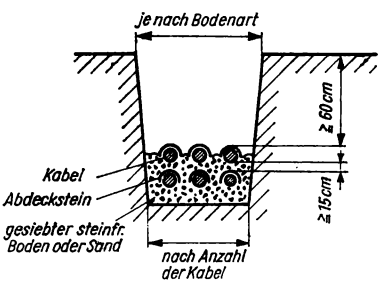


Bild 5.89. Querschnitt eines Kabelgrabens

Ausheben von Kabelgräben erfolgt manuell oder, wenn die Trassenführung es gestattet, mechanisch, z. B. mit Hilfe von Grabenfräsen. Die Grabensohle muß aus gesiebtem oder gleichwertigem Sand bestehen, sie muß unbedingt steinfrei sein. Bei felsiger oder steiniger Grabensohle ist vor dem Legen der Kabel auf die Grabensohle eine Sandschicht bzw. Schicht aus feinkörnigem Kies einzubringen. In frisch aufgefülltem Boden sind die Kabel in schlangenförmigen Linien zu legen, und zwar so, daß auf 10 m Länge etwa 0,3···0,5 m Kabel mehr benötigt werden.
Um die notwendigen Erdarbeiten, nämlich das Ausheben und das nach erfolgter Legung erforderliche Verfüllen des Kabelgrabens, auf einem Mindestmaß zu halten, sollte die Kabeltrasse immer so gewählt werden, daß möglichst mehrere Kabel in einem Kabelgraben gelegt werden können. Bei der Planung von Kabeltrassen müssen eventuelle Erweiterungsmöglichkeiten der Bebauung, so z. B. in Industriegeländen, berücksichtigt werden. Das sollte in doppelter Hinsicht erfolgen, und zwar dürfen erstens die für die Erweiterung vorgesehenen Bebauungsflächen in keinem Fall für die Kabellegung vorgesehen werden, zweitens sollte die Erschließung der vorgesehenen Bebauung bei der Dimensionierung der Kabel eingeplant werden.
Die Legung der Kabel erfolgt vorwiegend entlang von Gehwegen, Fahrbahnen, Gleisen, Einfriedungen usw. Eine Legung unter Fahrbahnen und Gleisen ist mit Ausnahme von Kreuzungen nicht gestattet. Bei Kreuzungen sind besondere Festlegungen des Einheitlichen Standardwerkes der Elektrotechnik sowie die Bestimmungen der jeweiligen örtlichen Rechtsträger zu beachten. Das gleiche gilt bei paralleler Legung und Kreuzung von Kabeln mit Kabeln verschiedener Anlagen, wie Informationsanlagen und Starkstromanlagen, und von Kabeln mit anderen Versorgungsleitungen, z. B. Gas- und Heizungsrohren.
Die Kabel sind mit *Kabelabdecksteinen* (*Kabelhauben*) abzudecken. Es stehen genormte Abdecksteine mit den lichten Weiten von 50, 60, 70, 80 und 100 mm Nennweite und einer einheitlichen Länge von 330 mm zur Verfügung. Wenn mit Erdarbeiten nicht oft zu rechnen ist, z. B. bei Legung an Waldwegen, kann auf die Abdeckung verzichtet werden. Geländeabschnitte, in denen mit einem hohen Grundwasserspiegel, mit chemisch aggressiven Bodensubstanzen oder ähnlichen Gefahrenquellen für die Kabel zu rechnen ist, sind möglichst zu meiden. Es ist deshalb erforderlich, schon bei der Planung und Projektierung eingehende Untersuchungen über Lage und Ausdehnung vorhandener Versorgungsleitungen und die Bodenverhältnisse durchzuführen. Die Kabel sind in Schutzrohren zu führen, wenn sie in Bauwerke eingeführt werden.
Zur Kennzeichnung der Lage der Kabel sind sog. Kabelmarkierungssteine ins Erdreich einzusetzen, dies hat unbedingt bei jeder Richtungsänderung und bei jeder Verbindungs- oder Abzweigstelle (Muffe) zu erfolgen. Die Buchstaben dieser Kabelmarkierungssteine müssen in Blickrichtung zur Zentrale lesbar sein. Um bei späteren Erdarbeiten die visuelle Identifizierung der gelegten Kabel zu ermöglichen, sind alle Kabel mit Erkennungszeichen in Abständen von etwa 2···5 m entsprechend der örtlichen Gegebenheit zu versehen. Zur Eingrenzung von evtl. auftretenden Störungen und als Grundlage für Erweiterungsarbeiten müssen mit Abschluß der Installationsarbeiten eindeutige Pläne mit Eintragungen über die Lage, die Länge, die Dimension der Kabel und die Lage der Verbindungs- und Abzweigstellen vorliegen. Das ist bei dieser Installationsart unbedingt notwendig, da spätere Erweiterungen bzw. evtl. notwendige Störungsbeseitigungen sonst mit erheblichen Mehrkosten verbunden sind. Die Erdkabel-Installation ist nur zweckmäßig, wenn Erweiterungen bzw. Änderungen nicht oft notwendig werden, da diese sehr kostenaufwendig sind.

5.4.2.15. Kabelkanal-Installation

Bei Außenleitungsnetzen, die oft Veränderungen bzw. Erweiterungen unterliegen, so z. B. in großen Industrieobjekten oder in großen Ortschaften, erweist sich die Kabelkanal-Installation gegenüber der Erdkabel-Installation als zweckmäßiger, da die aufwendigen Erdarbeiten wegfallen. Die Kabelkanäle werden aus sog. *Kabelformsteinen*, Plast- oder Stahlrohren gebildet. Die Kabelformsteine sind 1000 mm lang, 150 mm hoch und enthalten ein bis vier Kabelzüge, die eine lichte Weite von je 100 mm aufweisen (Bild 5.90). Für die Einführung in Gebäude steht außerdem ein Kabelformstein mit einer Länge von 750 mm, einer Höhe und Breite von je 80 mm und einem Kabelzug mit einer lichten Weite von 40 mm zur Verfügung (Bild 5.90a).
Die Kabelformsteine bestehen aus Beton und sind an den Stirnseiten mit Nut (Löcher) und Falz (Dornen) versehen, um Paßgenauigkeit beim Zusammenfügen zu erreichen. Die Verlegung erfolgt geradlinig im Erdreich. Je nach den Erfordernissen werden mehrere Kabelformsteine über- oder/und nebeneinander verlegt. Das Einziehen der Kabel erfolgt manuell oder mechanisiert mit Kabelkraftwinden. Da sich die erforderlichen Kräfte zum Einziehen mit zunehmender Länge und zunehmendem Durchmesser stark vergrößern, bedingt durch die Reibung zwischen Kabelmantel und Kanalwandung, ist es notwendig, bei geradliniger Führung in Abständen von etwa 70···100 m Kabelschächte anzuordnen. Außerdem sind Kabelschächte oder Abzweigkästen (Bild 5.91), unabhängig vom Abstand, dort erforderlich, wo Abzweigungen vorgenommen werden, oder dort, wo eine Richtungsänderung des Kabelkanals vorgenommen wird. Von diesen Kabelschächten oder Abzweigkästen aus kann dann das Einziehen der Kabel vorgenommen werden. Außerdem werden in ihnen die Verbindungsmuffen — erforderlich, da Kabel nur in begrenzten Längen hergestellt werden können — und die bei Abzweigungen notwendigen Abzweigmuffen eingebaut (gespleißt) und gelagert. Kabelschächte sind mit Sickerlöchern zu versehen bzw. unter Verwendung eines Rückstauventils an die Entwässerungsleitungen anzuschließen. Das ist zum Abfluß des sich ansammelnden Regenwassers usw. erforderlich. In der Regel werden Kabelschächte und Abzweigkästen aus genormten Betonfertigteilen nach dem Baukasten-Prinzip benutzt. Durch die Anwendung wettersicherer Verzweiger können Schaltpunkte mit entsprechenden Schaltgarnituren errichtet werden.

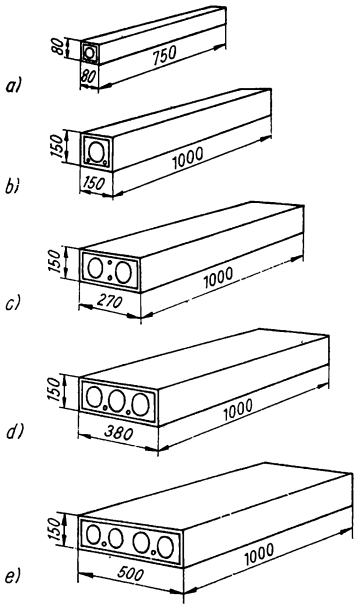


Bild 5.90. Kabelformsteine
a) für Hauseinführung, Masse 8 kg, LW 40 mm (in der Stirnwand befinden sich 2 Löcher mit d = 6 mm und etwa 70 mm Tiefe, in die Haltedorne aus Rundstahl mit d = 5 mm gesteckt werden), b) einzügig, Masse 30 kg, LW 100 mm, c) zweizügig, Masse 50 kg, d) dreizügig, Masse 70 kg, e) vierzügig, Masse 90 kg (in den Kabelformsteinen zu b)···e) befinden sich in den Stirnwänden je zwei Löcher mit d = 10 mm und etwa 50 mm Tiefe, in die Haltedorne aus Rundstahl mit d = 8 mm gesteckt werden)

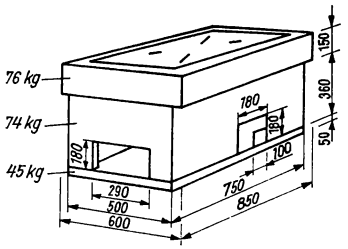


Bild 5.91. Abzweigkasten

5.4.3. Montage von Leitungen

5.4.3.1. Aderleitungen und Schaltdrähte

Bei der Montage von Aderleitungen und Schaltleitungen sind u. a. nachfolgende Punkte zu beachten. Unter *Montage* versteht man hierbei das *Legen in Rohre oder in Kanal*, die *Freiverdrahtung*, *Bündelverdrahtung* oder *Kanalverdrahtung*. Grundsätzlich dürfen diese Leitungen und Drähte, wenn sie in Ringen geliefert werden, nicht vom Ring abgezogen werden, sie sind abzurollen. Sie sind an Anschlüssen so zu legen, daß ein Nachsetzen möglich ist. Bei Aluminiumleitern sind die Anschlußenden vor dem Klemmen zu säubern und mit säurefreiem Fett zu fetten. Beim Einziehen in Rohr oder beim Richten dürfen sie, um Beschädigungen zu vermeiden, nicht gereckt werden. Ebenso ist zur Vermeidung von Isolationsbeschädigungen das Ziehen über scharfe Kanten zu vermeiden.
Das *Verbinden von Leitern* untereinander hat durch Verschrauben, Löten, Schweißen oder Pressen zu erfolgen. Zum Pressen werden auch die Wickeltechnik, bei der der Leiter mittels eines Wickelwerkzeuges an ein Anschlußelement gepreßt wird, und die Quetschtechnik gezählt. Beim Abisolieren dürfen die Leiter nicht beschädigt werden, die Isolierung soll etwa 1 mm vor dem Anschlußelement enden. Der Leiterquerschnitt darf bei der Verbindung nicht vermindert werden. Die sog. Leuchtenklemmen dürfen nicht als Abzweigklemmen verwendet werden. Es ist nicht gestattet, Aderleitungen und Schaltdrähte unmittelbar an, auf oder unter Putz zu legen. An Klemmen von Schaltern, Steckdosen usw. darf in der Regel nur ein Leiter angeschlossen werden. Mehrere Leiter dürfen in den Ausführungen nach Bild 5.92 angeschlossen werden. Beim

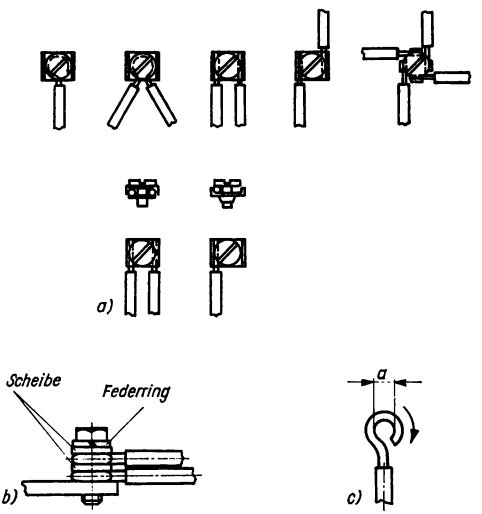


Bild 5.92. Klemmverbindungen
a) Verbindungsarten an einer Klemme, b) Befestigung von zwei Anschlüssen, c) Öse (a = Gewindedurchmesser +1 mm, Biegung entsprechend dem Drehsinn der Befestigungsschraube)

Anschluß von Null- und Schutzleitern an Anschlußbolzen oder Schrauben ist nur ein Leiter je Anschlußstelle zulässig. Die Anschlußenden flexibler Leiter (Litzen) bis 6 mm² sind vor dem Anklemmen zu verlöten. Wird bei eindrähtigen Leitern oder verlöteten Litzen das Leiterende zu einer Öse gebogen, so hat das im Drehsinn der Befestigungsschraube zu erfolgen (Bild 5.92). Die Anschlußenden eindrähtiger Leiter über 16 mm² und die von Litzen ab 10 mm² sind zum Anklemmen mit Kabelschuhen zu versehen, dies hat durch Löten, Schweißen oder Pressen zu erfolgen. Entsprechendes gilt auch für Leiter in Mantelleitungen, Schaltleitungen usw. Beim Einziehen von Aderleitungen und Schaltdrähten in Rohre oder geschlossene Kanäle ist ein Verdrallen zu vermeiden. Das Einziehen erfolgt zweckmäßigerweise mit einem Stahlband, das als Zugdraht dient.

5.4.3.2. Stegleitungen

Stegleitungen sind vom Ring abzurollen; das Abziehen von den Leitungsringen ist nicht gestattet, ebenso ist ein Verdrehen der Leitung beim Legen nicht zulässig. *Anschlüsse* sind so auszuführen, daß ein Nachsetzen auf jeden Fall gewährleistet ist. Da die Stegleitungen fast immer in Putz gelegt werden, ist diese Reservelänge unbedingt erforderlich. Bei der *Legung* ist darauf zu achten, daß die Stegleitung in ihrem gesamten Verlauf flach am Baukörper anliegt. Unebenheiten am Baukörper, die zur Beschädigung der Stegleitung führen können, sind zu beseitigen. Hierzu s. a. den Abschn. über Imputz-Installation (S. 399). Die Befestigung soll in Abständen von maximal 300 mm erfolgen; vor Bögen, Dosen usw. soll ein Befestigungsabstand von 100 mm nicht überschritten werden (Bild 5.93). Als Befestigungsmittel sind Schellen oder Bügel aus isolierendem Werkstoff, Gipsbänder, geeignete Kleber oder Stahlnägel mit einem Isolierstoffkeil gestattet. Bei Bögen gemäß Darstellung im Bild 5.93 sind die Leitungsstege aufzutrennen

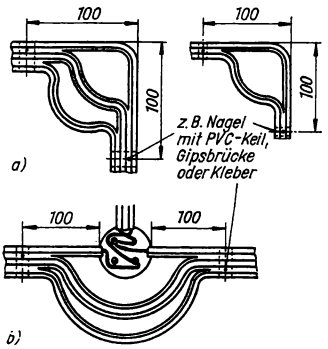


Bild 5.93. Bögen und Befestigungsabstände bei der Legung von Steigleitungen
a) Bögen, b) Abzweig

und die einzelnen Leitungen auseinanderzubiegen. Bei der *Beschaltung*, z. B. von Dosen, können die aufzuschaltenden Einzelleitungen nach dem Trennen gekürzt werden, um so die nicht benötigten Einzelleitungen an der Dose vorbeiführen zu können. Sind mehrere Stegleitungen parallel zu legen, ist darauf zu achten, daß die Breite 50 mm nicht überschreitet. Erst nach mindestens 15 mm Abstand dürfen die nächsten Stegleitungen ebenfalls nur bis zu einer Breite von 50 mm gelegt werden.
Tabelle 5.139 enthält Temperaturbereiche und Biegeradien von Stegleitungen.

Tabelle 5.139: Temperaturbereich und Biegeradien

Stegleitung Typ	Lagertemperatur		Verarbeitungstemperatur		Kleinster Biegeradius
	min. °C	max. °C	min. °C	max. °C	
FY FYY NFY NSFYY	−30	+60	−5	+50	2*d*

Unter Lagertemperatur ist die Umgebungstemperatur während der Lagerung und des Transports zu verstehen. Der Biegeradius gilt nur für einmaliges Biegen, bei mehrmaligem Biegen ist ein größerer Radius einzuhalten.
Sonderstegleitungen, die in Fußböden gelegt werden, müssen mindestens 100 mm von Wänden entfernt gelegt werden.

5.4.3.3. Mantelleitungen

Für Mantelleitungen gilt hinsichtlich des Abziehens von Ringen, des Nachsetzens bei Schaltpunkten usw. dasselbe wie bei den vorgenannten Leitungen. Tabelle 5.140 enthält Temperaturbereiche und Biegeradien von Mantelleitungen. Entsprechend der großen Bedeutung der Plastmantelleitung in der Installationstechnik erscheint es unter anderem notwendig, die maximalen *Befestigungsabstände* bei Einzel- oder Bündellegung anzugeben (s. Tabelle 5.141 und Bild 5.94).

Tabelle 5.140: Temperaturbereich und Biegeradien

Mantelleitung	Lagertemperatur		Verarbeitungstemperatur		Kleinster Biegeradius
	min. °C	max. °C	min. °C	max. °C	
MYY	−30	+60	−5	+50	5*d*
MY(St)Y					7*d*
MYM NStYM NStSYM					4*d*

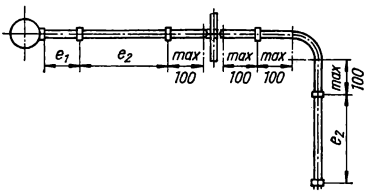


Bild 5.94. Befestigungsabstände (Richtwerte) bei Mantelleitungen

Tabelle 5.141: Befestigungsabstände (Richtwerte)

Legungsart		Außendurchmesser der Leitung oder des Bündels in mm											
		≦ 10		> 10···15		> 15···20		> 20···30		> 30···50		> 50···75	
		Befestigungsabstände in mm											
		e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2
Legen unter Putz		100	300	100	350	100	400	150	500	–	–	–	–
Legen auf Putz	waagerecht	100	250	150	300	250	350	300	400	400	600	400	900
Legen an Pritschen													
Legen in Tragbügeln (offen)													
Legen mittels Abstandschellen	senkrecht	100	300	150	400	250	500	300	600	400	800	400	1000
Legen mittels Schellen mit Druckschraube													
Legen an Spanndraht		200	250	250	300	300	300	400	300	500	300	500	300

Leitungen, bei denen mit mechanischen Beschädigungen zu rechnen ist, z. B. in Werkhallen oder Schulkorridoren, sind durch Rohre oder entsprechende Abdeckungen zu schützen. Bei Deckendurchführungen (Aufputzmontage) muß ein entsprechender Schutz vorgesehen werden; das Schutzrohr oder die Abdeckung muß mindestens 100 mm über Oberfläche Fertigfußboden (OFF) hinausragen. Wanddurchführungen können ohne Rohr vorgenommen werden. Wenn Mantelleitungen auf Freileitungen übergeführt werden, ist ein *Überführungsendverschluß* oder ein *Übergangskopf* zu verwenden (Bild 5.95).

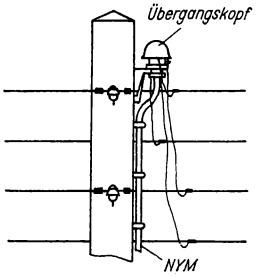


Bild 5.95. Übergang der Mantelleitung auf Freileitung

5.4.4. Montage von Rohren

5.4.4.1. Plastrohre und Plastpanzerrohre

Plastrohre dürfen nicht in feuer-, explosions- und explosivstoffgefährdeten Räumen angewendet werden. Dort ist Plastpanzerrohr zu verwenden. Sofern keine besonderen mechanischen Beanspruchungen auftreten, kann für Bögen in Verbindung mit Plastrohren (Elektro-Installationsrohr A) Plastriffelrohr verwendet werden. Plastpanzerrohr ist dort anzuwenden, wo es die mechanischen Beanspruchungen erfordern, bzw. in obengenannten Räumen. Es ist auf Grund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit gegenüber Stahlpanzerrohr zu bevorzugen. Die Lagertemperaturen liegen im Bereich von −15···+50 °C und die Verarbeitungstemperaturen im Bereich von 0···+40 °C.

Die in den Tabellen 5.142···5.144 aufgeführte Anzahl der Schaltdrähte oder Aderleitungen gilt für eine Rohrstrecke bis zu 9 m und zwei 90°-Bögen oder einem Etagenbogen. Sie stellen Richtwerte dar; für nicht aufgeführte Leitungen oder Drähte gelten sie sinngemäß entsprechend ihrem Außendurchmesser.

Parallel zu legende Rohre sind bei Richtungsänderung mit gleichen Radien zu biegen. Bei Rohren mit unterschiedlichen Nennweiten wird der gemeinsame Biegeradius nach der größten Nennweite bestimmt. Die Biegeradien sind der Tabelle 5.145 zu entnehmen.

Das Herstellen der Bögen, soweit nicht handelsübliche Bögen verwendet werden können, erfolgt durch gleichmäßiges Erwärmen der Rohre. Das Biegen kann mit Luftüberdruck und Verschlußstopfen, mit dem Innendurchmesser der Rohre entsprechenden Biegespiralen durch Füllen mit Sand zur Vermeidung von Deformierungen erfolgen. Das Verbinden der Rohre hat vorzugsweise mit Schiebemuffen zu erfolgen. Steckmuffen müssen bei der Montage der Rohre angefertigt werden.

Tabelle 5.142: Zuordnung Aderleitung und Leiterquerschnitt zu Plastrohren

Plastaderleitung NYA Leiterquerschnitt	Plastrohr, Nenngröße in mm							
	9	11	13,5	16	23	29	36	48
mm²	max. Anzahl der Leitungen							
1,5	3	5	7	14	22	30	38	50
2,5	2	3	5	8	12	18	25	33
4,0	–	2	3	4	9	12	16	22
6,0	–	–	2	3	5	7	9	13
10,0	–	–	–	2	3	3	4	6
16,0	–	–	–	–	–	2	3	4
25,0	–	–	–	–	–	–	2	3
35,0	–	–	–	–	–	–	–	2

Tabelle 5.143: Zuordnung Schaltdraht und Leiterdurchmesser zu Plastrohren und Plastpanzerrohren

Plastschaltdraht Y Aderanzahl × Leiterdurchmesser mm	Plastrohr, Nennweite in mm							
	9	11	13,5	16	23	29	36	48
	max. Anzahl der Drähte							
1 × 0,6	10	16	22	35	60	80	120	220
1 × 0,8	8	10	15	24	44	60	80	150
1 × 1,0	3	4	7	12	20	40	60	100
2 × 0,6	4	5	8	13	19	30	50	85
2 × 0,8	3	3	5	8	12	23	30	60
2 × 1,0	1	2	3	5	8	15	23	36
3 × 0,6	2	3	5	9	13	19	25	40
3 × 0,8	2	2	4	6	10	14	17	28
3 × 1,0	1	1	2	3	5	9	12	20

	Plastpanzerrohr, Nennweite in mm						
	9	11	13,5	16	21	29	36
	max. Anzahl der Drähte						
1 × 0,6	16	33	37	50	70	100	180
1 × 0,8	10	22	26	38	50	75	125
1 × 1,0	4	11	13	19	30	50	100
2 × 0,6	5	13	14	15	27	38	66
2 × 0,8	3	7	8	11	21	29	48
2 × 1,0	2	4	5	9	15	19	34
3 × 0,6	3	8	9	11	19	25	45
3 × 0,8	2	5	6	9	15	22	40
3 × 1,0	1	2	3	5	7	11	20

Tabelle 5.144: Zuordnung Aderleitung und Leiterquerschnitt zu Plastpanzerrohren

Plastaderleitung NYA Leiterquerschnitt	Plastpanzerrohr, Nenngröße in mm						
	9	11	13,5	16	21	29	36
mm²	max. Anzahl der Leitungen						
1,5	5	14	16	18	25	35	45
2,5	4	8	9	10	15	22	30
4,0	2	4	5	6	9	14	20
6,0	–	3	3	4	5	8	12
10,0	–	2	2	3	3	4	5
16,0	–	–	–	–	2	3	4
25,0	–	–	–	–	–	2	3
35,0	–	–	–	–	–	–	2

Tabelle 5.145: Biegeradien, Innen- und Außendurchmesser von Plast- und Plastpanzerrohren

Innendurchmesser in mm	Plastrohr	9	11	13,5	16	23	29	36	48
Pg	Plastpanzerrohr	12,2	15,6	17,4	18,5	24,3	33	42	–
		9	11	13,5	16	21	29	36	–
Außendurchmesser in mm	Plastrohr	12	14	16,5	20	27	33	41	54
Pg	Plastpanzerrohr	15,2	18,6	20,4	22,5	28,3	37	47	–
Biegeradius r in mm		45	55	80	100	120	155	185	210

Dabei ist ein Rohrende gleichmäßig zu erwärmen. Dieses Rohrende wird dann auf dem kalten Ende des nächsten Rohres oder auf einem entsprechenden Dorn aufgeweitet.
Es ist darauf zu achten, daß die Rohre unter Beachtung der möglichen Längenveränderung bei Temperaturschwankungen immer bis in die Einführung von Dosen, Geräten usw. hineinragen. Auf das Plastpanzerrohr ist bei seiner Einführung in Dosen, Geräte usw., die mit Schraubeinführungen versehen sind, Panzerrohrgewinde zu schneiden. Die *Befestigungsabstände bei Legung auf Putz* sind der Tabelle 5.146 zu entnehmen; es ist darauf zu achten, daß gleiche Schellenabstände eingehalten werden.

Tabelle 5.146: Befestigungsabstände (Richtwerte)

Plastrohr Nennweite mm	Plastpanzerrohr Nennweite mm	Abstand der Befestigungspunkte: gerade Rohrführung mm	vor Bögen mm	vor Dosen, Rohrenden, Geräten, Decken- und Wanddurchführungen mm
9 11 13,5 16 23	9 11 13,5 16 21	800 bei max. 40 °C nach Legung	200	150
29 36 48	29 36 –	500 bei max. 50 °C nach Legung	400	200

Für die Befestigung von Dosen und Kästen reicht der Halt im Rohrnetz nicht aus, sie sind zusätzlich am Baukörper zu befestigen. Um bei Dosen, die nur als Zugstellen für einzuziehende Leitungen und Drähte notwendig sind, die erforderlichen Arbeiten, z. B. für die Befestigung, einzusparen, können *Rohrfädelstücke* aus Installationsrohr A (gemäß Bild 5.96), die in das Rohrnetz direkt eingefügt werden, Anwendung finden. Die zugehörigen Kennwerte sind in Tabelle 5.147 enthalten.

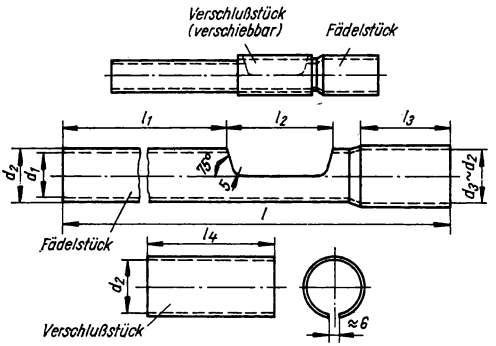


Bild 5.96. Rohrfädelstück aus Installationsrohr A mit Verschlußstück

Tabelle 5.147: Kennwerte von Rohrfädelstücken aus Installationsrohr A (Maße in mm)

Nenngröße	d_1	d_2	l ±	l_1	l_2	l_3	l_4
13,5 16	13,5 16	16,5 20	265	150	65	30	80
23 29	23 29	27 33	300	160	70	45	85
36 48	36 48	41 54	335	165	80	65	95

5.4.4.2. Stahlpanzerrohre

Rohrinstallationen mit Stahlpanzerrohr sollten nur dann vorgenommen werden, wenn andere Rohrarten den mechanischen Beanspruchungen nicht genügen. Stahlpanzerrohre sind an beiden Rohrenden mit *Gewinde* versehen; die Gewindelänge beträgt die Hälfte der Muffenlänge. Zum *Einziehen der Leitungen* bzw. Drähte sind etwa alle 9 m einschl. zwei 90°-Bögen sog. Fädelkästen in den Rohrstrang einzufügen. Diese Fädelkästen sowie Abzweigdosen und Abzweigkästen brauchen nicht am Baukörper befestigt zu werden, wohl aber Steckdosen, Schalter usw. Außer diesem Zubehör stehen noch Winkelstücke, die anstelle von Bögen verwendet werden können, sowie T-Abzweigstücke und Reduzierstücke, z. B. von Pg 21 auf Pg 16, zur Verfügung. Beim Trennen und Gewindeschneiden ist streng darauf zu achten, daß jeglicher Grat an den Rohrenden entfernt wird, damit die Leiterisolation nicht beschädigt wird. Tabelle 5.148 enthält Richtwerte der Befestigungsabstände.

Tabelle 5.148: Befestigungsabstände (Richtwerte)

Stahlpanzerrohr Pg Nennweite mm	Abstand der Befestigungspunkte in mm: gerade Rohrführung	vor Bögen	vor Dosen, Geräten, Winkelstücken, Rohrenden, Decken- und Wanddurchführungen
11 13,5 16 21	1000	200	150
29 36	1500	400	200

Tabelle 5.149: Zuordnung Aderleitung und Leiterquerschnitt zu Stahlpanzerrohren

Plastaderleitung NYA Leiterquerschnitt	Stahlpanzerrohre, Nenngröße in mm: 11	13,5	16	21	29	36
mm²	max. Anzahl der Leitungen					
1,5	9	13	16	25	34	43
2,5	6	7	9	14	20	28
4	3	4	5	9	14	20
6	2	3	4	5	8	12
10	–	–	2	3	4	5
16	–	–	–	2	3	4
25	–	–	–	–	2	3
35	–	–	–	–	–	2

Tabelle 5.150: Zuordnung Schaltdraht und Leiterdurchmesser zu Stahlpanzerrohren

Plastschaltdraht Y Aderanzahl × Leiterdurchmesser	Stahlpanzerrohre, Nenngröße in mm: 11	13,5	16	21	29
mm	max. Anzahl der Drähte				
1 × 0,6	26	30	40	65	80
1 × 0,8	14	20	30	50	60
1 × 1,0	10	12	15	24	40
2 × 0,6	11	10	12	22	30
2 × 0,8	6	5	9	17	23
2 × 1,0	4	4	7	12	15
3 × 0,6	8	6	9	15	20
3 × 0,8	4	4	7	12	18
3 × 1,0	3	3	4	6	6

Die in den Tabellen 5.149 und 5.150 aufgeführte Anzahl der Schaltdrähte oder Aderleitungen gilt für eine Rohrstrecke bis zu 9 m und zwei 90°-Bögen oder einen Etagenbogen. Sie stellen Richtwerte dar; für nicht aufgeführte Leitungen oder Drähte gelten sie sinngemäß entsprechend ihrem Außendurchmesser. Für verschiedene Stahlpanzerrohre sind Kennwerte in Tabelle 5.151 angegeben.

Tabelle 5.151: Kennwerte der Stahlpanzerrohre (Maße in mm)

Stahlpanzerrohr Pg	11	13,5	16	21	29	36
Innendurchmesser	16,4	18,0	19,9	25,5	34,2	44,0
Außendurchmesser	18,6	20,4	22,5	28,3	37,0	47,0
Durchgangsloch	19	21	23	29	38	48
Bohrerdurchmesser für Gewinde in Stahl	17,5	19,5	21,5	27,0	35,5	45,5
Muffenlänge	30	30	35	40	44	54

5.5. Lichttechnische Anlagen

5.5.1. Fotometrische Größen und Einheiten

Lichtquellen sind Einrichtungen (Lampen), mit denen eine Energieform in Lichtenergie umgesetzt werden kann. Die Lampen werden nach ihrer aufgenommenen Leistung beurteilt.

Lichttechnische Größen beschreiben i. allg. die Wirkung auf das menschliche Auge. Hierbei ist die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges (vgl. 5.5.2.) zu berücksichtigen. Alle darauf bezogenen Größen werden deshalb mit dem Index v (visuell) gekennzeichnet, im Unterschied zu den energetischen Größen (Index e) bei physikalischen Vorgängen.

Lichtstärke I_v: Grundeinheit Candela (cd). 1 cd ist die Lichtstärke, die ein schwarzer Körper der Fläche 1/600000 m² ausstrahlt, wenn er bei Erstarrungstemperatur des Platins (2042 K) und einem Druck von 101325 Pa betrieben wird.

Leuchtdichte L_v: Grundeinheit Candela je Quadratmeter (cd/m²).
1 cd/m² ist die Leuchtdichte einer Fläche, die senkrecht zu dieser Fläche mit der Lichtstärke von 1 cd leuchtet. Wird die Leuchtdichte abweichend von der Senkrechten dieser Fläche A angegeben, so ergibt sich

$$L_{v\varepsilon} = \frac{I_{v\varepsilon}}{A \cdot \cos \varepsilon}$$

ε Winkel zwischen Flächennormale und Strahlungsrichtung.
Die Leuchtdichte ist die Größe, die für den Helligkeitseindruck im menschlichen Auge maßgeblich ist.

Lichtstrom Φ_v: Grundeinheit Lumen (lm).
1 lm ist der Lichtstrom, den eine punktförmige Lichtquelle der Lichtstärke 1 cd gleichmäßig in den Raumwinkel 1 sr aussendet.
Der Lichtstrom einer Leuchte ist in verschiedenen Richtungen verschieden groß. Deshalb werden Lichtstromverteilungskurven für Leuchten angegeben.

Raumwinkel Ω: Grundeinheit Steradiant (sr).
1 sr ist der Raumwinkel, der von einer vom Mittelpunkt einer Kugel ausgehenden Strahlenschar gebildet wird, die auf der Oberfläche dieser Kugel eine Fläche von der Größe eines Quadrates mit der Seitenlänge r (Kugelradius) ausscheidet.
Achtung! Bei kreisförmiger Begrenzungsfläche auf der Kugeloberfläche ist der Zahlenwert des Raumwinkels nicht identisch mit dem Öffnungswinkel des geschnittenen Kreiskegels (Raumwinkel einer Kugel = 12,56 sr).

Lichtausbeute η: Einheit Lumen je Watt (lm/W).
Der Lichtstrom einer Lichtquelle ist die von ihr abgestrahlte Lichtleistung. Setzt man diese Lichtleistung in das Verhältnis zur aufgenommenen Leistung, ergibt sich die Lichtausbeute, der Wirkungsgrad der Lampe zu

$$\eta = \frac{\Phi_v}{P} \quad \text{in lm/W}$$

Beispiel: Eine 200-Watt-Lampe emittiert einen Lichtstrom von 2920 lm.

$$\eta = \frac{2920 \text{ lm}}{200 \text{ W}} = 14{,}6 \text{ lm/W}$$

Der theoretisch mögliche Grenzwert der Lichtausbeute liegt bei 225 lm/W für Licht, an dem alle Spektralfarben beteiligt sind.

Beleuchtungsstärke E: Grundeinheit Lux (lx).
1 lx wird erreicht bei der gleichmäßigen Bestrahlung eines Lichtstromes von 1 lm auf eine Fläche von 1 m² (Flächenlichtstrom-Dichte).
Zur Bewertung der Qualität einer Beleuchtungsanlage sind noch folgende Größen und Faktoren von Bedeutung:

Mittlere Beleuchtungsstärke E_m und *minimale Beleuchtungsstärke E_{min}* auf der Arbeits- oder Gebrauchsfläche: Die Beleuchtungsstärkewerte sind entsprechend den verschiedenen Lichtstromdichten innerhalb eines größeren Raumwinkels verschieden. Das Verhältnis des gesamten die Fläche treffenden Lichtstromes zur Flächengröße stellt daher die mittlere Beleuchtungsstärke der Fläche dar, um die die Beleuchtungsstärken der Flächenteile nach oben und unten schwanken. Je kleiner die Fläche wird, um so geringer werden diese Schwankungen. Auf einer kleinen punktförmigen Fläche sind Unterschiede praktisch nicht mehr möglich.
Es ist gleichgültig, ob der Lichtstrom von einer oder mehreren Leuchten geliefert wird.

Örtliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke $E_{min} : E_m$.
Bei Allgemeinbeleuchtung soll dieses Verhältnis den Wert 1:2, bei Arbeitsplätzen gleicher Sehaufgaben innerhalb eines Raumes oder einer Raumzone 1:1,25, bei Verkehrszonen 1:3 nicht unterschreiten.

Leuchtenwirkungsgrad η_L ist das Verhältnis des Lichtstromes einer betriebsmäßigen Lampenausrüstung zu dem der Lampe.

Beispiel: Eine 200-W-Lampe liefert einen Lichtstrom von 2920 lm; dieselbe Lampe mit Leuchte 2320 lm.

$$\eta_L = \frac{2320 \text{ lm}}{2920 \text{ lm}} = 0{,}795$$

Zum Vergleich des Wirkungsgrades verschiedener Leuchten sind zusätzliche Angaben über Art der Leuchte, ihre Lichtverteilung und deren Leuchtdichte zu machen.

Raumwirkungsgrad η_R: Praktisch wird der von der Leuchte gelieferte Lichtstrom nicht vollständig auf die zu beleuchtende Fläche auftreffen. Der auf die Fläche auftreffende Teil heißt *Nutzlichtstrom Φ_N*; er ist das Produkt aus der mittleren Beleuchtungsstärke in lx und der Meßfläche in m². Der Raumwirkungsgrad η_R für eine Fläche ist das Verhältnis des Nutzlichtstromes zu dem von der Leuchte gelieferten Lichtstrom.

Beleuchtungswirkungsgrad η_B in einem Raum ist das Verhältnis des Nutzlichtstromes Φ_N auf der zu beleuchtenden Fläche zum gesamten Lichtstrom Φ_v der Lichtquelle:

$$\eta_B = \eta_L \cdot \eta_R$$

Tabelle 5.152: Übersicht zu fotometrischen Größen, Einheiten

Größe	Einheit		Formelzeichen	Beziehung
Lichtstärke	Candela	(cd)	I	–
Leuchtdichte	$\frac{\text{Candela}}{\text{m}^2}$	$\frac{(\text{cd})}{(\text{m}^2)}$	L	$L_v = \frac{I_{v\varepsilon}}{A \cdot \cos \varepsilon}$
Lichtstrom	Lumen	(lm)	Φ	$\Phi_v = I_v \cdot \Omega$
Lichtausbeute	Lumen /Watt	(lm/W)	η	$\eta = \frac{\Phi_v}{P}$
Beleuchtungsstärke	Lux	(lx)	E	$E_v = \frac{\Phi_v}{A}$
Örtliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke	–	–	g	$g = E_{min} : E_m$
Beleuchtungswirkungsgrad	–	–	η_B	$\eta_B = \eta_L \cdot \eta_R$

Lebens- und Nutzbrenndauer

Die Lebens- und die Nutzbrenndauer betragen bei den heutigen Glühlampen etwa 1/4 derjenigen von Gasentladungslampen. Als Lebensdauer bezeichnet man die Dauer der Betriebsfähigkeit (z. B. begrenzt durch Fadenbruch), als Nutzbrenndauer die Zeit, in der der Lichtstrom um 20···25% seines Anfangswertes abgenommen hat.
Tabelle 5.152 gibt einen zusammenfassenden Überblick über fotometrische Größen und Einheiten.

5.5.2. Physiologische Optik

Licht besitzt zwei Eigenschaften, und zwar *Welleneigenschaften* und *korpuskulare Eigenschaften*. Bei Prozessen, bei denen Licht in Energieaustausch mit der Materie tritt, lassen sich seine Eigenschaften nur mittels Korpuskeln erklären, während bei der Lichtausbreitung ohne Energieaustausch mit der Materie das Licht sich als elektromagnetische Transversalwelle darbietet.
Der Bereich der Wellenlängen zwischen 390 nm und 770 nm ist für das menschliche Auge sichtbar. Dieser Bereich wird als *Licht* bezeichnet. Das menschliche Auge nimmt jede Wellenlänge innerhalb dieses Bereiches als *Farbe* wahr. Tabelle 5.153 gibt die Farbempfindungen des menschlichen Auges wieder.

Tabelle 5.153: Wellenlängen und Farben des sichtbaren Lichtes

Farbe	Wellenlänge nm	Bemerkung
Ultraviolett	4···390	unsichtbar
Violett	390···430	sichtbar, energiereich
Blau	430···490	sichtbar
Grün	490···570	sichtbar
Gelb	570···600	sichtbar
Rot	600···770	sichtbar, energieärmer
Infrarot	770···400 000	unsichtbar, Wärmeempfindung

Treten alle Wellenlängen zwischen 390 nm und 770 nm gleichzeitig in das menschliche Auge ein, verursachen sie die Farbempfindung *weiß*. Das Auge ist nicht für alle Farben des sichtbaren Spektrums gleich empfindlich. Am empfindlichsten ist das menschliche Auge für grüngelbes Licht (Nebellampen). Bild 5.97 gibt die *spektrale Hellempfindlichkeit* für ein helladaptiertes (angepaßtes) und für ein dunkeladaptiertes Auge an.
Das menschliche Auge ist nicht nur empfindlich für die spektrale Hellempfindlichkeit, sondern auch für den *Leuchtdichteunterschied* zweier benachbarter Flächen (*Kontrastwirkung*). Der Kontrast spielt für das Erkennungsvermögen eine wichtige Rolle und muß neben einer ausreichenden Beleuchtungsstärke berücksichtigt werden. Die Unterschiedsempfindlichkeit (Kontrastempfindlichkeit) des menschlichen Auges ist im Bild 5.98 in Abhängigkeit von der Leuchtdichte angegeben. Es ist zu erkennen, daß die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges bei einer Leuchtdichte zwischen 60 cd/m² und $3 \cdot 10^3$ cd/m² konstant und am größten ist.

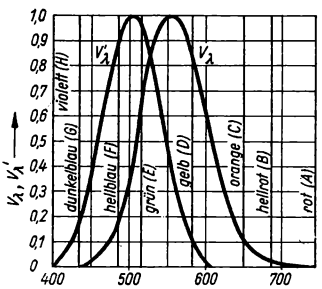


Bild 5.97. Relative spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges bei helladaptiertem Auge (V_λ) und bei dunkeladaptiertem Auge (V'_λ) über der Wellenlänge

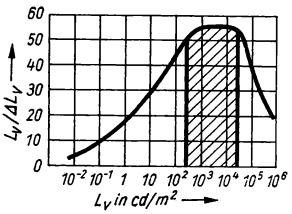


Bild 5.98. Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges über der Leuchtdichte

Tabelle 5.154: Ausgewählte Leuchtdichteunterschiede

Fläche 1	Fläche 2	Leuchtdichteunterschied cd/m²
Schwarzer Druck	sehr weißes Papier	$3{,}0 \cdot 10^5$
Tusche	Zeichenpapier	$1{,}8 \cdot 10^5$
Druck	Zeitungspapier	$1{,}4 \cdot 10^5$
Tinte	Schreibpapier	$1{,}0 \cdot 10^5$
Bleistift Nr. 2	Zeichenpapier	$0{,}3 \cdot 10^4$

Tabelle 5.154 gibt die Unterschiedsempfindlichkeit für einige Verhältnisse an.
Ausgedehnte Flächen, scharfe Trennungslinien und einfache Flächenformen beeinflussen die Unterschiedsempfindlichkeit günstig. Diese Empfindlichkeit ist für das menschliche Auge unabhängig von der Farbe.
Blendung ist Verminderung der Sehleistung durch zu starke Leuchtdichteunterschiede (Überstrahlung, Relativblendung). Ist die Leuchtdichte einer Fläche so groß, daß die Adaptionsfähigkeit (Anpassungsfähigkeit) überschritten ist, tritt Absolutblendung ein. Blendwirkung kann auch eintreten, wenn die Adaption länger dauert als eine genügend große zeitliche Änderung der Leuchtdichte (Adaptionsblendung).
Lichtquellen und auch rückstrahlende Flächen können zu einer Form der Blendung führen. Blendung beeinträchtigt das menschliche Leistungsvermögen und ist zu vermeiden.

5.5.3. Lichterzeugungstechnik

Licht ist eine Erscheinungsform der *Energie*.
Diese Energie E ist

$$E = h \frac{c_0}{\lambda}$$

h PLANCKsches Wirkungsquantum ($h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J · s),
c Lichtgeschwindigkeit ($c_0 = 2{,}998 \cdot 10^8$ m/s),
λ Wellenlänge des Lichtes.

Diese Gleichung besagt, daß kurzwelligeres Licht stets energiereicher als langwelligeres ist. Demzufolge ist z. B. rotes Licht energieärmer als blaues, violettes oder gar ultraviolettes.
Zur Erzeugung energiereichen Lichtes ist auch eine größere Energiemenge nötig als zur Erzeugung energieärmeren Lichtes. Die nachfolgend beschriebenen Lichtquellen benutzen Elektroenergie zur Lichterzeugung.
Tabelle 5.155 gibt nach TGL 200-8462 die zulässigen Nennstromstärken für elektrische Lampen an.

5.5.3.1. Glühlampen

Wird ein elektrischer Leiter durch elektrischen Strom bei einer genügend hohen Temperatur zum Glühen gebracht, wird Licht abgestrahlt. Für die *Gesamtstrahlungsenergie* W im sichtbaren und unsichtbaren Bereich gilt

$$W \sim T^4$$

T absolute Temperatur in K.

Wird z. B. die Temperatur des Fadens einer Glühlampe verdoppelt, steigt die abgestrahlte Gesamtenergie auf das 16fache. Aus diesem Grunde werden zur Erzielung möglichst hoher

Tabelle 5.155: Nennströme in A *für Lampen*[1])

–	◤ 0,01	◤ 0,1	◤ 1	◤ 10
–	–	–	–	10,4
–	–	◤ 0,12	1,2	–
–	–	–	1,4	–
–	–	0,15	1,5	–
–	–	◤ 0,16	◤ 1,6	–
–	–	0,17	–	–
–	–	–	1,75	–
–	–	0,18	–	–
–	◤ 0,02	◤ 0,2	–	–
–	–	0,23	2,3	–
–	◤ 0,025	◤ 0,25	◤ 2,5	–
–	–	–	2,6	–
–	–	0,27	–	–
–	–	–	2,8	–
–	◤ 0,03	0,3	–	–
–	–	◤ 0,31	–	–
–	–	0,35	–	–
–	–	0,37	3,7	–
–	◤ 0,04	◤ 0,4	◤ 4	–
–	–	0,45	–	–
◤ 0,005	◤ 0,05	◤ 0,5	◤ 5	–
–	–	0,56	–	–
–	–	0,59	5,9	–
–	◤ 0,06	◤ 0,6	–	–
–	–	0,62	–	–
–	–	◤ 0,63	–	–
–	0,07	0,7	–	–
–	◤ 0,08	◤ 0,8	–	–
–	0,085	–	8,35	–
–	0,094	0,94	–	–

[1]) Mit ◤ gekennzeichnete Nennströme entsprechen denen nach TGL RGW 780.

Temperaturen für Glühfäden Metalle mit sehr hohem Schmelzpunkt verwendet. Der Schmelzpunkt von Wolframdraht liegt bei etwa 3660 K.
Bild 5.99 gibt die Verteilung der Strahlungsenergie W eines idealen Strahlers über der Wellenlänge λ bei verschiedenen Temperaturen an. Aus Bild 5.99 wird ersichtlich, daß mit

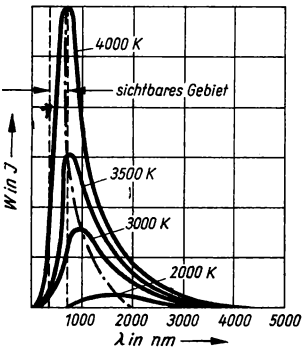


Bild 5.99. Strahlungsenergieverteilung eines schwarzen Körpers über der Wellenlänge λ bei verschiedenen Temperaturen
—·— Verschiebung des Strahlungsmaximums mit der Temperatur

steigender Temperatur das Strahlungsmaximum in den sichtbaren Bereich verschoben wird. Bei 3000 K = 2727 °C liegt das Maximum der Strahlung im Bereich des Infrarots. Glühlampenlicht enthält demzufolge auch einen hohen Rotanteil. Ein sehr großer Teil der Strahlungsenergie liegt im Bereich des Infrarots und tritt als Wärme in Erscheinung. Glühlampen strahlen daher nur etwa 10% der zugeführten Energie im sichtbaren Bereich ab (optischer Nutzeffekt = 10%). Infolge der spektralen Empfindlichkeit des Auges (vgl. Bild 5.97) werden nur etwa 3% als sichtbares Licht wahrgenommen (visueller Nutzeffekt ≈ 3%).
Bei der hohen Betriebstemperatur von Wolframfäden zur Lichterzeugung würde der Faden in Luft sofort oxydieren (verzundern). Deshalb wird der Glühfaden in evakuierten Glaskolben (Vakuumglühlampe) oder in Glaskolben mit Schutzgas aus Argon-Stickstoff oder Krypton-Stickstoff (gasgefüllte Glühlampe) betrieben. Das Schutzgas setzt die Verdampfungsgeschwindigkeit des Glühfadens herab. Damit kann eine höhere Temperatur des Fadens zugelassen werden. Die zusätzliche Kühlung des Fadens durch das Schutzgas wird durch eine einfache oder doppelte Wendelung des Fadens (Verringerung der wirksam gekühlten Fläche) ausgeglichen. Tabelle 5.156 gibt die *Lichtausbeute* verschiedener Glühlampenarten bei verschiedenen Spannungen an.

Tabelle 5.156: Kennwerte für Glühlampen

Glühlampenart	Ausführungsart in W		Temperatur	Lichtausbeute in lm/W	
	von	bis	K	bei 110 V	bei 220 V
Kohlefadenlampe	20	200	2100	3	2,9
Vakuumlampe	15	25	2500	10,3	9,0
gasgefüllte Lampe	25	150	2800	15,5	13,8
Hochleistungslampe	100	2000	3200	20,8	19,3

Glühlampen gleicher Leistung mit geringerer Nennspannung haben geringfügig größere Lichtausbeute als die mit höherer Nennspannung. Glühlampen können mit Gleich- oder Wechselstrom betrieben werden. Bei Wechselstrom entstehen Lichtstromschwankungen von doppelter Netzfrequenz. Die Welligkeit dieser Schwankungen ist infolge der thermischen Trägheit des Glühfadens bei einer Glühlampe 40 W, 220 V, etwa 18%, bei 200 W, 220 V, etwa 6%. Für Glühlampen, die mit niedriger Netzfrequenz betrieben werden, werden zur Erhöhung der thermischen Trägheit und damit zur Verminderung der Lichtstromschwankungen dicke Glühfäden verwendet. Für Signal- und Reklamezwecke (z. B. Laufschrift) werden auf Grund ihrer geringen Nachleuchtdauer Lampen mit dünnen Glühfäden verwendet.
Wolfram ist ein Metall mit positivem Temperaturbeiwert (vgl. Abschn. 1.9.3.). Sein Widerstand wächst mit der Temperatur. Der Widerstand eines Glühfadens wird für den Betriebszustand bemessen. In kaltem Zustand besitzt der Faden

demzufolge nur etwa 1/10 seines Betriebswiderstands. Deshalb fließt durch eine Glühlampe beim Einschalten kurzzeitig etwa der 10fache Strom.
Die mittlere Lebensdauer einer Glühlampe beträgt 1000 h. Je 1% Überspannung nimmt diese Lebensdauer um etwa 7% ab.
In Tabelle 5.157 sind die *Nennlichtströme* von Allgebrauchslampen enthalten.

Tabelle 5.157: Nennlichtströme von Allgebrauchslampen

Nennleistung	Nennspannung in V				
	24	42	110	127	220
W	Nennlichtstrom in lm				
25	305	275	225	220	220
40	560	500	445	425	350
60	930	860	770	750	630
75	—	—	—	960	850
100	1700	1590	1420	1380	1250
150	—	—	—	2300	2090
200	—	—	3250	3200	2920
300	—	—	5100	5050	4750
500	—	—	9750	9650	8700
1000	—	—	21200	21000	20000

5.5.3.2. Gasentladung und Lumineszenz

Bei Gasentladungen bildet sich zwischen zwei Elektroden ein *Stromdurchgang durch Gase* aus. Das an sich elektrisch neutrale Gas wird ionisiert und ermöglicht somit einen Ladungstransport — ein Strom fließt. Dabei kann Licht auf drei Arten erzeugt werden, und zwar durch

1. die *Temperaturstrahlung der Elektroden,*
2. das *negative Glimmlicht,*
3. die *Strahlung der positiven Gassäule.*

Die letzten beiden Arten sind an die Strahlungserzeugung durch das Gas gebunden. Je nach Lampentyp werden 40···90% der zugeführten elektrischen Energie in Strahlungsleistung (auch außerhalb des sichtbaren Bereiches) umgewandelt. Der Rest ist notwendig, um den Ionisationszustand des Gases, die die Stromleitung gewährleistet, aufrechtzuerhalten.
Elektrisch können Gasentladungen in bestimmten Bereichen durch negative Widerstände beschrieben werden. Je größer der durch die Gasstrecke fließende Strom wird, desto kleiner wird der Spannungsabfall an der Bogenstrecke, d. h., bei konstanter Spannung würde der Strom ohne schaltungstechnische Schutzmaßnahme sehr groß sein und die Zerstörung der Lampe herbeiführen. Deshalb wird eine Strombegrenzung, und zwar bei Gleichstrom ohmscher Widerstand, bei Wechselstrom dagegen induktiver Widerstand (Drossel), vorgesehen. Der induktive Widerstand hat den Vorteil, daß der Wirkleistungsverbrauch sehr gering ist; allerdings verschlechtert sich der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ erheblich (Blindleistungskompensation s. Abschn. 1.9.7.7.).
Zur *Einleitung des Zündvorgangs* von Gasentladungen sind Spannungen notwendig, die z. T. beträchtlich über der Brennspannung und der Nennspannung des Netzes liegen. Daher sind besondere Startvorrichtungen nötig.
Bei Gasentladungen werden die Gasionen durch Zuführen von Energie in einen angeregten Zustand versetzt. Bei Rückkehr in den Grundzustand senden die Gasionen eine charakteristische Strahlung (Spektrallinien) aus.
Tabelle 5.158 gibt Auskunft über die Strahlung im sichtbaren Bereich und die dazu notwendigen *Anregungsspannungen.* Die Farbe der Strahlung ist nicht von der Stromstärke abhängig. Neben dieser Strahlung im sichtbaren Bereich tritt noch eine Strahlung im ultravioletten Bereich auf. Die Lichtausbeute dieser Lampen wird durch Umwandlung der UV-Strahlung in sichtbares Licht durch *Leuchtstoffe* erhöht.
Tabelle 5.159 enthält Leuchtstoffe, die Wellenlänge der angeregten Strahlung λ_{ab} und die Wellenlänge der abgegebenen Strahlung λ_{em}. Dabei kann gleichzeitig die Lichtfarbe der Entladungslampen den verschiedenen Bedingungen angepaßt werden.
Die Strahlungsintensität der Leuchtstoffe von Entladungslampen steigt mit dem Strom an.
Durch Mischung der Leuchtstoffe lassen sich Farbvariationen erzielen.

Tabelle 5.158: Anregungsspannungen und charakteristische Strahlung von Gasen

Gas Metalldampf		Anregungsspannung V	Sichtbares Licht
Helium	He	19,4	weißlichrosa
Neon	Ne	16,6	orangerot
Argon	Ar	11,6	bläulichgrau
Wasserstoff	H	11,1	violett
Stickstoff	N	7,9	gelb
Sauerstoff	O	6,1	
Kohlenmonoxid	CO	6,0	weiß
Quecksilber	Hg	4,7	bläulichgrün
Natrium	Na	2,1	gelb

Tabelle 5.159: Leuchtfarbe von Leuchtstoffen

Leuchtstoff	λ_{ab} nm	λ_{em} nm	Leuchtfarbe
Kalziumwolframat	220···300	310···700	hellblau
Magnesiumwolframat	220···320	360···720	bläulichweiß
Zinksilikat	220···296	460···640	lichtgrün
Zinkberylliumsilikat	220···300	480···750	gelblichweiß
Kadmiumsilikat	220···320	480···740	gelblichweiß
Kadmiumborat	220···360	520···750	karminrot

Die Elektroden können, um Elektronen zu emittieren, geheizt (Glühelektroden) oder ungeheizt (kalte Elektroden) sein. Zur Erhöhung der Emissionsfähigkeit sind die Glühelektroden mit Oxiden der Erdalkalimetalle überzogen. Gleichzeitig sind die Glühelektroden von einer Abschirmung umgeben. Diese soll das wuchtige Auftreffen von Ladungsträgern, insbesondere der massereichen Gasionen, und das rasche Zerstäuben der Glühelektroden verhindern. Glühelektroden haben einen sehr geringen Katodenfall (vgl. Abschn. 1.9.2.) von etwa 15 V und eignen sich daher besonders für Niederspannungsleuchtstofflampen. Kalte Elektroden haben einen Katodenfall von etwa 100···450 V und werden deshalb für Hochspannungsleuchtstofflampen (vorwiegend für Reklamezwecke) eingesetzt. Bild 5.100 zeigt Glüh- und kalte Elektroden.

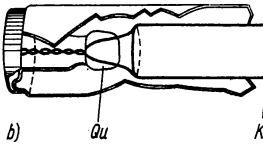


Bild 5.100. Elektroden für Leuchtstofflampen
a) Glühelektrode, b) Kaltelektrode
S Kontaktstifte, Z elektrische Anschlußdrähte, D Durchführungsdrähte, G Glühkatode, A Abschirmung, P Pumpstengel, Qu Quetschfuß, K zylindrische Katode

Niederspannungs-Leuchtstofflampe

Sie ist mit Gleich- oder Wechselstrom zu betreiben. Bei Wechselspannung tritt periodisches Zünden und Löschen mit doppelter Netzfrequenz beim Unterschreiten der Brennspannung ein. Damit ist ein ständiges Schwanken des Lichtstroms verbunden, das zu physiologischen Schädigungen führen kann. Bei der Farbe »Tageslicht« beträgt die Schwankung 52%, bei Weiß etwa 33% und bei Warmton etwa 27%.

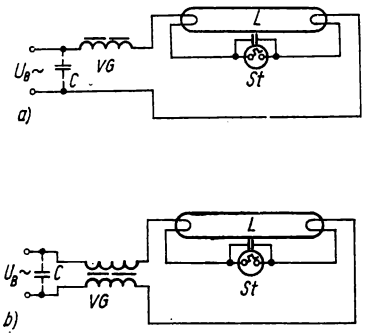


Bild 5.101. Schaltplan für Niederspannungs-Leuchtstofflampe
a) Vorschaltgerät VG mit einer Spule, b) Vorschaltgerät VG mit zwei Spulen
C Kompensationskondensator, L Leuchtstofflampe, St Starter mit Entstörkondensator

Bild 5.101 zeigt die Schaltung einer Leuchtstofflampe.
Für die Inbetriebnahme der Röhren dient ein Glimmzünder (Starter) St. Nach dem Einschalten leuchtet der Glimmzünder, der zunächst die volle Spannung erhält, sofort auf. Infolge der Erwärmung biegt sich die Bimetallelektrode durch und schließt die Entladungsstrecke kurz; der Glimmzünder ist erloschen, die Leuchtstofflampen-Elektroden werden vorgeheizt. Nach rascher Abkühlung geht die Bimetallelektrode in die Ruhelage zurück, öffnet den Stromkreis Drossel—Lampenelektroden—Glimmzünder und führt damit einen Spannungsstoß der Drossel herbei; die Lampe leuchtet auf. Während des Betriebs dient die Drossel zur Begrenzung des Lampenstroms.

Tabelle 5.160: Lebensdauerabnahme von Leuchtstofflampen mit der Temperatur

Umgebungstemperatur °C	Lebensdauerabnahme %
30	2
35	5
40	9
45	14
50	17

Tabelle 5.161: Nennlichtstrom von NS-Leuchtstofflampen

Lampentyp	Lichtfarbennummer					
	10	20	21	30	31	80, 91, 92, 93
	Nennlichtstrom lm					
LS 8	—	350	—	350	—	ohne
LS 13	—	700	—	700	—	Angabe
LS 20	850	950	—	975	—	
LS 40	2340	3000	2000	3000	1900	
LSK 40	—	3000	—	—	—	
LS 65	3570	4500	3250	4500	3100	
LSK 65	—	4500	—	—	—	
LUn 40	—	2500	1800	2500	—	
LUn 65	—	3900	—	3900	—	

LS Leuchtstofflampe in Stabform,
LSK Leuchtstofflampe in Stabform, kältefest bis −15 °C,
LU Leuchtstofflampe in U-Form,
LUn Leuchtstofflampe in U-Form mit 92 mm Schenkelabstand.

Die mittlere Lebensdauer beträgt 5000 h. Als Richtwerte für die Lebensdauerabnahme gilt: je 1% Überspannung ≙ 4% Lebensdauerabnahme, je 1% Schaltzeit ≙ 0,23% Lebensdauerabnahme. Die Lebensdauerabnahme mit steigender Temperatur gibt Tabelle 5.160 an.
Tabelle 5.161 gibt den Nennlichtstrom für verschiedene Lampenarten und Lichtfarben nach TGL 8624 an.
Die Zahl nach dem Lampentyp gibt die elektrische Leistung in Watt an.

Die Zahl der Lichtfarbe ist wie folgt gegliedert:

1. Ziffer:

1 ≙ Tageslichtweiß,
2 ≙ Weiß,
3 ≙ Warmton,
8 und 9 ≙ Sonderlichtfarben wie Blau, Grün, Rot.

2. Ziffer:

0 ≙ Farbgrundtyp,
1···9 ≙ Farbvarianten.

Die Lichtfarbe Weiß de luxe hat die Farbnummer 21, Warmton de luxe die Farbnummer 31 usw.
Die Umgebungstemperatur soll für NS-Leuchtstofflampen bei 15···30 °C (Strahlungsmaximum bei 25 °C) liegen.

Hochspannungs-Leuchtstofflampen

Dieser Lampentyp wird mit kalten Elektroden hergestellt. Der große Katodenfall bis zu 450 V hat geringere Lichtausbeute zur Folge. Deshalb sind nur verhältnismäßig lange Lampen wirtschaftlich; deren Betriebsspannungen liegen bei etwa 800 bis 1000 V.
In begrenztem Umfang ist der Lichtstrom mit der Spannung regelbar. Bei Nennbetrieb ergibt sich eine Lichtausbeute für Lampen mit Leuchtstoff je nach Typ zwischen 20 und 27 lm/W. Lampen höherer Leistung haben eine größere Lichtausbeute. Lampen ohne Leuchtstoff ergeben eine Lichtausbeute im sichtbaren Bereich von 2,5···5,5 lm/W.
Tabelle 5.162 gibt gebräuchliche Hochspannungs-Leuchtstofflampen für Beleuchtungszwecke in Stabform an.
Für Reklamezwecke kommen auch größere Lampenlängen mit entsprechend größeren Betriebsspannungen (mehrere Kilovolt) und besonderen Formen zum Einsatz.
Bild 5.102 zeigt die Schaltung von Hochspannungs-Leuchtstofflampen. Die Hochspannung wird mittels Streufeldtransforma-

Tabelle 5.162: Charakteristische Werte von HS-Leuchtstofflampen

Nutzlänge mm	Leistung W	Strom mA	Mindestlichtstrom lm	Lichtfarbe
1000	30		600	Tageslicht-
1250	35		750	weiß
1500	40	75	900	Weiß
1750	44		1050	Warmton
2000	47		1200	Sonder-
2250	50		1350	farben

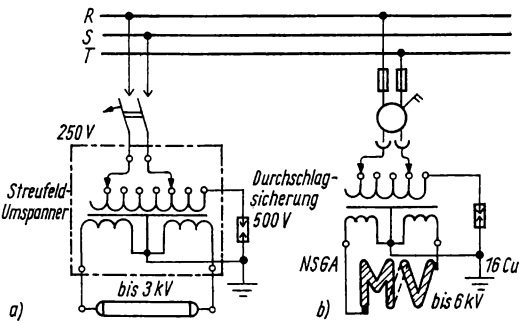


Bild 5.102. Schaltung von Hochspannungs-Leuchtstofflampen
a) Hochspannungs-Leuchtstoffröhre, b) Leuchtbuchstaben

toren erzeugt. Mittels eines verstellbaren magnetischen Nebenschlusses wird hierbei die Hochspannung den Betriebsdaten der jeweiligen Lampe oder auch denen mehrerer in Reihe geschalteter Lampen angepaßt.
Die mittlere Lebensdauer dieses Lampentyps beträgt 10000 h.

Quecksilberdampflampen, Natriumdampflampen

Hierbei handelt es sich in der Regel um Gasentladungslampen für Netzspannung von 220 V. Die äußere Form ist der der Glühlampe ähnlich. Die Lichterzeugung erfolgt in einem Quarz- oder Hartglasbrenner. Die Elektroden sind Oxidelektroden, die sich in Edelgas (Neon, Argon) befinden. Diesem Edelgas ist eine bestimmte Menge Quecksilber oder Natrium beigegeben. Nach Zündung des Brenners verdampft das Metall und führt zu einem Druckanstieg. Je nach Höhe des Betriebsdrucks werden Nieder- und Hochdrucklampen unterschieden [1,3332 bis 133,3224 Pa (0,01···1 Torr) Niederdrucklampen – s. Leuchtstofflampe –; 13,3322···1333,224 kPa (100···10000 Torr) Hochdrucklampen]. Bild 5.103 zeigt die Schaltung einer Hochdruck-Metalldampflampe. Über den Widerstand W (einige kΩ) wird im Edelgas nach dem Einschalten eine Glimmentladung eingeleitet, die zur Verdampfung des beigegebenen Metalls führt (5···10 min Einbrennzeit). In diesem Gemisch aus Edelgas und Metalldampf übernimmt der Metalldampf mit seiner geringeren Anregungsspannung die Lichtemission.

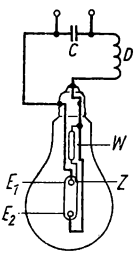


Bild 5.103. Schaltung einer Hochdruck-Metalldampflampe
E_1 und E_2 Elektroden, Z Zündelektrode, W Zündwiderstand, D Strombegrenzungsdrossel, C Kompensationskondensator

Hochdruck-Quecksilberdampflampen senden bläulichweißes Licht aus, in dem vor allem die Farben Gelb, Grün, Blau und Violett enthalten sind. Mittels Leuchtstoffs können die fehlenden Farbanteile erzeugt werden. Die Lichtausbeute liegt zwischen 35 und 45 lm/W. Hochdruck-Quecksilberdampflampen werden vor allem für Straßen-, Platz- und Industriebeleuchtung verwendet.
Tabelle 5.163 enthält die wichtigsten Daten der Hochdruck-Quecksilberdampflampen.

Natriumdampflampen senden nach der Einbrennzeit fast ausschließlich Licht mit einer Wellenlänge (monochromatisches Licht) von 589 nm in der Farbe Gelb aus.
Die Lichtausbeute liegt bei etwa 60 lm/W für Niederdrucklampen und 100 lm/W für Hochdrucklampen. Die Anwendung ist auf spektroskopische Gebiete begrenzt. Das gelbe Licht läßt zwar keine Farberkennung zu, erhöht aber wesentlich das Kontrastempfinden des menschlichen Auges.
Deshalb sind weitere Anwendungsgebiete der Natriumdampflampe bei der Prüfung von Oberflächen, bei Rißerkennungen und beim Suchen von Strukturfehlern an Prüfplätzen gegeben, neuerdings auch an verkehrsreichen Straßenkreuzungen.
Die Lebensdauer der Metalldampflampe liegt bei etwa 5000 bis 6000 h. Metalldampflampen sind in dieser Hinsicht relativ unempfindlich gegen Überspannungen bis zu etwa 10%. Nach dem Ausschalten dieser Lampen ist eine sofortige Wiedereinschaltung nicht möglich. Erst muß der Metalldampf wieder kondensieren, die Lampen müssen etwa 5···10 min abkühlen.

Spezielle Entladungslampen

Hierzu gehören Glimmlampen mit einer *Gasfüllung von Neon-Helium* bei etwa 1,333 kPa (10 Torr). Die Drahtelektroden sind kalt. Zu ihrem Betrieb ist ein Vorwiderstand von einigen Kiloohm notwendig, der oft im Sockel untergebracht ist. Der gesamte Lichtstrom beträgt etwa 1 lm. Dieser geringe Wert läßt den Einsatz dieser Lampen nur für Signalzwecke zu, z. B. Signalisierung des Schaltzustands eines Geräts, oder zu Zwecken der Spannungssuche. Früher wurden sie auch zur Erzeugung von Kippschwingungen infolge der unterschiedlichen Werte von Zünd- und Brennspannung verwendet. Spezielle Glimmlampen zeigen in einem definierten Strombereich eine sehr geringe Abhängigkeit der Brennspannung. Deshalb werden solche Glimmlampen als Spannungsstabilisatoren verwendet.

Kohlebogenlampen sind ebenfalls Gasentladungslampen. Allerdings kommt hier noch die Lichtemission durch den sich auf der positiven Kohle ausbildenden Krater mit einer Farbtemperatur von 4200 K hinzu. Die Lichtausbeute bei der Reinkohlebogenlampe beträgt etwa 7···12 lm/W. Zur Erhöhung dieses Wertes werden den Kohleelektroden Leuchtsatzzusätze beigemischt (Effektkohlen). Die damit erreichbaren Werte liegen bei 30 lm/W. Die Anwendung der Kohlebogenlampe ist auf Foto- und Kinozwecke beschränkt. Für den Betrieb der Kohlebogenlampen sind ebenfalls Vorwiderstände oder Drosseln nötig. Gegebenenfalls können Umformer mit fallender Charakteristik verwendet werden.
In neuerer Zeit werden wieder *Mischlichtlampen* (Gasentladungs- und Glühlampe) in einem gemeinsamen Glaskolben hergestellt. Die Glühwendel dient gleichzeitig der Strombegrenzung. Damit entfallen Vorschaltgerät und Blindleistungskompensation. Die Anschaffungskosten sind gering.

Tabelle 5.163: Charakteristische Werte von Quecksilberdampflampen

Lampenart	Kurzzeichen nach TGL 12220	Standard TGL	Nennleistungsaufnahme ohne Vorschaltgerät W	Nennlichtstrom[1] lm	Sockel	Abmessungen Größtmaße Durchmesser mm	Abmessungen Größtmaße Länge mm
Quecksilberhochdrucklampen ohne Leuchtstoff	HQA	9563	80	3000	E 27/30	70	150
			125	5250		75	165
			250	11500	E 40/45	120	250
Quecksilberhochdrucklampen mit Leuchtstoff	HQL		400	20500		120	290
			1000	52500		160	375
Quecksilberhochdrucklampen mit reflektierender Schicht	HQR		400	18500		180	300
Quecksilberhöchstdrucklampen	HBO	200-8120	50	1700	–	12	46
			100	2000		26	72
			200	9500		42	102
			500	22000		50	175

[1]) für Farbe s (silberweiß)

5.5.3.3. Kondensatorlampen

Kondensatorlampen nutzen den Effekt der *Elektrolumineszenz*, bei dem im elektrischen Feld eines Kondensators im Dielektrikum elektrische Energie in Strahlung umgewandelt wird. Bild 5.104 zeigt den Aufbau einer Kondensatorlampe. Auf eine Glasplatte A ist eine sehr dünne, lichtdurchlässige, elektrisch leitende Zinnoxid-Schicht B aufgebracht. Die Gegenelektrode F wird von einem metallischen Leiter gebildet. Dazwischen befinden sich eine lumineszierende Schicht sowie eine Leuchtstoffschicht C, die unsichtbare Strahlung in sichtbare umwandelt. Die Art des Leuchtstoffs D bestimmt die Farbe des sichtbaren Lichtes. Zusätzlich ist eine Isolierschicht E vorhanden, die gleichzeitig die Aufgabe eines Reflektors durch eingebettete weiße Farbstoffe übernimmt. G ist eine Glasplatte.
Tabelle 5.164 gibt die wichtigsten Kennwerte dieses Lampentyps an.
Bild 5.105 gibt die Anschaltung an das Netz an.
Der Schutzwiderstand liegt zwischen 2 und 20 kΩ.
Die Abhängigkeit der Leuchtdichte L_V und der aufgenommenen Leistung von der Lampenspannung U gibt Bild 5.106

Tabelle 5.164: Charakteristische Werte von Kondensatorlampen

Kennwerte	Lichtfarbe		
	grün	blau	gelborange
Spannung in V	220	220	220
Frequenz in Hz	50	50	50
Leistung je cm² in W	1,2	1,0	2,0
Kapazität je cm² in pF	150	150	150
Leuchtdichte in cd · m⁻²	5···7	1···2	1···2

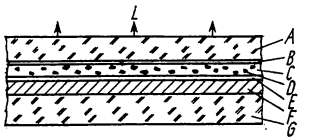


Bild 5.104. Prinzipieller Aufbau einer Kondensatorlampe
L Lichtaustritt

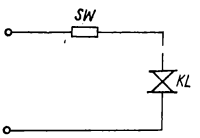


Bild 5.105. Schaltung einer Kondensatorlampe
SW Schutzwiderstand, KL Kondensatorlampe

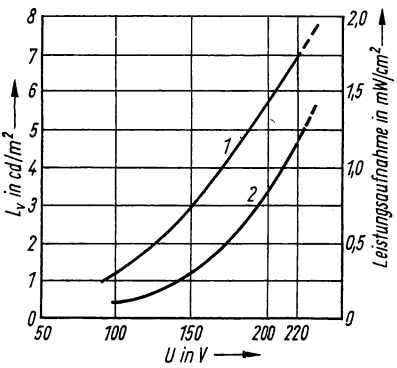


Bild 5.106. Leuchtdichte L_V (1) und aufgenommene Leistung (2) einer Kondensatorlampe in Abhängigkeit von der Spannung U bei 50 Hz

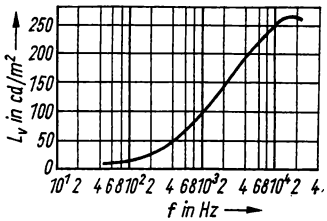


Bild 5.107. Leuchtdichte L_V einer Kondensatorlampe in Abhängigkeit von der Frequenz f der angelegten Spannung

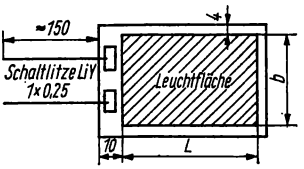


Bild 5.108. Form einer Kondensatorlampe

an. Bei Spannungen über 240 V sind Durchschläge zu erwarten.
Bild 5.107 zeigt die Abhängigkeit der Leuchtdichte bei Nennspannung von der Frequenz. Jedoch nimmt der energetische Wirkungsgrad bei höheren Frequenzen durch erhöhte dielektrische Verluste ab.
Die Nutzlebensdauer von Kondensatorlampen beträgt bei 20 °C mehr als 10000 h. Bei erhöhter Umgebungstemperatur sinkt die Lebensdauer, z. B. bei 50 °C auf 2000 h. Bei −10 °C ist die Lebensdauer praktisch unbegrenzt.
Die niedrigen Leuchtdichten der Kondensatorlampen führen zu Anwendungen, bei denen eine niedrige Beleuchtungsstärke für das Umfeld ausreicht, z. B. Skalen für Meßinstrumente, Zifferblätter für Uhren, Orientierungsbeleuchtung für Kinos und Theater, Beleuchtung von Hausnummernschildern, Ziffernanzeige in digitalen Anzeigeeinheiten.
Bild 5.108 zeigt die Ausführungsform der Kondensatorlampe, und Tabelle 5.165 gibt Vorzugsabmessungen des Leuchtfelds dazu an.

Tabelle 5.165: Maße für Leuchtflächen von Kondensatorlampen

Form	L in mm	b in mm
Quadratisch	36	42
	86	92
	136	142
	186	192
Rechteckig	61	42
	86	42
	136	42
	186	42
	86	67
	136	67
	186	67
	136	92
	186	92
	186	142

5.5.4. Beleuchtungstechnik

Intermittieren des Lichtes oder Licht mit ungünstigen Wellenlängen wirkt bei längerer Einflußdauer ungünstig auf das vegetative Nervensystem. Erschöpfung und Ermüdung sind die Folgen. Die Beeinflussung des Kreislaufs zeigt sich dabei durch Veränderung des Blutdrucks. Diese psychologischen Einflüsse auf den Menschen sind bei der Auswahl der Lampen und der Beleuchtungstechnik zu berücksichtigen.

Die künstliche Beleuchtung muß hygienischen Forderungen genügen, wirtschaftlich sein und der Raumwirkung dienen. Nur *gute Beleuchtung* schafft günstige Sehbedingungen, vermindert Ermüdung der Augen, fördert und erhält das physische und psychische Wohlbefinden und damit Lebensfreude und Lebenskraft des Menschen.
Einen Vergleich der Kosten für die Lichtmenge 1 Megalumenstunde (Mlm · h) verschiedener Lampenarten zeigt Tabelle 5.166.

Tabelle 5.166: Betriebskosten für einige Lampenarten

Lampentyp		Kosten M/Mlm · h
Leuchtstofflampe	65 W	2,18
Leuchtstofflampe	40 W	2,40
HQ-Lampe	250 W	2,86
Glühlampe	200 W	7,65
Glühlampe	100 W	8,37
Glühlampe	60 W	9,15

Eine rationelle Energieanwendung ist nur mit Leuchtstoff- und Quecksilberhochdrucklampen gegeben.

5.5.4.1. Beleuchtungsstärke

Für optimale Leistungen sind in Innenräumen Beleuchtungsstärken zwischen 1500 und 5000 lx notwendig.
Die Beleuchtung gilt als ausreichend, wenn die mittlere Beleuchtungsstärke in Innenräumen etwa 0,85 m über dem Fußboden oder auf Straßen bis 0,2 m über der Fahrbahn die in den Tabellen 5.167 und 5.168 angegebenen Werte erreicht.

Tabelle 5.167: Beleuchtungsstärken für Innenräume

Arbeitskategorie	Allgemeinbeleuchtung lx	Arbeitsplatzbeleuchtung lx	Größe des kleinsten Sehobjektes mm
I	1500 3000	3000 6000	0,1
II	500 1500	1000 3000	0,1···0,3
III	200 500	400 1000	0,3···1,0
IV	100 200	– –	1,0···10,0

Tabelle 5.168: Beleuchtungsstärken für Straßen

Maximale Zahl der Fahrzeuge je Stunde und Richtung	Beleuchtungsstärke lx
über 1000	12···24
500···1000	8···16
200···500	4···8

Nähere Einzelheiten sind in TGL 200-0617 »Beleuchtung mit künstlichem Licht« enthalten.
Die höheren Werte für Platzbeleuchtung mit zusätzlicher Allgemeinbeleuchtung sind zur Erzielung etwa gleicher Sehleistung wie bei reiner Allgemeinbeleuchtung erforderlich. In der Regel ist Allgemeinbeleuchtung von Räumen vorzuziehen. Dagegen ist Platzbeleuchtung mit zusätzlicher Allgemeinbeleuchtung bei außergewöhnlichen Ansprüchen und in den Fällen zu wählen, in denen Licht veränderbarer Richtung notwendig ist oder Arbeitsplätze unregelmäßig besetzt sind oder vereinzelte Arbeitsplätze ungünstig zum Lichteinfall der Allgemeinbeleuchtung liegen. Dunklere Gegenstände erfordern höhere Beleuchtungsstärken als hellere Gegenstände. Zur Erleichterung der Seharbeit bei alleiniger Allgemeinbeleuchtung ist anzustreben, daß das Arbeitsfeld gleiche oder größere Leuchtdichte hat als das Umfeld. Zur Erzielung eines hohen Leuchtdichteniveaus empfiehlt es sich, für Wände, Decken und Einrichtungsgegenstände helle Farben zu wählen.

5.5.4.2. Allgemeine Forderungen an die Beleuchtung

Schattenwirkung und Lichteinfall

Das Erkennen der Körperlichkeit eines Gegenstandes wird durch die Schattenbildung wesentlich unterstützt. Die Beleuchtung soll deshalb nicht schattenlos, die Tiefe der Schatten (Schattigkeit) allerdings i. allg. gering sein. In Räumen mit gut reflektierender Decke sind demgemäß Leuchten mit einem oberen Lichtstromanteil von mindestens 25% vorzusehen, um durch eine große leuchtende Deckenfläche eine Aufhellung der Schatten zu gewährleisten. In Räumen mit Oberlichtern oder dunkleren Decken lassen sich tiefe Schatten aufhellen, wenn jede Stelle im Raum Licht von mehreren Leuchten erhält. Bei der Bearbeitung kleinster Gegenstände können tiefe Schatten zur Erhöhung der Kontraste erforderlich sein. Bei weichen Schatten, d. h. bei Schatten mit allmählich verlaufenden Schattenrändern, wird die Tiefe des Kernschattens nicht so störend empfunden wie bei harten Schatten. Weiche Schatten entstehen durch Leuchten mit größerer Leuchtfläche und sind meistens erwünscht.

Örtliche Gleichmäßigkeit

Der Raum soll überall ausgeleuchtet erscheinen. Bei reiner Allgemeinbeleuchtung soll das Verhältnis der kleinsten Beleuchtungsstärke E_{min} zu der mittleren Beleuchtungsstärke E_m die in Tabelle 5.169 angegebenen Verhältnisse nicht unterschreiten.

Tabelle 5.169: Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke

Art der Ansprüche an die Beleuchtung	$E_{min}:E_m$
Sehr gering, gering	1:2,5
Mäßig, hoch, sehr hoch	1:1,5

Benachbarte Räume, die häufig abwechselnd betreten werden, dürfen keine schroffen Beleuchtungsstärke-Unterschiede aufweisen (Adaption des Auges).

Zeitliche Gleichmäßigkeit der Beleuchtung

Um Augenermüdung und andere die Wahrnehmbarkeit beeinträchtigende Folgen zu vermeiden, dürfen, von vorübergehenden unvermeidbaren Unregelmäßigkeiten abgesehen, keine mit dem Auge wahrnehmbaren Schwankungen der Beleuchtung als Folge zeitlicher Änderung der Beleuchtungsstärke auftreten. Für Beleuchtungszwecke reicht die i. allg. übliche Frequenz von 50 Hz aus. Die vorwiegend im Bahnbetrieb übliche Frequenz von $16^2/_3$ Hz ist für Beleuchtungszwecke nicht zu verwenden.
Zu starke, vom Auge nicht direkt wahrnehmbare Lichtschwankungen während der einzelnen Halbperioden des elektrischen Wechselstroms führen zu nervösen Erscheinungen bei Menschen. (Betrifft besonders Leuchtstofflampen »tageslichtweiß« bei einphasigem Anschluß.)

Blendungsfreiheit

Blendung darf weder durch Lichtquellen oder Leuchten noch durch Rückstrahlung an beleuchteten Gegenständen (Reflexblendung) hervorgerufen werden. Die Blendung hängt vor allem von der Leuchtdichte der gesehenen Fläche, von dem Verhältnis dieser Leuchtdichte zur Leuchtdichte der Umgebung oder des Hintergrundes, von der Größe der Blendungsquelle, von deren Entfernung vom Auge und von deren Lage zur Blickrichtung ab. Bei Arbeitsplatzleuchten soll die Leuchtdichte im Ausstrahlungsbereich zwischen 75° und 180° (gezählt von der Senkrechten nach unten als Nullachse) $2 \cdot 10^3$ cd/m² nicht überschreiten. Bei Raumleuchten mit indirekter, vorwiegend indirekter oder gleichförmiger Lichtverteilung soll die mittlere Leuchtdichte im Ausstrahlungsbereich zwischen 0° und 80° den Wert $4 \cdot 10^3$ cd/m² nicht überschreiten. Bei Außen-

Tabelle 5.170: Beleuchtungswirkungsgrad zur Errichtung einer Anlage

Art der Beleuchtung	Lichtausstrahlung	ϱ Decke %	70			50			30		
		ϱ Wand %	50	30	10	50	30	10	50	30	10
		K	Beleuchtungswirkungsgrad η des Raumes								
	0	1	0,20	0,17	0,15	0,20	0,17	0,15	0,20	0,17	0,14
	↑	1,2	0,24	0,20	0,17	0,23	0,20	0,17	0,23	0,20	0,17
		1,5	0,28	0,24	0,21	0,27	0,24	0,21	0,27	0,24	0,21
		2	0,33	0,30	0,27	0,33	0,30	0,27	0,32	0,29	0,27
		2,5	0,37	0,34	0,31	0,37	0,33	0,31	0,36	0,33	0,31
Direkt	75	3	0,40	0,37	0,35	0,40	0,37	0,35	0,39	0,37	0,35
		4	0,45	0,42	0,40	0,44	0,42	0,40	0,44	0,42	0,40
		5	0,48	0,46	0,44	0,47	0,45	0,44	0,47	0,45	0,44
	↓	6	0,50	0,48	0,46	0,49	0,48	0,46	0,49	0,48	0,46
		8	0,53	0,51	0,50	0,52	0,51	0,50	0,52	0,51	0,50
	75	10	0,55	0,54	0,53	0,55	0,54	0,53	0,54	0,54	0,53
	18	1	0,19	0,15	0,13	0,18	0,15	0,13	0,17	0,14	0,12
	↑	1,2	0,22	0,18	0,16	0,21	0,18	0,15	0,20	0,17	0,15
		1,5	0,26	0,22	0,20	0,24	0,21	0,19	0,23	0,20	0,18
		2	0,31	0,28	0,25	0,29	0,26	0,24	0,28	0,25	0,23
		2,5	0,35	0,32	0,29	0,33	0,30	0,28	0,31	0,29	0,27
Vorwiegend direkt	83	3	0,38	0,35	0,32	0,36	0,33	0,31	0,33	0,31	0,30
		4	0,42	0,39	0,37	0,40	0,38	0,36	0,38	0,36	0,34
		5	0,45	0,43	0,41	0,42	0,41	0,39	0,40	0,39	0,37
	↓	6	0,47	0,45	0,43	0,44	0,43	0,42	0,42	0,42	0,40
		8	0,50	0,48	0,47	0,48	0,46	0,45	0,45	0,44	0,43
	65	10	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45
	40	1	0,13	0,10	0,08	0,12	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05
	↑	1,2	0,16	0,13	0,10	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07
		1,5	0,19	0,16	0,13	0,17	0,14	0,12	0,10	0,09	0,09
		2	0,23	0,20	0,17	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,12
		2,5	0,26	0,23	0,20	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,14
Gleichförmig	83	3	0,28	0,25	0,22	0,24	0,21	0,19	0,16	0,16	0,16
		4	0,32	0,29	0,26	0,27	0,25	0,23	0,19	0,19	0,19
		5	0,34	0,31	0,29	0,30	0,27	0,25	0,22	0,21	0,21
	↓	6	0,36	0,33	0,31	0,31	0,29	0,27	0,23	0,23	0,23
		8	0,38	0,36	0,34	0,34	0,32	0,30	0,26	0,26	0,26
	43	10	0,40	0,38	0,36	0,35	0,34	0,32	0,28	0,28	0,28
	60	1	0,12	0,09	0,08	0,09	0,07	0,06	0,04	0,04	0,04
	↑	1,2	0,14	0,12	0,09	0,11	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05
		1,5	0,17	0,15	0,12	0,14	0,12	0,10	0,07	0,07	0,07
		2	0,21	0,18	0,16	0,16	0,14	0,13	0,09	0,09	0,09
		2,5	0,23	0,21	0,19	0,19	0,17	0,15	0,11	0,11	0,10
Vorwiegend indirekt	82	3	0,25	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,12	0,12	0,12
		4	0,28	0,26	0,24	0,23	0,21	0,19	0,14	0,14	0,14
		5	0,30	0,28	0,27	0,24	0,23	0,21	0,16	0,16	0,16
	↓	6	0,32	0,30	0,28	0,25	0,24	0,23	0,17	0 17	0,17
		8	0,34	0,33	0,31	0,27	0,26	0,25	0,19	0,19	0,19
	22	10	0,35	0,34	0,33	0,28	0,27	0,26	0,20	0,20	0,20
	80	1	0,11	0,09	0,07	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03
	↑	1,2	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
		1,5	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,08	0,06	0,06	0,05
		2	0,19	0,17	0,16	0,14	0,12	0,11	0,08	0,07	0,06
		2,5	0,22	0,20	0,18	0,15	0,14	0,13	0,09	0,08	0.07
Indirekt	80	3	0 24	0 22	0,20	0,17	0,15	0,14	0,10	0,09	0,08
		4	0,26	0,25	0,23	0,19	0,18	0,17	0,11	0,10	0,10
		5	0,28	0,27	0,26	0,20	0,19	0,18	0,12	0,11	0,11
	↓	6	0,29	0,28	0,27	0,21	0,20	0,19	0,12	0,12	0,11
		8	0,31	0,30	0,29	0,22	0,21	0,21	0,13	0,13	0,12
	0	10	0,32	0,31	0,30	0,23	0,22	0,22	0,13	0,13	0,13

Tabelle 5.171: Reflexionsgrad ϱ farbiger Flächen

Fläche	ϱ	Fläche	ϱ	Fläche	ϱ
Weißes Papier	0,84	Hellblau	≈ 0,45	Zinnoberrot	0,20
Aluminiumfolie	0,83	Kalkputz, grau	≈ 0,42	Grasgrün; Asphalt, trocken	≈ 0,20
Kalkweiß	0,80	Lachsrosa, Fliederlila hell	≈ 0,40	Nußbraun; Eiche, dunkel;	
Zitronengelb	0,70	Sperrholzplatten	≈ 0,38	Ziegelrot	≈ 0,18
Elfenbeinton; Cremeton	≈ 0,70	Mittlere Steinfarbe	0,35	Scharlachsatt;	
Goldgelb, rein; Strohgelb	0,60	Silbergrau	≈ 0,35	verz. Eisenblech	0,16
Hellocker	≈ 0,60	Eiche, hell	≈ 0,33	Türkisblau, rein	≈ 0,15
Sonnenton; Rötlichgelb	0,52	Gelb. Ziegel, Trockenbetongrau	≈ 0,32	Mittelbraun	0,15
Mittleres Ocker	≈ 0,52	Tiefhimmelblau	0,30	Karminrot	0,10
Chromgelb, rein	0,50	Orange, rein	≈ 0,28	Dunkler Klinker, Pfauenblau	≈ 0,10
Helles Fichtenholz; Lindgrün	0,50	Hellbraun; Olivgrün;		Asphalt naß, Tiefviolett	≈ 0,05
Pastell, Solnhofener Platte	≈ 0,50	Beige, rein	≈ 0,25		

leuchten soll die mittlere Leuchtdichte im Ausstrahlungsbereich zwischen 60° und 90° den Wert $2 \cdot 10^4$ cd/m² nicht überschreiten.

Lichtfarbe

Wo Farbwahrnehmung wie am Tage erforderlich ist, muß die spektrale Zusammensetzung des künstlichen Lichtes der des Tageslichtes möglichst gut angeglichen sein. Auch in diesen Fällen gelten die Werte der Beleuchtungsstärkentabellen 5.167 und 5.168, jedoch mit der Maßgabe, daß 250 lx nicht unterschritten werden dürfen. Durch mehr oder weniger einfarbiges Licht können Kontraste und Sehschärfe gesteigert werden.

Instandhaltung der Beleuchtungsanlage

Die Beleuchtungsstärke verringert sich während der Benutzungsdauer der Anlage ständig. Es ist daher nötig, die Beleuchtungsstärke von Zeit zu Zeit nachzuprüfen. Weicht die Beleuchtungsstärke um mehr als 30% von den im Abschn. 5.5.4.1. angegebenen Werten ab, so muß die Anlage überholt werden. Dabei ist zu beachten, daß die Abnahme der Beleuchtungsstärke durch folgende Umstände bedingt sein kann:

1. Alterung der Lampen,
2. Ausfall einzelner Lampen,
3. nicht zu beseitigende Verschmutzung der Lampen,
4. Alterung der Leuchten,
5. Rückgang des Reflexionsgrades der Raumbegrenzungsflächen,
6. zu beseitigende Verschmutzung von Lampen und Leuchten.

Einzelanforderungen

Räume mit *sehr geringen Ansprüchen* sind z. B. Flure, Nebenräume, Toiletten, Abstellräume, Keller und Böden. *Außergewöhnlich hohe Ansprüche* stellen z. B. Räume für Goldarbeiten, Edelsteinschleifen, Gravieren, Kunststopfen, Stahl- und Kupfersticharbeiten sowie Operationssäle. (Letztere müssen absolut blendungsfrei sein.)

Anpassung verschiedener Beleuchtungen aneinander

Beleuchtungen, die verschiedenen Zwecken dienen, dürfen sich gegenseitig nicht stören; so darf Straßenbeleuchtung durch Lichtreklame, Schaufensterbeleuchtung und Signallichter sowie durch Kraftfahrzeugscheinwerfer nicht so gestört werden, daß der Verkehr gefährdet wird. — Andererseits dürfen Signallichter (an Baustellen, Eisenbahnanlagen, Straßenbahnkreuzungen, Schlagbäumen usw.) durch Lampen der Straßen- und Reklamebeleuchtung in ihrer Erkennbarkeit weder beeinträchtigt werden noch mit ihnen verwechselbar sein.

Anlage

Die Verteilungsanlagen — wie Leitungen, Anschlüsse, Schalter u. dgl. — müssen sich dem Zweck der Beleuchtungsanlage unterordnen und ihre sichere und ungehinderte Benutzung gewährleisten.

Schäden

Schädlicher Ansammlung von Abgasen und störender Wärmeentwicklung durch Lichtquellen muß vorgebeugt werden.

Beginn und Schluß der Beleuchtung

An den Arbeitsstellen und Verkehrsgängen von Innenräumen muß künstliche Beleuchtung eingeschaltet werden, wenn die Tagesbeleuchtung unter die »empfohlenen Werte« dieser Leitsätze sinkt.
Bei der Beleuchtung von Verkehrsanlagen ist die künstliche Beleuchtung erforderlich:
im Winterhalbjahr von $^1/_2$ Stunde nach Sonnenuntergang bis $^1/_2$ Stunde vor Sonnenaufgang;
im Sommerhalbjahr von $^3/_4$ Stunden nach Sonnenuntergang bis $^3/_4$ Stunden vor Sonnenaufgang.
Diese Zeiten gelten für den Raum Berlin. Im Süden der DDR ist die künstliche Beleuchtung etwas früher ein- und etwas später auszuschalten, im Norden der DDR umgekehrt. Auf die jeweiligen besonderen meteorologischen Verhältnisse (Nebel, starke Bewölkung, Unwetter usw.) ist Rücksicht zu nehmen.

5.5.4.3. Beleuchtung geschlossener Räume mit reflektierenden Decken und Wänden

Die mittlere Beleuchtungsstärke E_m auf der Meßebene 0,85 m über der Bodenfläche setzt sich in einem geschlossenen Raum mit reflektierenden Decken und Wänden zusammen aus der Beleuchtungsstärke, die von dem direkt von der Lichtquelle auf die Meßebene ausgestrahlten Lichtstrom hervorgerufen wird, und dem auf die Meßebene fallenden, von den Decken und Wänden reflektierten Lichtstrom. Da die Leuchten i. allg. groß sind im Verhältnis zu ihrem Abstand von der Meßebene, so daß das quadratische Entfernungsgesetz nicht gilt, ist die Berechnung des direkten Anteils nicht einfach. Der reflektierte Anteil ist abhängig von der Reflexion von Decken und Wänden, von der Lichtverteilung der Leuchten und den Verhältnissen von Raumhöhe, Raumbreite und Raumlänge.
Die *Berechnung der Beleuchtung für Innenräume* kann rechnerisch nach der Wirkungsgradmethode ermittelt werden:

$$\Phi_{Ges} = \frac{E_m A}{\eta} \text{ in lm}. \qquad (1)$$

Zur Ermittlung des Beleuchtungswirkungsgrades η ist zunächst entsprechend den Raumabmessungen der Koeffizient K zu errechnen:

$$K = \frac{0{,}8 \cdot b + 0{,}2 \cdot l}{h_{Lp}} \qquad (2)$$

Φ_{Ges} Gesamtlichtstrom in lm,
E_m mittlere Beleuchtungsstärke in lx,
A Fläche in m²,
η Beleuchtungswirkungsgrad,
K Raumkoeffizient,
b Breite in m,
l Länge in m,
h_{Lp} Lichtpunkthöhe in m.

Aus der Tabelle 5.170 kann nunmehr unter Berücksicntigung der Reflexionsverhältnisse von Tabelle 5.171 der Raumwirkungsgrad η abgelesen werden. Die Auswahl der Lampen hat nach dem rechnerisch ermittelten Gesamtlichtstrom Φ_{Ges} des Raumes aus den Tabellen 5.157 und 5.161···5.163 für die gewählte Lampenart zu erfolgen.

Beispiel: Ein Büroraum, dessen Decke in Cremeton und dessen Wände in Pastellfarbe gehalten sind, soll eine vorwiegend direkte Beleuchtung durch Leuchtstofflampen erhalten. Die Abmessungen des Raumes betragen $l = 10{,}0$ m; $b = 5{,}0$ m; $h = 3{,}0$ m. Nach den erforderlichen Beleuchtungsstärken für Innenräume ergibt sich eine geforderte Beleuchtungsstärke von 250 lx. Die Lichtpunkthöhe liegt 1,5 m über dem Fußboden.
Der Raumfaktor K ergibt sich nach Formel (2):

$$K = \frac{0{,}8 \cdot 5 \text{ m} + 0{,}2 \cdot 10 \text{ m}}{1{,}5 \text{ m}} = 4.$$

Damit ist der Wirkungsgrad bei 70% Deckenreflexion und 50% Wandreflexion und vorwiegend direkter Beleuchtung 0,42. Der Gesamtlichtstrom Φ_{Ges} errechnet sich nach Formel (1):

$$\Phi_{Ges} = \frac{250 \text{ lx} \cdot 50 \text{ m}^2}{0{,}42} \approx 30000 \text{ lm}.$$

Es werden Leuchtstofflampen 65 W — TGL 8624 weiß mit einem Lichtstrom von 3840 lm gewählt, die bei 8 Lampen den oben errechneten Gesamtlichtstrom ergeben.
Die Lampen sind nacheinander auf 3 Phasen zu verteilen.

5.6. Elektrowärmeanlagen

(s. a. 1.3.4.)

Als wichtigste *Standards* sind zu beachten:

TGL 4712	Infrarot-Strahler und Strahlungskörper,
TGL 35178	Kontaktthermometer,
TGL 16562	Elektrowärmegeräte für Haushalt und ähnliche Zwecke,
TGL 0-16160	Begriffe für elektrische Thermometer,
TGL 200-3066	Einrichtungen für induktive und dielektrische HF-Wärmebehandlung im Frequenzgebiet über 10 kHz,
TGL 26759	Elektrowärmegeräte, Geräte für Raumheizung.

5.6.1. Heizarten

Bild 5.109 zeigt einige Beispiele der Heizarten.

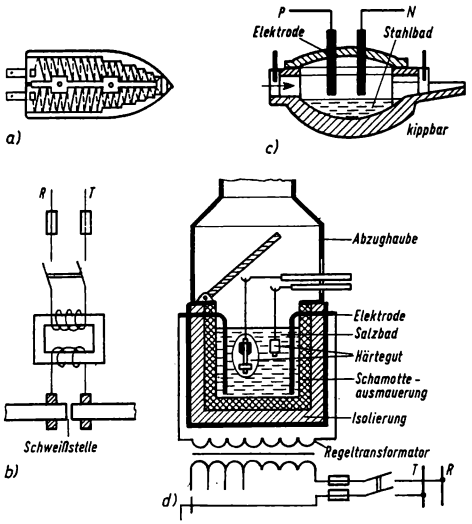


Bild 5.109. Beispiele für Heizarten
a) Bügeleisen (Widerstandsdraht zwischen Glimmer),
b) Wechselstrom-Widerstandsschweißung, c) Elektrostahlofen,
d) elektrischer Härteofen

Widerstandsheizung

Man unterscheidet:

a) Widerstandsdraht: wird durch den Strom erhitzt (1 kWh erzeugt 3600 kJ). Schnellerhitzung bei Bügeleisen, Tauchsieder, Kochtopf, Elektroherd, Nietwärmer, Lötkolbenwärmer, Dauerwasserspeicher, Speisenwärmer, Wärmekissen.
Wärmeableitung und Energieumwandlung in z. T. sichtbares Licht verursachen Wirkungsgrad von 80%. Geeignet für alle Stromarten.

b) Infrarotheizung: Strahlungskörper aus Stahl, Glas, Quarz oder keramischem Isolierstoff werden durch den Strom erhitzt. Dabei erfolgt langsamere Erwärmung als bei a). Man verwendet Hochtemperaturstrahler (Wellenlänge 1,1···1,8 μm) in Lampenform für Kückenaufzuchtgeräte, Infrarotöfen, medizinische, sanitäre und technische Zwecke, Mitteltemperaturstrahler (Wellenlänge 1,8···4,0 μm) für Raumheizung in Form von Langfeldstrahlern, Strahlungsleisten, Wandstrahlern, Hängestrahlern, Arbeitsplatzheizung, Industrie-Anlagen und -Öfen, Niedertemperaturstrahler (Wellenlänge 4···10 μm) als Strahlungsplatte zur Decken-, Wand-, Bank- und Sitzheizung, Heizkabel zur Decken- oder Fußbodenheizung. Aus Bild 5.110 können die Temperaturen eines Infrarotstrahlers entnommen werden. Tabelle 5.172 enthält den Leistungsbedarf für Infrarot-Raumheizung.

Tabelle 5.172: Leistungsbedarf für Infrarot-Raumheizung

Raumart	Strahlungsart	Leistung je m² W	Bemerkung
Wohn- und Küchenräume	diffus	200···250	stufenweise abschaltbar
Nebenräume, Toiletten, Flure, Treppen	gerichtet	100	—
Badezimmer	gerichtet	500	Hoch- und Mitteltemperaturstrahler, höchstens 1000 W Anschlußleistung

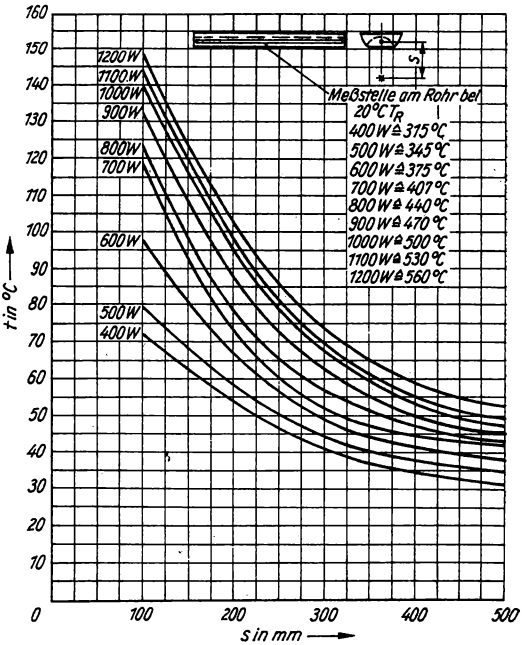


Bild 5.110. Temperaturen am Strahlrohr und in Luft bei einem Langfeld-Infrarotstrahler
s Abstand zwischen Strahlrohr und Meßstelle in der Luft,
t Temperatur in °C, T_R Raumtemperatur in °C

c) Elektrodenheizung: Widerstandsheizung bei der die zu erwärmende *Flüssigkeit* den Widerstand bildet (Wirkungsgrad = 100%). Durchlauferhitzer, Salzbad, Härtebäder, elektrisch beheizte Dampfkessel. Anwendbar nur bei Wechselstrom mit besonderem Transformator.
Die Temperaturen werden durch Umsteckvorrichtungen, Regelwiderstände, Regeltransformatoren oder Elektrodenverschiebung geregelt.

Lichtbogenheizung

Ausnutzung der hohen Lichtbogentemperatur von 3700 °C zur Schweißung von Grauguß und Stahl, zum Betrieb von Elektrostahlöfen und zur Karbiderzeugung. Zur Lichtbogenschweißung sind in besonderen Maschinen erzeugter Gleichstrom oder besondere Schweißtransformatoren erforderlich (s. Abschn. 5.7.).

Induktionsheizung

Niederfrequenz-Schmelzöfen: Eine ringförmige Schmelzrinne um den einen Schenkel eines Trafos bildet die in sich kurzgeschlossene Sekundärwicklung ($w = 1$) mit sehr hohen Strömen.

Mittelfrequenz-Schmelzöfen: In einem MF-Generator werden Ströme mit einer Frequenz von 600···2400 Hz erzeugt. Die kippbare Gießwanne ist von einer Zylinderspule umgeben, die das Schmelzgut durch Wirbelströme erhitzt. Zur induktiven Oberflächenhärtung für Zahnräder u. dgl. werden Frequenzen bis 200000 Hz verwendet. HF-Ströme fließen nur in der Werkstückoberfläche, so daß nur diese erhitzt wird (Hochfrequenz-Röhrengeneratoren). Mit steigender Frequenz nimmt die Eindringtiefe des Stromes (Wärmezone) ab.

5.6.2. Berechnungsbeispiel und Heizleiter

Die gesetzliche Einheit für die Messung der Wärmemengen ist das Joule (J), bisher die Kilokalorie (kcal). 1 kcal = 4,1868 kJ. Bezeichnet *m* (in kg) die Masse des zu erwärmenden festen, flüssigen oder gasförmigen Körpers, *c* die Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 kg dieses Körpers um 1 K zu erwärmen

Tabelle 5.173: Heizleitertemperaturen, Heizleiterwerkstoffe, Isolierstoffe bzw. Umgebung

Heizleiter-grenz-temperatur bis zu °C	Heizleiter		Isolierstoff bzw. Umgebung	Bemerkung
	Werkstoff	Klasse		
400	Neusilber 58 Cu, 22 Ni, 20 Zn	WM 30	Asbest (nur für Heizkissen) Heizmikanit	zundern über 400 °C
	Nickelin 67 Cu, 31 Ni, 2 Mn	WM 30		
	Konstantan, Rheotan 55 Cu, 45 Ni	WM 50		–
1075	stahlhaltiges Chromnickel NiCr 60 15 60 Ni, 15 Cr, 23 Fe, 2 Mn	WM 100	Heizmikanit mit 97% Glimmer (Muskowit bis 600 °C, Amber bis 900 °C), keramische Massen (kein Porzellan)	Chrom macht zunderfest, Stahl bringt Zähigkeit und höhere mechanische Festigkeit. Die zulässige Betriebstemperatur nimmt mit dem Chromgehalt zu (Höchstwert bei 30% Cr), Chrom macht aber spröde.
1150	stahlfreies Chromnickel NiCr 80 20 80 Ni, 20 Cr (Spuren von Mn und Mo)	WM 110 bis 120	Kieselgur (bis 800 °C), Steatit (Magnesiumsilikat), Siliziumkarbid, Glas, Schlacken, Emaille	
	Chrom-Aluminium-Stahl CrAl			nur in größeren Drahtdicken für Industrieöfen als Stab, Band oder Felge (nicht in Wendeln)
1250	Megapyr 65 Fe, 30 Cr, 5 Al	WM 140	Schamotte, Tonerde, BACKER-Rohr, Istrakörper (MgO)	
1150	Kanthal, 67,5 Fe, 25 Cr, 5,5 Al, 2 Co	WM 145		
950	Ferropyr, 86 Fe, 6 Cr, 8 Al	WM 120		
1150	Chromnickel NiCr 80 20	WM 100	Luft (Sauerstoff)	reine Metalle oxydieren zu stark
1250	Chrom-Aluminium-Stahl CrAl	–		
1000	Nickel	WM 10	Wasserstoff als Schutzgas, z. B. beim Blankglühen im SIEMENS-STASSINET-Ofen	–
1100	Stahl	WM 13		
1200	Chromnickel	WM 110		
1300	Chrom-Aluminium-Stahl CrAl			
1200	stahlfreies Chromnickel	WM 110	Stickstoff (Kohlenoxid und Kohlenwasserstoff)	keine Aluminiumverbindung, hoher Nickelgehalt
950	stahlhaltiges Chromnickel	WM 100	Wasserdampf, z. B. in Elektrokesseln	nur mäßiger Eisengehalt wegen der Rostgefahr
1100	stahlfreies Chromnickel	WM 110		
1000	stahlfreies Chromnickel	WM 110	schwefelfreies Leuchtgas, Wassergas, Generatorgas	–
1200	Chrom-Aluminium-Stahl	–		mit hohem Aluminiumgehalt

Über 1300 °C werden Siliziumkarbidstäbe (Silit, Globar), Molybdän (2100 °C) und Wolfram (2800 °C) verwendet.

Tabelle 5.174: Einheits-Oberflächenbelastung p in W/cm²

Grenz-temperatur des Heizleiters		p in W/cm² für die Arbeitstemperatur t_2 in °C, T_2 in K																
t_1	T_1	t_2	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
°C	K	T_2	273	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	1373	1473	1573	1673	1773
300	573		0,61	0,50	0,33	0												
400	673		1,17	1,06	0,88	0,56	0											
500	773		2,02	1,91	1,74	1,41	0,86	0										
600	873		3,31	3,20	3,04	2,70	2,14	1,29	0									
700	973		5,11	4,99	4,83	4,50	3,94	3,09	1,80	0								
800	1073		7,47	7,35	7,18	6,86	6,30	5,44	4,16	2,35	0							
900	1173		10,72	10,60	10,43	10,09	9,55	8,66	7,41	5,7	3,25	0						
1000	1273		14,93	14,82	14,65	14,21	13,74	12,86	11,63	9,8	7,47	4,22	0					
1100	1373		20,12	20,01	19,84	19,51	18,95	18,10	16,81	15,01	12,65	9,40	5,19	0				
1200	1473		26,85	26,74	26,56	26,23	25,66	24,82	23,54	21,74	19,38	16,13	11,92	6,73	0			
1300	1573		34,78	34,67	34,49	34,16	33,61	32,75	31,47	29,67	27,31	24,06	19,85	14,66	7,93	0		
1400	1673		44,69	44,58	44,40	44,07	43,52	42,66	41,38	39,58	37,22	33,97	29,76	24,57	17,84	9,91	0	
1500	1773		56,26	56,15	55,97	55,64	55,09	54,24	52,95	51,15	48,97	45,54	41,33	36,14	29,41	21,48	11,57	0

(spezifische Wärmekapazität des Körpers), t_1 die Anfangstemperatur in °C und t_2 die Endtemperatur in °C, so ist die erforderliche Wärmemenge:

$Q = mc(t_2 - t_1)$ in kJ.

Werte von c s. Tabelle 1.46 [für Wasser ist $c = 4{,}19$ kJ/(kg·K)]. Für die in Tabelle 5.173 enthaltenen Isolierstoffe und Grenztemperaturen gelten die gleichen Einheits-Oberflächenbelastungen und Grenztemperaturen wie in Tabelle 5.174. Für Glimmerisolation ist $p = 5 \cdots 10$ W/cm².

Beispiel 1: Um 2 kg Wasser von 12 °C auf 90 °C zu erwärmen, sind $Q = 2 \cdot 4{,}19\ (90 - 12)$ kJ $= 8{,}38 \cdot 78$ kJ $= 653$ kJ nötig. Um die gleiche Masse Maschinenöl um die gleiche Temperatur zu erwärmen, sind nur $Q = 2 \cdot 1{,}67\ (90 - 12)$ kJ $= 260{,}5$ kJ nötig. Der *Wärmeinhalt* von 1 kW·h = 3600 kJ. Ein Kilojoule (kJ) wird mit $1 : 3600$ kW·h $\approx 0{,}278 \cdot 10^{-3}$ kW·h erzeugt.

Aus den Formeln ergeben sich:

1. die für eine erforderliche Wärmemenge (Q in kJ) aufzuwendende elektrische Arbeit $W = Q : 3600 \approx 0{,}278 \cdot 10^{-3} Q$ in kW·h $\approx 0{,}278\, Q$ in W·h oder $\approx 1000\, Q$ in W·s;
2. der Anschlußwert (P in kW)

$$P = \frac{W}{t_h} = \frac{Q}{3600 t_h} \quad (t_h \text{ Heizzeit in h}),$$

$$P = \frac{W \cdot 60}{t_{min}} = \frac{Q}{60 t_{min}} \quad (t_{min} \text{ Heizzeit in min}),$$

$$P = \frac{W \cdot 3600}{t_s} = \frac{Q}{t_s} \quad (t_s \text{ Heizzeit in s}).$$

Bei Hausgeräten sind die Heizzeit in Minuten (t_{min}), der Anschlußwert (P) in Watt und der Verbrauch (A) in kW·h üblich; daher

$$P = \frac{60000 W}{t_{min}} = \frac{16{,}7 Q}{t_{min}} \text{ in W}.$$

Beispiel 2: Die 2 kg Wasser des Beispiels 1 erforderten 653 kJ. Das widerstandsbeheizte Elektrowärmegerät (Kochtopf) habe einen Wirkungsgrad von 80%; dann sind $Q = 653$ kJ : 0,8 $= 816$ kJ zuzuführen oder eine elektrische Arbeit $W = Q : 3600 = 816 : 3600$ kW·h $= 0{,}227$ kW·h.
Das Wasser soll in 20 min erwärmt sein; der Anschlußwert beträgt daher

$$P_w = \frac{60000 \cdot 0{,}227}{20} \text{ W} = 681 \text{ W} \approx 680 \text{ W}.$$

Die Heizzeit (t) ergibt sich aus dem Anschlußwert (P_w) und der Wärmemenge (Q_{kJ}) zu

$$t = \frac{16{,}7 Q}{P} \text{ in min}.$$

In unserem Beispiel ist $t = \frac{16{,}7 \cdot 816}{680}$ min $= 20$ min.

Die Stromstärke I in A folgt aus dem Anschlußwert P in W und U in V zu $I = P : U$ oder aus der Wärmemenge Q in kJ zu

$$I = \frac{1000 Q}{U t_s} \text{ in A oder } \frac{16{,}7 Q}{U t_{min}} \text{ in A } (\cos\varphi \approx 1).$$

Tabelle 5.175: Heizleiter WM 100 (Isolation: Amberglimmer; Oberflächenbelastung $p = 10$ W/cm²; Betriebstemperatur 100 °C; Heizleitertemperatur ≈ 900 °C; Betriebsspannung 220 V)

Anschlußwert P in W	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1500	2000	
Stromstärke I in A	0,454	0,908	1,36	1,82	2,28	2,72	3,18	3,64	4,09	4,54	5,45	6,82	9,08	$d = 0{,}344 \sqrt[3]{\frac{P}{10R}}$
Widerstand R in Ω	484	242	161	121	96,5	81,0	69,2	60,5	53,7	48,4	40,3	32,2	24,2	
Nenndurchmesser d des Heizleiters in mm	0,09	0,16	0,20	0,25	0,28	0,30	0,35	0,40	0,40	0,45	0,5	0,6	0,7	
Gestreckte Länge l in m	3,08	4,9	5,1	5,9	6,0	5,7	6,7	7,6	6,6	7,7	7,9	9,1	9,3	

Tabelle 5.176: Heizleiter WM 100 (Isolation: Schamotte; Oberflächenbelastung $p = 20$ W/cm²; Betriebstemperatur 400 °C; Heizleitertemperatur 1200 °C; Betriebsspannung 220 V)

Anschlußwert P in W	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1500	2000	
Stromstärke I in A	0,454	0,908	1,36	1,82	2,28	2,72	3,18	3,64	4,09	4,54	5,45	6,82	9,08	$d = 0{,}344 \sqrt[3]{\frac{P}{20R}}$
Widerstand R in Ω	484	242	161	121	96,5	81,0	69,2	60,5	53,7	48,4	40,3	32,3	24,2	
Nenndurchmesser d des Heizleiters in mm	0,07	0,11	0,14	0,18	0,2	0,22	0,25	0,28	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	
Gestreckte Länge l in m	1,85	2,3	2,5	3,1	3,0	3,1	3,4	3,7	3,8	4,7	5,4	5,1	4,8	

Tabelle 5.177: Heizleiterlegierungen (Höchstzulässige Anwendungstemperatur t_{max} in °C; Einheitswiderstand ϱ in mm²/m bei °C; Zugfestigkeit σ_B in MPa)

Marke	t_{max}	Einheitswiderstand ϱ bei °C									Chem. Zusammensetzung[1])			Dichte	σ_B	Schmelzpunkt
	°C	20	200	400	500	600	700	800	900	1000	C%	Al%	Cr%	kg/dm³	MPa	°C
CrAl 8 5	950	1,25	1,28	1,31	1,34	1,39	1,42	1,43	1,44	1,44	< 0,10	5···6	7,5···8,5	7,2	550···750	1500
CrAl 20 5	1150	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,41	1,42	1,42	1,43	< 0,10	4···5	19···21	7,2	650···800	1500
CrAl 30 5	1250	1,44	1,44	1,45	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	< 0,10	4···5	28···30	7,1	750···850	1500
											C%	Ni%	Cr%			
CrNi 25 20	1050	0,95	1,04	1,11	1,15	1,17	1,20	1,22	1,24	1,26	< 0,20	18,5···19,5	23···25	7,8	600···750	1380
NiCr 30 20	1100	1,04	1,11	1,17	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	< 0,20	29···31	20···22	7,9	600···750	1390
NiCr 60 15	1075	1,11	1,15	1,18	1,20	1,20	1,21	1,22	1,23	1,25	< 0,15	58···62	14···16	8,2	600···750	1390
NiCr 80 20	1150	1,09	1,11	1,13	1,13	1,12	1,12	1,12	1,12	1,13	< 0,15	76···80	18···20	8,3	600···750	1400
Toleranz	—	0,05		0,06		0,07			0,08							

[1]) Rest Eisen (Fe) einschl. Silizium (Si), Mangan (Mn) oder Sonderzusätze.

Werkstoffeigenschaften: CrAl ist empfindlich gegen Rückbiegung, Erschütterung nach Gebrauch, Rosten, Stickstoff. CrNi ist bei 500···750 °C nach Gebrauch empfindlich gegen Erschütterung. NiCr ist empfindlich gegen Schwefel und Aufkohlung.

Im Beispiel wird bei $U = 220\ \text{V}$ $I = 680 : 220\ \text{A} = 3{,}1\ \text{A}$ $\left(\text{oder } \frac{1000 \cdot 816\ \text{A}}{220 \cdot 1200} = 3{,}1\ \text{A wie vor}\right)$.
Aus der Spannung U und der Stromstärke I findet man den Gesamtwiderstand R des Heizleiters zu $R = \frac{U}{I}$ in Ω $\left(\text{im Beispiel } \frac{220\ \text{V}}{3{,}1\ \text{A}} = 71\ \Omega\right)$. Man findet den Widerstand R aber auch unmittelbar aus der Wärmemenge Q, der Stromstärke I und der Heizzeit t zu $R = \frac{1000Q}{I^2 t_s} = \frac{16{,}7Q}{I^2 t_{\text{min}}}$ $= \frac{1000 \cdot 816}{3{,}1 \cdot 3{,}1 \cdot 1200}\ \Omega = \frac{16{,}7 \cdot 816}{3{,}1 \cdot 3{,}1 \cdot 20}\ \Omega \approx 71\ \Omega$.
Die Widerstände für 1 m Länge des Heizleiters aus standardisierten Widerstandsbaustoffen sind aus den Tabellen 5.175 bis 5.177 für die Drahtdurchmesser zu entnehmen. Ist der Nenndurchmesser des Widerstandsdrahtes bekannt (etwa als vorgeschriebener Mindestdurchmesser, z. B. 0,09 mm bei Heizkissen) oder wählt man ihn aus Festigkeitsgründen [z. B. bei Heizleitern für Temperaturen, bei denen man nicht an die Grenztemperaturen des Heizleiters (Tabelle 5.173) heranzugehen braucht], so ist die Länge l des Heizleiters durch Division des Widerstandes R durch den Sollwert (Ω für 1 m) des betreffenden Nenndurchmessers zu errechnen. Zum Beispiel wird für einen errechneten Gesamtwiderstand $R = 880\ \Omega$, einen gewählten Nenndurchmesser 0,1 mm eines WM-100-Heizleiters die Länge $l = 880 : 127{,}5 = 6{,}9$ m.
Errechnet wird der Nenndurchmesser aus der Arbeitstemperatur des Heizgerätes und der Grenztemperatur des Heizleiters. Die Grenztemperatur muß größer sein als die Arbeitstemperatur; sie ist durch die Lebensdauer des Heizkörpers und seiner Isolation beschränkt. Man darf also die wärmeabgebende Oberfläche bei einer bestimmten Heizleitertemperatur und einer bestimmten Arbeitstemperatur nur mit einer bestimmten Wattzahl/cm² Oberfläche belasten. Je näher die Arbeitstemperatur an die Grenztemperatur herankommt, um so kleiner wird diese Einheits-Oberflächenbelastung des Heizleiters oder Heizkörpers (s. Tabelle 5.174). Allgemein besteht für freie Strahlung das STEFAN-BOLTZMANNsche Gesetz:

$$p = C\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \text{ in W/cm}^2,$$

p spezifische Oberflächenbelastung,
C Festwert, z. B. $5{,}7 \cdot 10^{-4}$ bei schwarzstrahlenden Flächen,

T Grenztemp. des Heizleiters oder der Isolation,
T_2 Arbeitstemp. des Heizgerätes,
} abs. Temperatur in K (Kelvin) $T = t + 273$

Für freie Strahlung schwarzstrahlender Flächen (offene Kochplatten, Röster, Industrieöfen) wird:

$$p = 5{,}7\left[\left(\frac{T_1}{1000}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{1000}\right)^4\right].$$

Aus dieser Gleichung oder aus Tabelle 5.174 ergibt sich die Gesamtoberfläche (O) des Heizleiters oder Heizkörpers (Patrone, Scheide, Zapfen) $O = P/p$ in cm² (P in W). Für Heizdrähte ist $O = \pi d l = \frac{1}{10}\frac{P}{p}$; Länge $l = \frac{\pi d^2}{4}\frac{R}{\varrho}$; d in mm; l in m; P in W; p in W/cm²; R in Ω.

$$d = 0{,}34372 \cdot \sqrt[3]{\frac{P\varrho}{pR}} = 0{,}34372 \cdot \sqrt[3]{\frac{I^2\varrho}{p}} \text{ in mm}.$$

Für die gebräuchlichsten Heizdrähte WM 50 ($\varrho = 0{,}5\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$) und WM 100 ($\varrho = 1{,}0\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$) wird in mm:

$$d_{\text{WM50}} = 0{,}272916 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{pR}} = 0{,}272916 \cdot \sqrt[3]{\frac{I^2}{p}},$$

$$d_{\text{WM100}} = 0{,}34372 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{pR}} = 0{,}34372 \cdot \sqrt[3]{\frac{I^2}{p}}.$$

5.6.3. Raumheizung

Für die Bemessung einer Heizungsanlage ist die Berechnung des Wärmebedarfs Voraussetzung. Der stündliche Gesamtwärmebedarf Q_h ergibt sich aus dem Transmissionswärmebedarf Q_T und dem Lüftungswärmebedarf Q_L

$$Q_h = Q_T + Q_L; \qquad Q_T = Q_0(1 + z_D + z_H)$$

Q_0 Transmissionswärmeverlust,
z_D zusammengefaßte Zuschläge für Unterbrechung des Heizens und für Ausgleich der kalten Außenflächen in Abhängigkeit von der Betriebsweise,
z_H Zuschlag für Himmelsrichtung,

Betriebsweise I: ununterbrochener Betrieb mit Einschränkung der Wärmelieferung bei Nacht
Betriebsweise II: täglich 8- bis 12stündige Unterbrechung der Wärmelieferung
Betriebsweise III: täglich 12- bis 16stündige Unterbrechung der Wärmelieferung

Der Transmissionswärmeverlust eines Raumes setzt sich zusammen aus den Wärmeverlusten q_0 von Fenstern, Türen, Innen- und Außenwänden, Fußboden und Decke.

$$q_0 = kA(t_i - t_e) \text{ in kJ/h}$$

k Wärmedurchgangswert in kJ/(h · m² · K),
A Fläche des Raumes in m²,
t_i geforderte Lufttemperatur des zu erwärmenden Raumes in K,
t_e Lufttemperatur im Freien oder im benachbarten Raum in K.

Der Lüftungswärmebedarf Q_L ist die Wärmemenge, die zum Aufheizen der einströmenden Frischluft auf die geforderte Raumtemperatur benötigt wird. Es gilt

$$Q_L = V_L \cdot 1{,}3(t_i - t_e) \text{ in kJ/h}$$

V_L stündliche Luftmenge in m³/h

Als tiefste Außentemperatur sind $-15\,°\text{C}$ für die milde Klimabauzone und $-18\,°\text{C}$ für die strenge Klimabauzone in die Berechnung einzusetzen.

Tabelle 5.178: Raumtemperaturen

Gebäude, Raum	Raumtemperatur °C
Wohnhäuser	
Wohnraum, Schlafraum, Küche	20
Vorraum, Flur, Abort	15
Treppenhaus, beheizt	10
Bad	22
Geschäfts- und Verwaltungsgebäude	
Geschäfts- und Büroraum, Gaststätte, Hotelzimmer, Laden	20
Treppenhaus, Flur, Abort	15
Schulen	
Unterrichts- und Zirkelraum, Lehrerzimmer, Verwaltungsraum, Hortraum	20
Flur, Treppenhaus, geschlossene Pausenhalle, Abort	5···10

Zahlenwerte für die Berechnung sind den Tabellen 5.179···5.181 zu entnehmen.

Tabelle 5.179: Zusammengefaßter Zuschlag z_D

Betriebsweise	z_D in % bei einem mittleren D-Wert von 1,0
I	7
II	15
III	20

Tabelle 5.180: Zuschlag z_H

Himmelsrichtung	S	SW	W	NW	N	NO	O	SO
z_H in %	−5	−5	0	+5	+5	+5	0	−5

Tabelle 5.181: k-Werte

		k kJ/(h · m² · K)
Türen		8,4
Einfachfenster		19,0
Doppelfenster		8,4
Verbundfenster		9,2
Mauerziegel, Außenwand	240 mm	7,2
	365 mm	5,2
	590 mm	3,8
Mauerziegel, Innenwand	115 mm	9,2
	240 mm	6,2
	365 mm	4,7
Decken, je nach Wärmedämmschicht		2,1···11,5

5.7. Elektroschweißen

5.7.1. Lichtbogenschweißen

Das Lichtbogenschweißen ist ein Schmelzschweißverfahren, dessen Wärmequelle der elektrische Lichtbogen ist. Beim Schmelzschweißen (Lichtbogenschweißen) werden metallische Werkstoffe durch örtlich begrenzten Schmelzfluß vereinigt. Der Schmelzfluß wird durch Wärmezufuhr (elektrischer Lichtbogen) erreicht. Im allgemeinen wird Zusatzwerkstoff eingeschmolzen.
Tabelle 5.182 gibt eine Übersicht über die Lichtbogen-Schweißverfahren, Tabelle 5.183 über die Anwendung des Lichtbogenschweißens.
Der Lichtbogen hat eine fallende Charakteristik (Bild 5.111), mit fallender Spannung und Lichtbogenlänge wächst seine Stromstärke. Während ältere Schweißstromquellen immer eine feststehende Charakteristik haben, gibt es bei den modernen Schweißstromquellen auch solche mit veränderlicher Charakteristik (VC).

Betriebsarten

1. Dauerbetrieb (DB) für selbsttätige oder ähnliche Schweißung.

2. Handschweißbetrieb (HSB): Periodische Folge von Belastung (Zündkurzschluß und Schweißen) und Leerlauf der Stromquelle. Nach TGL 200-3081 beträgt eine periodische Folge, auch Spieldauer genannt, z. B. 2 min. Sie besteht aus:

Lastdauer (2 s Kurzschluß + 64 s Schweißen) = 66 s
Pausendauer (Leerlauf) = 54 s
Spieldauer = 120 s

relative Einschaltdauer t_e in %

$$t_e = \frac{\text{Lastdauer} \cdot 100}{\text{Spieldauer}} = \frac{66\,\text{s} \cdot 100}{120\,\text{s}} = 55\%$$ (s. Bild 5.112).

Schweißstromquellen

Für die Schweißstromquellen gelten folgende *Standards*:

TGL 200-3081 Lichtbogen-Schweißstromquelle, Begriffe, technische Forderungen
TGL 200-3082/01 Gleichstrom-Lichtbogen-Schweißgeneratoren und -umformer; Begriffe, technische Forderungen, Lieferung
TGL 200-3082/02 —; Prüfung
TGL 200-3083/01 Lichtbogen-Schweißtransformatoren; Begriffe, technische Forderungen, Lieferung
TGL 200-3083/02 —; Prüfung
TGL 200-3084/01 Lichtbogen-Schweißgleichrichter, Begriffe, technische Forderungen, Lieferung
TGL 200-3084/02 —; Prüfung

Tabelle 5.182: Lichtbogenschweißen, Übersicht

Schweißverfahren		Schutzmittel gegen Sauerstoff- und Stickstoffeinwirkungen aus der Atmosphäre
Offenes Lichtbogenschweißen	E-Schweißen	Elektrodenumhüllung
Schutzgas-Lichtbogenschweißen	Wolfram-Inert-Gas-Schweißen (WIG-Schweißen)	Argon
	Metall-Inert-Gas-Schweißen (MIG-Schweißen)	Argon
	Schutzgas (CO_2)-Schweißen (SG/CO_2-Schweißen)	Kohlendioxid
Verdecktes Lichtbogenschweißen	Unterschienenschweißen (US-Schweißen)	Elektrodenumhüllung
	Unterpulverschweißen (UP-Schweißen)	Schweißpulver

Tabelle 5.183: Lichtbogenschweißen, Anwendung

Schweißverfahren	Anwendungsbereich Werkstoffe	Vorzugsweise geschweißte Blech- oder Wanddicken
E-Schweißen	vorzugsweise Stahl	größere Dicken
WIG-Schweißen	Al und Legierungen, hochlegierter Stahl	geringe Dicken und Wurzellagen
MIG-Schweißen	Al und Legierungen, hochlegierter Stahl	Dicken über 4 mm
SG/CO_2-Schweißen	unlegierter und niedriglegierter Mn-Stahl	alle Dicken
US-Schweißen	Stahl	geringe Dicken
UP-Schweißen	vorzugsweise Stahl	meist große Dicken

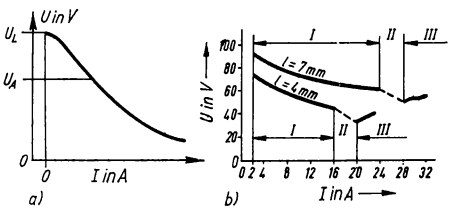


Bild 5.111. Lichtbogen-Charakteristik
a) Leerlauf- (U_L) und Arbeitsspannung (U_A), b) Zonen: I ruhige Zone (Schweißzone), II unruhige Zone, III Zischen; l Lichtbogenlänge

Die Schweißstromquellen müssen folgende Eigenschaften besitzen:

1. Begrenzung der Leerlaufspannung (≦ 100 V), 2. möglichst konstanter Schweißstrom, 3. Kurzschlußsicherheit, 4. rascher Spannungsanstieg nach dem Kurzschluß, 5. stufenlose Schweißstromeinstellung, 6. robuster Aufbau.
Für die Bestimmung des richtigen Schweißstromes gilt folgende Faustregel:

Je Millimeter nutzbarem Schweißdrahtdurchmesser ≙ 40 A.

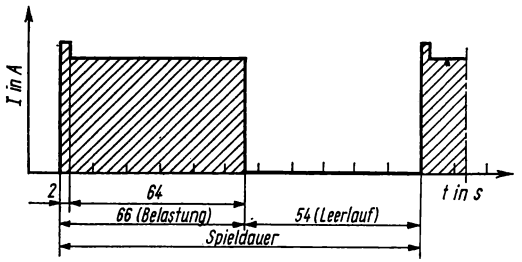


Bild 5.112. Belastung und Leerlauf im Handschweißbetrieb

Leerlaufspannung der Schweißstromquellen

Als Leerlaufspannung bezeichnet man die am offenen Schweißstromkreis auftretende Klemmenspannung. Sie darf in der Regel innerhalb des Einstellbereiches 100 V nicht überschreiten. Wird aus besonderen schweißtechnischen Gründen eine höhere Leerlaufspannung benötigt, so ist eine selbsttätige Schutzeinrichtung vorzusehen, die die Spannung innerhalb von 0,2 s, nachdem der Schweißstromkreis unterbrochen worden ist, auf maximal 100 V begrenzt.

Leistungsschilder

Sie enthalten alle für die Schweißstromquelle wichtigen technischen Daten. Dazu gehören:
1. Leerlaufspannung, 2. Schweißstrom-Einstellbereich, 3. Betriebsart (DB oder HSB), 4. Typenbezeichnung und Hersteller, 5. Angaben zur Kennlinie.
Tabelle 5.184 enthält einen Vergleich der Schweißstromquellen. Tabelle 5.185 enthält Kenndaten von Schweißumformern, Tabelle 5.186 Kenndaten von Schweißtransformatoren.

Schweißgeneratoren

Bei den *Schweißgeneratoren mit Eigenerregung und Gegenverbundwicklung* (Bild 5.113) wird die Zündspannung durch den Nebenschlußsteller des Erregergenerators eingestellt. Die Gegenverbundwicklung schwächt die Spannung bei wachsendem Schweißstrom. Die Hilfspole unterdrücken die Funkenbildung. Zur Beruhigung des Lichtbogens dienen Drosselspulen. Sie werden drehstromseitig (Antriebsmotor) mit Stern-Dreieck-Schalter angelassen.

Tabelle 5.184: Vergleichende Beurteilung der Schweißstromquellen

Kenngröße	Umformer Generator und Antriebsmotor	Transformator	Gleichrichter
Beschaffungskosten	hoch	niedrig	hoch
Wartungskosten	hoch	niedrig	niedrig
Wirkungsgrad	niedrig	gut	befriedigend
Leistungsfaktor	gut	niedrig	gut
Stromverbrauch im Leerlauf	hoch	niedrig	niedrig
Netzbelastung	dreiphasig	einphasig	dreiphasig
Zulassung für feuchte Räume und solche mit begrenzter Bewegungsfreiheit	ja	ja, wenn Leerlaufspannung zusätzlich begrenzt wird	
Verschweißbarkeit der Elektroden	alle Typen	keine kalkbasischen (Kb) Typen, keine nackten Elektroden	alle Typen
Blaswirkung[1])	stark	gering	geringer als beim Umformer
Geräuschbelästigung	stark	gering	gering

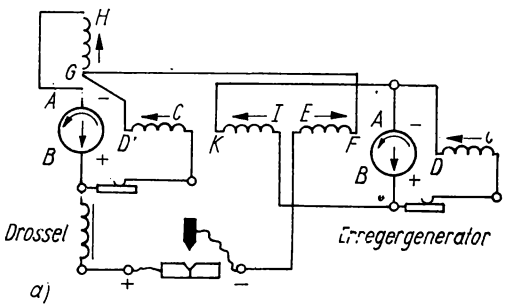
[1] Unter Blaswirkung ist die Beeinflussung des Lichtbogens auf Grund der in der Nähe bestehenden magnetischen Felder zu verstehen. Der Lichtbogen wirkt, als ob er vom Wind angeblasen und abgelenkt wird.

Tabelle 5.185: Kenndaten von Schweißumformern

Typenbezeichnung	KW 280	KW 360	KW 510 VC	KW 320	KW 400 VC	KW 700 VC	KW 1000
Schweißstrom und -spannung max. im HSB (55% t_e) in A/V	280/30	380/35	500/40	320/32	400/34	700/44	1000/40
max. im DB (100% t_e) in A/V	210/25	280/30	400/40	240/30	300/32	600/44	850/40
Schweißstromeinstellbereich in A fallende Charakteristik Stufe I	150···280	200···380	200···500	100···320	150···400	300···700	200···1000
Stufe II	45···170	60···240	80···270	30···130	50···200	150···300	150···250
Stufe III	30···170	—	—	—	—	100···200	—
fast horizontale Charakteristik	—	—	80···500	—	50···400	50···600	—
Leerlaufspannung in V	38···72	94	40···90	77	40···95	40···84	42···98
Anschlußleistung in kVA im HSB	18,5	27,7	41	17	26	47,6	77,1
im DB	10,6	17,8	31	12	16	43,2	59,3
Leerlaufverlust in kW	0,9···1,3	1,8···2,3	2,4···3,4	—	1,7···2,6	4,0···5,0	3,4···6,9
Wirkungsgrad η im HSB in %	48	53	57	53	50	64	59 (DB)
Masse in kg	440	485	645	270	440	950	1100
Anwendung, Schweißverfahren	E, WIG	E, WIG	E, UP WIG, MIG SG (CO_2)	E, WIG	E, UP WIG, MIG SG (CO_2)	E, UP WIG, MIG SG (CO_2)	E, UP GG. Warmschw.
Nutzbarer Schweißdraht-⌀ in mm E-Schweißen	2···5	2···6	2···8	2···6	2···8	2···8	2,5···8
SG (CO_2)-Schweißen	—	—	1,2···2	—	0,8···1,6	0,8···2,5	—
Ausrüstung	Fern-einsteller Pol-umschalter	Fern-einsteller Pol-umschalter	Fern-einsteller Pol-umschalter	Fern-einsteller Pol-umschalter	Fern-einsteller Pol-umschalter	Fern-einsteller Pol-umschalter	Fern-einsteller Pol-umschalter

Tabelle 5.186: Kenndaten von Schweißtransformatoren

Typenbezeichnung	KTN 180	KTN 260	KTN 510	KTDV 1000	FT 350	FT 250	Junior	Rekord	KT 500
Schweißstrom und Spannung max. im HSB (55% t_e) in A/V	180/26	260/30	480/38	–	350/32	250/30	120/24	180/27	500/40
max. im DB (100% t_e) in A/V	135/23	–	375/34	1000/44	250/28	180/26	–	(35% t_e)	340/34
Schweißstromeinstellbereich in A									
fallende Charakteristik Stufe I	40···180	25···80	50···180	200···500	55···350	65···250	50···120	55···180	90···500
Stufe II	–	60···260	140···480	400···1000	–	–	–	–	–
Einstellprinzip	Streukern	Streukern	Streukern	gleichstromvormagnet. Drossel	gleichstromvormagnet. Streukern	gleichstromvormagnet. Streukern	Stufenschaltung	Stufenschaltung	Streukern
Leerlaufspannung in V	58···68	63···70	56···66	59···68	58···63	70	bis 70	65···69	bis 70
Anschlußleistung in kVA im HSB	9	14,5	26	–	16	10	1,6	4,5	25
im DB	–	–	28	72	–	–	–	–	–
Leerlaufverlust in kW	0,3	0,36	0,98	–	0,7···1,1	–	–	–	–
Wirkungsgrad η im HSB in %	78	78	91	88	81	–	–	–	80
Leistungsfaktor cos φ	0,7	0,48	0,61	0,69	0,7	0,73	–	–	–
Masse in kg	150	210	325	506	200	–	30	60	230
Schweißverfahren	E, WIG	E, WIG	E, WIG	E, UP	E, WIG	E, WIG	E	E, WIG	E, WIG, UP
Nutzbarer Schweißdrahtdurchmesser in mm	2,5···4	2,5···5	2,5···8	–	2,5···6	2,5···5	1,5···3,25	1,5···4	–
Ausrüstung				Ferneinsteller	Ferneinsteller	Ferneinsteller			



Zum Niederschmelzen von 1 kg Schweißstoff (Elektroden) braucht man etwa 2 kW · h. Geschweißt wird bei Gleichstrom mit Minus an der Elektrode, bei umhüllten Elektroden auch mit Plus.

Schweißtransformatoren

Schweißtransformatoren (Bild 5.114) baut man mit großer magnetischer Streuung, d. h., man läßt einen Teil der primären Feldlinien nicht durch die Schweißstromwicklung (Sekundärwicklung) gehen. Einstellung erfolgt durch Anzapfung, durch Veränderung der Lage der Spulen zueinander oder durch Vertauschen von stärker induzierten Spulenteilen gegen schwächer induzierte Spulenteile. Die Leerlaufspannung wird gewöhnlich durch Anzapfungen auf der Primärseite eingestellt. Beim Anschluß von zwei Transformatoren verteilt man die Schweißleistung auf die drei Phasen durch SCOTT-Schaltung (Bild 5.115).

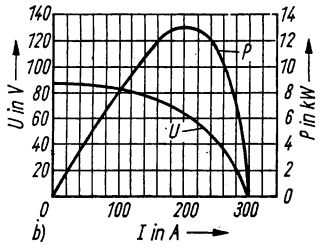


Bild 5.113. Schweißgenerator mit Eigenerregung und Gegenverbundwicklung
a) Schaltbild, b) Charakteristik

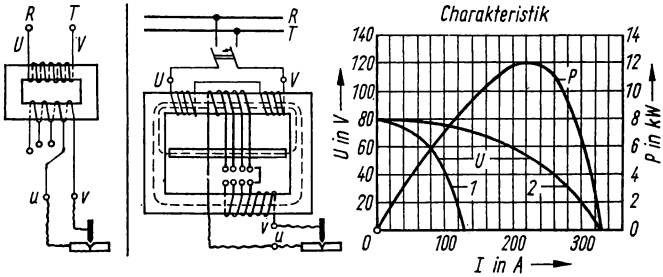


Bild 5.114. Schweißtransformator — Schaltungen und Charakteristik

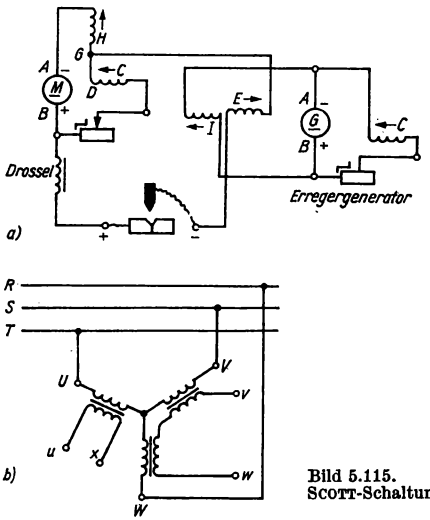


Bild 5.115. SCOTT-Schaltung

5.7.2. Widerstandspreßschweißen

Beim *Widerstandspreßschweißen* werden metallische Werkstoffe unter Druck bei örtlich begrenzter Erwärmung vereinigt. Wärmequelle ist der elektrische Widerstand des zu schweißenden Werkstoffs bei Stromdurchgang. Im allgemeinen wird kein Zusatzwerkstoff eingesetzt.
Schweißstrom: bis 20 kA für Stahl, bis 50 kA für Aluminium, Elektrodenkraft: bis über ≈ 5 kN für Stahl und Al.
Die Widerstandsschweißung ist auf bestimmte Querschnitte und Wechselstrom beschränkt. (Wo nur Gleichstrom zur Verfügung steht, erzeugt man den erforderlichen Wechselstrom durch einen Motorgenerator mit Wechselstrom-Schweißgenerator, z. B. für 3 Spannungen, s. Bild 5.116.)

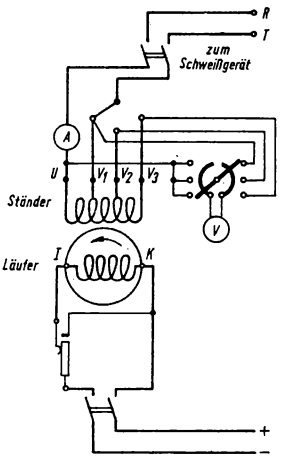


Bild 5.116. Wechselstrom-Schweißgenerator für 3 Spannungen

Die Schweißstelle wird beim Stromdurchgang vom Kern nach der Oberfläche erhitzt. Der Widerstand der Schweißstelle ist klein, die Stromstärke groß, die Spannung niedrig (1,5···5 V). Der Transformator ist in die Maschine eingebaut. Die Einspannstellen sind gekühlt.
Tabelle 5.187 enthält Angaben über das Punktschweißen von Stahlblechen.
Für den Arbeits- und Brandschutz beim Schweißen gelten die Standards TGL 30270/01···09.

Tabelle 5.187: Punktschweißen von Stahlblechen

Maschinen-(Trafo-) Leistung in kVA	1,5	3	7,5	15	25	40
Höchste Einzelblechdicke in mm	0,5	1	1,5	4	7,5	10
Schweißdauer in s	0,8	1,3	1,8	4	7,4	10

5.8. Blitzschutzanlagen

5.8.1. Allgemeines

Blitzschutzanlagen sollen Menschen, Nutztiere und Sachwerte gegen Gefahren und Schäden durch Blitzeinschlag schützen. Deshalb sind in TGL 30044 »Blitzschutz« u. a. Begriffsdefinitionen, allgemeine Forderungen und Angaben zur Instandhaltung festgelegt, während in TGL 200-0616 die Bestimmungen für das Errichten von Blitzschutzanlagen enthalten sind. Außerdem bestehen für die Einzelteile von Blitzschutzanlagen eine Reihe von Erzeugnisstandards, die im folgenden noch erwähnt werden.

5.8.2. Errichtung von Blitzschutzanlagen

Errichtungspflicht, Voraussetzung zum Errichten, Abnahmeprüfungen, Revisionen

Folgende Bauten und nichtelektrotechnische Anlagen sind durch Blitzschutzanlagen zu schützen:

a) explosivstoffgefährdete Betriebs- und Lagergebäude,

b) explosionsgefährdete Betriebs- und Lagergebäude sowie Betriebsanlagen im Freien,

c) feuergefährdete Betriebs- und Lagergebäude, in denen leicht brennbare Stoffe in gefahrdrohender Menge hergestellt, be- oder verarbeitet bzw. gelagert werden,

d) ausgedehnte Industriebetriebe, Kompaktbauten, Krankenhäuser, Verkaufsstellen mit mehr als 1000 m² Verkaufsfläche, z. B. Warenhäuser, Theater, Lichtspieltheater, Bauten mit Versammlungsräumen über 200 Sitzplätze, Schulen, große Hotels, große Museen, Internate, Heime, Vorschuleinrichtungen sowie ähnliche Bauten,

e) hohe, die Umgebung überragende Objekte, wie Kirchen, Aussichtstürme, Kühltürme, Wassertürme, Bohr- und Fördertürme, Hochbehälter, frei stehende Schornsteine und solche, die den höchsten Punkt der Dacheindeckung um mehr als 10 m überragen, sowie technische Anlagen, wie Kranbahnen im Freien, Seilbahnen,

f) Silos und Speichergebäude, Maschinen- und Gerätehallen, Tierunterkünfte und Lagergebäude sowie andere Wirtschaftsgebäude der sozialistischen Betriebe der Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft einschl. Forstwirtschaft und Bäuerliche Handelsgenossenschaften,

g) Hochhäuser sowie die Bebauung überragende vielgeschossige Gebäude.

Blitzschutzanlagen dürfen nur von einem Werktätigen errichtet werden, der Kenntnisse zum Blitzschutz nachgewiesen hat. Alle neu zu errichtenden Blitzschutzanlagen sind vorprüfungspflichtig. Das Vorprüfen wird vom zuständigen Organ der Technischen Überwachung (TÜ) vorgenommen. Abnahmeprüfungspflichtig durch die Organe der TÜ sind nur Blitzschutzanlagen nach Abschn. 5.8.2.a) und b) (s. oben). Die Revision muß umfassen:

a) Kontrolle auf einwandfreien Zustand durch Besichtigen aller oberirdischen Leitungen, Verbindungsstellen, Anschlüsse und sonstigen Anlagenteile, des Korrosionsschutzes, der sicheren Befestigung der Gebäudeleitungen und Auffangvorrichtungen,

b) Kontrolle des Übereinstimmens der Blitzschutzanlage mit den zeichnerischen Unterlagen,

c) Messen der Erdungswiderstände,

d) Kontrolle auf fachgerechtes Ausführen der Blitzschutzanlage.

Dabei gelten folgende Zeitabstände als Richtwerte:

a) 2 Jahre für Anlagen von explosivstoff- und explosionsgefährdeten Betriebs- und Lagergebäuden,

b) 4 Jahre für Anlagen

von Betriebsgebäuden und Einrichtungen mit erhöhtem Verschleiß, z. B. in chemischen Betrieben,

in der Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft einschl. Forstwirtschaft und Bäuerliche Handelsgenossenschaften, an Betriebsgebäuden und -einrichtungen des Bergbaus, sofern ein Untertagebetrieb vorhanden ist,

an Schornsteinen und

an allen übrigen Bauten und Betriebsanlagen gemäß Abschn. 5.8.2.a)···g).

Blitzschutzmaßnahmen

Blitzschutzmaßnahmen sind alle Maßnahmen, die dazu dienen, daß als Folge eines Blitzschlages in einem Blitzgefahrenbereich nur solche Schäden und Störungen auftreten, die für eine bestimmte *Blitzschutzklasse* (BSKL) (s. Tabelle 5.188) noch zulässig sind. In erster Linie sind dafür Blitzschutzeinrichtungen am Objekt vorzusehen, die mit ihren Auffang-, Ableit- und Erdungseinrichtungen im Zusammenwirken mit entsprechenden Potentialausgleichmaßnahmen den Blitzstrom zur Erde leiten sollen. Die nachfolgend genannten *Blitzschutzeinrichtungen* sind so bemessen, daß sie Blitzentladungen widerstehen, deren

Blitzstromscheitelwert $I_{mm} = 100$ kA,

maximale Stromänderung $\frac{di}{dt} = 80 \frac{kA}{\mu s}$,

Stromquadrat-Zeit-Integral $\int i^2\,dt = 10^7\ A^2 \cdot s$

betragen und deren die Menschen oder Nutztiere gefährdende Spannungen die Werte der Tabelle 5.189 nicht überschreiten.

Tabelle 5.188: Blitzschutzklassen

Blitzschutzklasse	Bedingungen für die Klassifizierung	
	Gefahrenmomente	nicht zulässige Blitzauswirkungen
BSKL 1	Anwesenheit von Menschen oder Nutztieren, sofern Blitzschutzmaßnahmen notwendig	Spannungen über der zulässigen Berührungsspannung
	geringe Brandgefahr nach TGL 30042	Überschläge an Stellen, an denen sich Menschen aufhalten oder Nutztiere gehalten werden
BSKL 2a	mittlere und große Brandgefahr nach TGL 30042	Spannungen über der zulässigen Berührungsspannung
BSKL 2b	Explosionsgefährdung nach TGL 30042	Überschläge im Blitzgefahrenbereich
BSKL 2c	Herstellen, Verarbeiten und Lagern von Explosivstoffen	Abtropfen, Abspritzen oder Herabfallen glühender oder brennender Teile in den Blitzgefahrenbereich

Tabelle 5.189: Zulässige Berührungsspannungen

Zeitdauer der Blitzentladung s	Max. zulässiger Scheitelwert der Berührungsspannung kV
10^{-1}	1
10^{-3}	10
10^{-4}	100

Im allgemeinen sind für *Blitzschutzanlagen* (BSA) vorhandene metallene Konstruktionsteile des Objekts, z. B. Bewehrungsstähle, Metallkonstruktionen, Blechabdeckungen, Objektausrüstungen, als Auffang-, Ableit- und Erdungseinrichtungen zu verwenden. Für Stahlbauten, Metallkonstruktionen, Metallleichtbauten und Stahlbetonbauten ist die Blitzschutzanlage für alle Blitzschutzklassen durch Einbeziehen von Konstruktionsteilen zu bilden.

Auffangeinrichtungen

Auf Gebäuden müssen Auffangeinrichtungen an folgenden Stellen vorhanden sein:

Turm- und Giebelspitzen, Firste,
Schornsteine, Dunstschlote, Luftschächte und ähnliche Dachaufbauten, ausgenommen Dachhautentlüfter,
Giebelkanten vom First zur Traufe, Mauerkronen,
Traufkanten bei flachen Dächern.
Es darf kein Punkt der oberen Begrenzung des Objektes,
bei Gebäuden die Dachfläche,
bei BSKL 1 und BSKL 2a mehr als 12 m und
bei BSKL 2b und BSKL 2c mehr als 6 m
von Teilen der Auffangeinrichtung entfernt sein.

Im allgemeinen genügen *Auffangleitungen*. An Schornsteinen, Luftschächten und ähnlichen Dachaufbauten sind bei einer Seitenlänge bis 1 m eine *Auffangstange* oder ein *Auffangrahmen* mit einem Anschluß an die Auffangleitung und über 1 m zwei Auffangstangen oder ein Auffangrahmen mit zwei Anschlüssen an die Auffangleitung vorzusehen. Auffangeinrichtungen dürfen nicht in Blitzgefahrenbereichen mit BSKL 2a oder BSKL 2b errichtet werden. Die Forderungen gelten in allen Blitzschutzklassen durch die Bauweise der Objekte als erfüllt, wenn die obere Begrenzung des Objektes, bei Gebäuden die Dachfläche, als

Metallkonstruktion,
Stahlbetonkonstruktion,
Dachdeckung unter Verwendung metallener Schichten,
Dachdeckung aus isolierenden Schichten, z. B. Wellasbest, wenn diese Schichten im technologisch bedingten Abstand mit metallenen Bolzen auf metallener Tragkonstruktion befestigt sind,

ausgeführt ist.
Für Traglufthallen ist in BSKL 1 und BSKL 2a ein Leitungsnetz als Auffang- und Ableiteinrichtung mindestens in der Hauptachse der Halle und quer dazu im Abstand von höchstens 12 m anzuordnen.
Halbzeug, Werkstoff und Mindestabmessungen für Auffangeinrichtungen sind in Tabelle 5.190 festgelegt. Es sind alle Verbindungsarten zulässig, die gegen die zu erwartenden elektrischen, thermischen und mechanischen Beanspruchungen sowie gegen Korrosion beständig sind, z. B. Schweiß-, Schraub-, Klemm-, Preß-, Lötverbindungen. Diese Forderungen werden erfüllt:

wenn Blitzschutzarmaturen entsprechend Bild 5.117 verwendet werden,
bei Verschraubung, wenn der Gewindedurchmesser der Schraube mindestens 10 mm, bei Verwendung von zwei Schrauben mindestens 8 mm beträgt,
bei Stumpfschweißung, wenn der Schweißnahtquerschnitt mindestens dem Querschnitt des kleinsten verschweißten Leiters entspricht,
bei Überlappschweißung, wenn die Schweißnaht mindestens 50 mm lang und 4 mm dick ist,
bei Lötung, wenn die Verbindungsfläche mindestens 100 mm² beträgt.

Die Befestigung zusätzlicher Auffangeinrichtungen hat vorzugsweise mit Leitungsstützen nach Bild 5.117 im Abstand von etwa 1 m zu erfolgen. Auffangstangen an Hausschornsteinen sind vorzugsweise mit Spannbändern zu befestigen. Bei Dachdeckungen aus Rohr oder Stroh hat die Befestigung auf nichtleitenden Stützen im Abstand von etwa 3 m und 0,5 m über der Dachfläche zu erfolgen. Dabei dürfen andere Metallteile in, auf oder bis 0,5 m unter der Dachfläche nicht vorhanden sein. Großflächige Metallteile an, auf und in den oberen Begrenzungen des Objektes, bei Gebäuden die Dachfläche, die nicht als Auffangeinrichtung vorgesehen sind, sind mit Anschlußleitungen zu verbinden. In nicht nullungsfähigen Netzen sind Konstruktionsteile, an denen elektrotechnische Betriebsmittel befestigt sind, z. B. Installationsständer, Antennenträger mit netzbetriebenen Antennenverstärkern, Sirenenständer, über Funkenstrecken mit einer Schlagweite von 30 bis

50 mm mit der Auffangeinrichtung zu verbinden. Auffangeinrichtungen, die nicht Konstruktionsteile des Objektes sind, sowie die Anschlußleitungen und Anschlußstellen sind bei der Errichtung durch geeignete Anstriche oder Isolierungen zu schützen. Kontaktkorrosion bei Verbindung von Metallteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen ist durch entsprechende Maßnahmen zu verhindern.

Tabelle 5.190: Auffang- und Ableiteinrichtungen, Anschlußleitungen

Halbzeug, Werkstoff	Mindestabmessungen	Anwendung	Bemerkung
Bewehrungsstähle in Beton	Durchmesser 8 mm		gilt nicht für Bewehrungsstähle in Beton
Bleche aus Aluminium oder Zink	Querschnitt 100 mm² Dicke 0,5 mm Querschnitt 100 mm² Dicke 0,8 mm	Auffangeinrichtungen, Ableiteinrichtungen	für Dachdeckungen unter Verwendung metallener Schichten; metallene Windverkleidungen ohne metallene Tragkonstruktion nur in BSKL 1 zulässig
Bleche aus Kupfer	Querschnitt 100 mm² Dicke 0,3 mm		
Bleche aus Stahl oder Stahl, verzinkt	Querschnitt 100 mm² Dicke 0,5 mm		bei plastbeschichteten Blechen, die als Auffangeinrichtung dienen, muß mit Zerstörung der Korrosionsschutzschicht gerechnet werden
Metallene Konstruktionen, Rohrleitungen, Aufzugsschienen	Querschnitt 100 mm²		gilt auch für Auffangrahmen mit einer Mindestdicke von 4 mm von Schornsteinen und Luftschächten
	Durchmesser 20 mm Länge 750 mm	Auffangstangen	für frei stehende und umbaute Schornsteine
		Ableiteinrichtungen	in der Rauchgaszone von frei stehenden und umbauten Schornsteinen[1])
Rundstahl, feuerverzinkt	Durchmesser 16 mm	Auffangstangen Anschlußfahnen	für Hausschornsteine und Dachhäute, die nicht beschädigt werden dürfen
	Durchmesser 10 mm	Ableiteinrichtungen	für frei stehende und umbaute Schornsteine
Stahldraht, feuerverzinkt	Durchmesser 8 mm	Auffangleitungen, Ableiteinrichtungen	
Bandstahl, feuerverzinkt	Breite 25 mm Dicke 2,5 mm Breite 30 mm Dicke 4 mm	Anschlußleitungen Anschlußfahnen	
Aluminiumdraht, blank oder eloxiert, Al 99,5	Durchmesser 10 mm	Auffangleitungen, Ableiteinrichtungen, Anschlußleitungen	nicht für Legung in Beton oder Mauerwerk
Kupferdraht, blank, E-Cu 99,9	Durchmesser 8 mm	Auffangleitungen, Ableiteinrichtungen, Anschlußleitungen	nur zulässig bei vorhandenen Kupferleitungen und Kupferteilen oder an schwer zugänglichen Stellen
Kupferband, Kupferseil, vieldrähtig	Querschnitt 16 mm²	Ableiteinrichtungen, Auffangleitungen	für Traglufthallen

[1]) Als *Rauchgaszone* gelten 3 m Länge ab Schornsteinmündung bei einem Mündungsdurchmesser bis 1,75 m, 5 m Länge bei einem Mündungsdurchmesser über 1,75 m.

Ableiteinrichtungen

Ableiteinrichtungen müssen im Normalfall an folgenden Stellen vorhanden sein:

bei Objekten der BSKL 1 und BSKL 2a
mit einer Breite bis 12 m und einer Länge bis 20 m an zwei diagonalen Eckpunkten,
mit einer Breite bis 12 m und einer Länge über 20 m an zwei Eckpunkten und wechselseitig im Abstand von höchstens 20 m,
mit einer Breite über 12 m und einer Länge bis 20 m an den vier Eckpunkten,
mit einer Breite über 12 m und einer Länge über 20 m zusätzlich am Umfang des Objektes im Abstand von höchstens 20 m,
im Inneren des Objektes in einem solchen Abstand, daß kein Punkt der Grundfläche weiter als 20 m von einer Ableiteinrichtung entfernt ist,
bei Objekten der BSKL 2b und BSKL 2c am Umfang im Abstand von höchstens 12 m und innerhalb des Objektes in einem solchen Abstand, daß kein Punkt der Grundfläche weiter als 12 m von einer Ableiteinrichtung entfernt ist.

Es sind mindestens zwei Ableiteinrichtungen anzuordnen. Die Forderungen gelten durch die Bauweise der Objekte in allen Blitzschutzklassen als erfüllt für

Metallkonstruktionen, z. B. Gerüste, Tragkonstruktionen von Gebäuden, Behälter, Rohre, Krane,
Metalleichtbauten,
Stahlbetonbauten.

Halbzeug, Werkstoff und Mindestabmessungen sind nach Tabelle 5.190 auszuwählen. Für die Verbindungsarten, die Befestigung zusätzlicher Ableiteinrichtungen und den Korrosionsschutz gelten die Forderungen im Abschn. Auffangeinrichtungen. An Schornsteinen mit Steigeisen und Rückenbügeln sind die Ableiteinrichtungen an diesen zu befestigen. Ableiteinrichtungen, die als Erdungsleitungen oder Schutzleiter elektrotechnischer Anlagen mitgenutzt werden sollen, müssen zusätzlich den Forderungen in TGL 200-0603 entsprechen (s. a. 5.3.8.1. und 5.3.7.3.).

Erdungseinrichtungen

Das Objekt muß mindestens auf einem Erdernetz stehen oder von einem Erder umgeben sein. Diese Forderung ist erfüllt, wenn

Fundamenterder in Streifen-, Platten-, Wannen-, Hülsen- oder Blockfundamenten vorhanden,
Maschenerder unter der Gründung eingebracht,
Steuererder für Räume der Tierhaltung nach TGL 200-0629 vorhanden,
Ringerder im Erdreich um das Objekt eingelegt

sind.

Als Fundamenterder gelten Erder, die nach 5.3.8.1. errichtet sind, und Konstruktionsteile, die im Fundament eingelassen oder mittels Ankerschrauben mit dem Fundament verbunden sind. Alle Einzelerder sind im Erd- oder Kellergeschoß miteinander zu verbinden. Die Mitbenutzung von Rohrleitungen

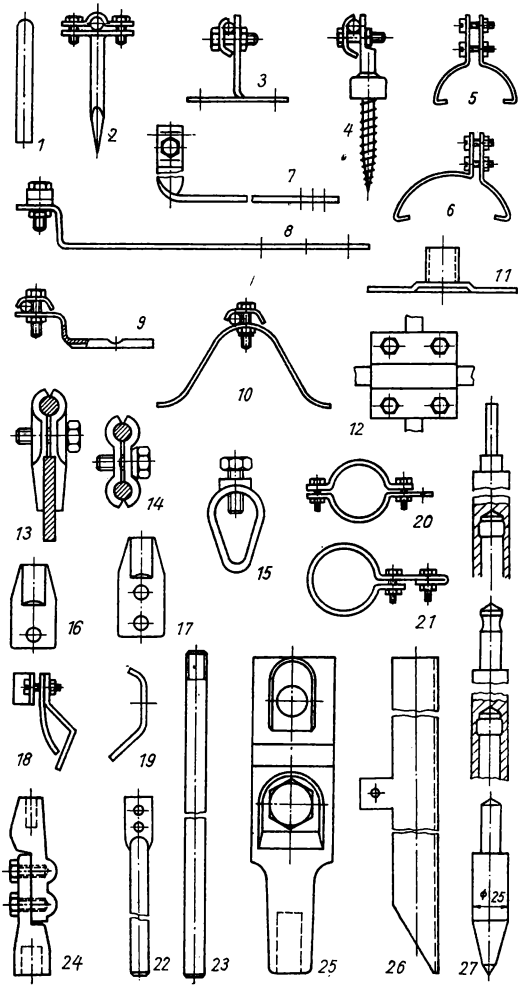


Bild 5.117. Blitzschutzarmaturen nach TGL 200-0512/01···14 (Auswahl)
1 Auffangstange, 2···10 Halter, 11 Dachdurchführung, 12···15 Leitungsverbinder, 16, 17 Endstücke, 18 Rinnenklemme, 19 Klemmstück, 20, 21 Rohrschellen, 22, 23 Erdeinführungsstangen, 24, 25 Prüfklemmen, 26 Winkelstaberder, 27 Rundstaberder

anstelle von Teilen eines Ring- oder Maschenerders ist zulässig. Kabelmäntel anstelle von Teilen eines Ring- oder Maschenerders sind unzulässig.
Halbzeug, Werkstoff, Mindestabmessungen, Verbindungsarten für Erdungseinrichtungen s. 5.3.8.1. und Bild 5.117. Trennstellen in Erdungseinrichtungen sind vorzusehen, wenn die Erdungseinrichtungen als Ring-, Maschen-, Band- oder Staberder ausgeführt sind oder die Ableiteinrichtungen zusätzlich zum Objekt hinzugefügt und der Gefahr einer mechanischen Beschädigung ausgesetzt sind. Erdungseinrichtungen, die vom Erdreich in Luft übergehen, müssen aus feuerverzinktem Stahldraht mit einem Durchmesser von mindestens 10 mm oder feuerverzinktem Bandstahl von mindestens 3 mm Dicke und 100 mm² Querschnitt ausgeführt werden. Bei mechanischer Beanspruchung ist feuerverzinkter Rundstahl von 16 mm Durchmesser zu verwenden, z. B. Erdeinführungsstangen entsprechend Bild 5.117. Die Erdungseinrichtungen und Potentialausgleichleitungen elektrotechnischer Anlagen des geschützten Objektes sind miteinander zu verbinden. Erdungsanlagen benachbarter Objekte sind an die Erdungseinrichtungen anzuschließen, wenn Näherungen bis auf 20 m bestehen. Das gleiche gilt für in das Objekt hineinführende Rohrleitungen und metallene Kabelmäntel.

5.8.3. Prüfen der Blitzschutzeinrichtungen

Gehören zur Blitzschutzeinrichtung Bewehrungsstähle, Stahlbetonfertigteile und Konstruktionselemente und sind deren Metallteile nach dem Bauablauf nicht mehr sichtbar oder nicht mehr zugänglich, so ist während des Bauablaufs durch Sichtprüfung festzustellen, ob die Festlegungen der Ausführungsunterlagen eingehalten worden sind. Die mitbenutzten Objektausrüstungen sind einer Sichtprüfung auf einwandfreien Zustand der Verbindungen und Anschlußleitungen und auf Übereinstimmung mit den Ausführungsunterlagen zu unterziehen. Bei zusätzlichen Auffang- Ableit- und Erdungseinrichtungen sind eine Sichtprüfung, eine mechanische und eine elektrische Prüfung vorzunehmen. Die mechanische Prüfung muß an zugänglichen Einrichtungen durch manuelle Verfahren, z. B. Abklopfen, Rütteln, erfolgen. Im Rahmen der elektrischen Prüfung ist festzustellen, ob die Blitzschutzanlage und die Anschlußleitungen elektrisch leitend verbunden sind. Der Nachweis ist mit einer Durchgangsprüfung mit oder ohne Auftrennen der Leitung zu erbringen. Durchgangsprüfung ohne Auftrennen der Leitung s. Bild 5.118, Beispiel einer Anlage für ein Wohnhaus s. Bild 5.119.

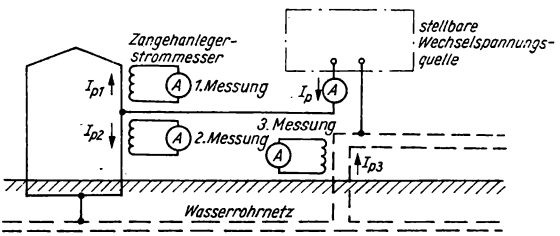


Bild 5.118. Durchgangsprüfung ohne Auftrennen der Leitung

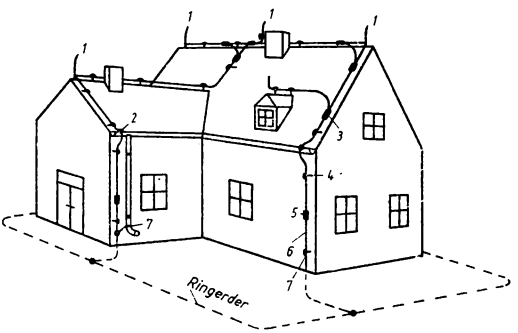


Bild 5.119. Beispiel einer Blitzschutzanlage für ein Wohnhaus
1 Auffangstange, 2 Klemmschuh, 3 Leitungsverbinder, 4 Leitungsstütze, 5 Endstück, 6 Erdeinführungsstange, 7 Halter für Erdeinführungsstangen

5.9. Elektrotechnische Anlagen für Kraftfahrzeuge

5.9.1. Allgemeines

Die elektrotechnische Anlage ist eines der wichtigsten Bestandteile eines Kraftfahrzeugs. Sie ist vor allem bedeutungsvoll für die Funktion des Fahrzeugs und für die Sicherheit im Straßenverkehr. Gegenwärtig beginnt oder vollzieht sich für eine Reihe

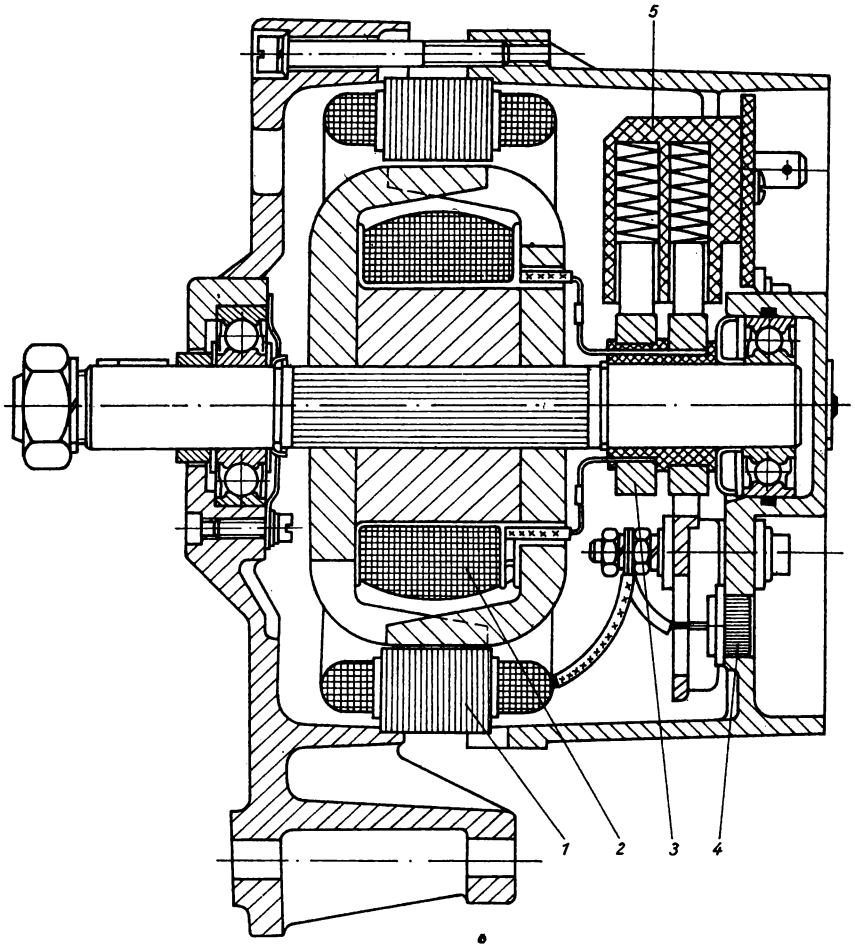


Bild 5.120. Drehstromlichtmaschine
1 Statorwicklung, 2 Rotorwicklung, 3 Schleifringe, 4 Dioden, 5 Kohlebürstenhalter

von Baugruppen der Kraftfahrzeuge der Übergang von der konventionellen, meist mechanischen Betätigung zur elektronischen Steuerung und Regelung, z. B. für die Zündanlage, zur Kraftstoffaufbereitung, zur optimalen Anpassung der Lichtmaschine an die Batterie, als Kabelbaumersatz durch Anwendung eines Multiplexsystems (gemeinsame elektrische Leitung).

5.9.2. Lichtmaschinen

Die in Kraftfahrzeugen vom Fahrzeugmotor mit 3500 bis 6000 min^{-1} meist durch Keilriemen angetriebenen Lichtmaschinen sind Drehstrom- oder, in älteren Fahrzeugen, Gleichstromlichtmaschinen. Die *Drehstromlichtmaschinen* (Leistung bei Pkw ≈ 500 W) sind als dreiphasige, vielpolige Synchrongeneratoren ausgelegt (Bild 5.120). Der erzeugte Wechselstrom wird in einer Dreiphasen-Brückenschaltung durch eingebaute Siliziumdioden gleichgerichtet (Bild 5.121). Der Erregerstrom wird der Erregerwicklung über den Spannungsregler und zwei Schleifringe zugeführt. Die Spannungsregelung erfolgt elektromechanisch oder elektronisch durch Beeinflussung des Erregerstromes. Eine Strombegrenzung entfällt bei Drehstromlichtmaschinen, da die Stromdrehzahlkurve durch die frequenzabhängigen Blindwiderstände der Maschine und die Ankerrückwirkung nach anfänglich steilem Verlauf abknickt und dann bis zu den höchsten Drehzahlen (10000 min^{-1}) nur eine sehr flache Steigung aufweist. Drehstromlichtmaschinen dürfen zur Vermeidung von Diodenschäden nicht ohne Regler oder Batterie betrieben werden. Die *Vorteile* gegenüber den Gleichstromlichtmaschinen bestehen in ihrer großen Betriebssicherheit, hohen Lebensdauer, ihrer Leistungsabgabe innerhalb eines größeren Drehzahlbereiches (bisher 1:3,3, jetzt 1:5), einer größeren Überlastbarkeit, geringen Masse und einem geringen Wartungsbedarf.

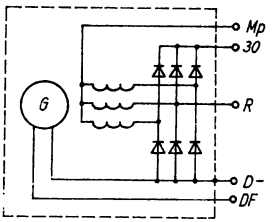


Bild 5.121. Schaltung einer Drehstromlichtmaschine
Mp/R Anschluß für Ladekontrolle, 30 Batterieanschluß +, D− Masseanschluß, DF Regleranschluß

Die *Gleichstromlichtmaschinen* (Leistung bei Pkw ≈ 220 W) sind Nebenschlußmaschinen, deren Klemmenspannung durch einen im Erregerstromkreis liegenden und durch eine Spannungs- und Stromspule beeinflußten Reglerschalter in einem weiten Drehzahlbereich nahezu konstant gehalten wird (Bild 5.122).

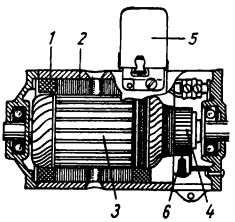


Bild 5.122. Gleichstromlichtmaschine
1 Erregerwicklung, 2 Polschuh, 3 Läufer, 4 Kommutator, 5 Stellerschalter, 6 Bürste

Beide Lichtmaschinenarten sind mit einer Akkumulatoren-Batterie parallelgeschaltet, die bei stillstehendem und langsam laufendem Motor den Strom für die Beleuchtung, den Anlasser, die Zündung usw. liefert. Bei genügend schnell laufendem Motor (bei Drehstromlichtmaschinen bereits bei Leerlaufdrehzahl) übernimmt die Lichtmaschine die Stromversorgung und lädt gleichzeitig die Batterie. Sinkt die Maschinenspannung unter die Batteriespannung, so trennt der automatische Reglerschalter die Verbindung. Damit wird eine Entladung der Batterie über die Gleichstromlichtmaschine verhindert. Bei Drehstromlichtmaschinen übernehmen diese Funktion die eingebauten Dioden.

5.9.3. Anlasser

Anlaßmotoren sind entweder Doppelschluß- oder Reihenschlußmotoren mit hohem Drehmoment und einer Leistung von ≈ 0,4···11,0 kW (für Pkw und Lkw).

Schubschraubtriebanlasser

Beim Betätigen des im Anlasser eingebauten elektromagnetischen Schalters wird ein Ritzel auf einem Steilgewinde zum Einspuren mit der Schwungradverzahnung des Fahrmotors gebracht und gleichzeitig der Anlaßmotor eingeschaltet (Bild 5.123). Der sofort einsetzende Strom bewirkt damit ein kräftiges Durchdrehen des Fahrmotors. Nach dem Anspringen des Motors und dem Ausschalten des Zugmagneten wird das Ritzel durch eine Rückzugfeder in seine Ausgangsstellung zurückgeführt.

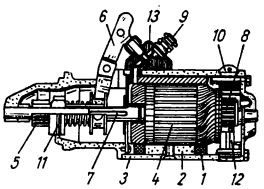


Bild 5.123. Schubschraubtriebanlasser
1 Feldwicklung, 2 Polschuh, 3 Polgehäuse, 4 Anker, 5 Ritzel, 6 Hebel, 7 Läuferwelle, 8 Kommutator, 9 Anschlußklemme, 10 Verschlußband, 11 Freilauf, 12 Bürste, 13 Magnetschalter

Anlasser mit verschiebbarem Anker

Der Anlaßmotor ist ein *Reihenschlußmotor* mit hohem Drehmoment, dessen Anker mit dem Ritzel in seinen Lagern verschiebbar ist (Bild 5.124). Der Rückstellfeder, die den Anker aus seiner Mittellage und damit das Ritzel außer Eingriff bringt, wirkt eine Hilfsfeld-Reihenschlußwicklung entgegen, die beim Betätigen des Anlaßschalters den Anker in das Feld hineinzieht und ihn gleichzeitig langsam dreht. Hat das Ritzel in den Zahnkranz des Schwungrads eingegriffen, so schaltet ein in den Motor eingebauter elektromagnetischer Schalter die Haupt-Reihenschlußwicklung des Anlaßmotors hinzu, wodurch der Fahrmotor mit voller Kraft angedreht wird. Nach den ersten Zündungen nimmt die Leistung des Anlaßmotors und damit die Feldstromstärke sehr schnell ab; die Kraft der Rückstellfeder überwiegt die Einzugskraft des Motorfelds und bringt das Ritzel außer Eingriff. Solange der Schalter noch betätigt wird, läuft der Anlaßmotor außer Eingriff leer weiter.

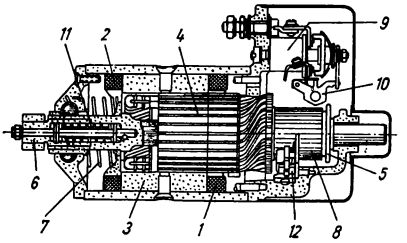


Bild 5.124. Anlasser mit verschiebbarem Anker
1 Hauptstromwicklung, 2 Hilfswicklung, 3 Polschuh, 4 Anker, 5 Auslösescheibe, 6 Ritzel, 7 Feder, 8 Kommutator, 9 Magnetschalter, 10 Sperrklinke, 11 Federband-Reibungskupplung, 12 Bürste

5.9.4. Leistungsbedarf der wichtigsten elektrotechnischen Einrichtungen

In Tabelle 5.191 sind Daten zum Leistungsbedarf zusammengestellt.

Tabelle 5.191: Leistungsbedarf elektrotechnischer Einrichtungen

Einrichtung	Leistungsbedarf
Anlasser für Pkw	0,4···2,5 kW
Anlasser für Lkw	2···11 kW
Scheinwerfer-Fernlicht, Nebelscheinwerfer je Lampe	55 W
Abblendlicht je Lampe	25···50 W
Standlicht je Lampe	4···10 W
Bremslicht, Blinklicht, Nebelschlußleuchte je Lampe	21 W
Seitenleuchten je	10 W
Innenraum-, Armaturenbrett-, Kennzeichen-, Schlußleuchten je	5 W
Batteriezünder	15 W
Anlaßzündkerzen je	60···70 W
Horn, Zweiklang-Fanfare	25···60 W
Scheibenwischermotor	15 W
Heizscheibe	30···70 W
Gebläsemotor	30 W
Radio	10···20 W
Zigarettenanzünder	100 W

5.9.5. Beleuchtungsanlage

Scheinwerfersysteme

An die Scheinwerfersysteme müssen wegen der hohen Fahrgeschwindigkeiten und der ständig ansteigenden Verkehrsdichte hohe Anforderungen gestellt werden. Insbesondere trifft das für ein gutes Ausleuchten der Fahrbahn, für das rechtzeitige Erkennen von Hindernissen, Kurven und Verkehrszeichen sowie für ein blendungsfreies Fahren zu. Daten zu Scheinwerfersystemen der in der DDR zugelassenen Kraftfahrzeuge gibt Tabelle 5.192 (s. S. 435).
Weitere Scheinwerfersysteme, z. B. das Teilfernlicht und der Doppelscheinwerfer, haben sich bis heute nicht umfassend durchsetzen können.

Zusatzscheinwerfer

Neben den Hauptscheinwerfern kommen zur Beleuchtung der Fahrbahn noch Nebelscheinwerfer, Kurvenstrahler, Fernscheinwerfer sowie Weitstrahler, jeweils mit Halogenglühlampen bestückt, zum Einsatz. Für das Anbringen und Betreiben gelten besondere Festlegungen.

Tabelle 5.192: Daten von Scheinwerfersystemen

Scheinwerfersystem	Lampe	Nennspannung	Nennleistungsaufnahme		Werte bei Prüfspannung						Lampensockel	Farbe des Glaskolbens	Bemerkungen
					Prüfspannung	Lichtstrom in lm			Mittlere Lebensdauer in h Nennwert				
			Fernlicht	Abblendlicht		Fernlicht	Abblendlicht		Fernlicht	Abblendlicht			
		V	W	W	V	min.	min.	max.					
Asymmetrisches Abblendlicht TGL 11413/01 (Europäisches asymmetrisches System für Rechtsverkehr)	Bilux-Lampe (auswechselbar), erste Wendel im Brennpunkt eines Parabolspiegels (Fernlicht), zweite Wendel oberhalb der ersten, dazwischen Abblendkappe zum Verhindern der Lichtausstrahlung in die untere Hälfte des Scheinwerfers. Damit wird nur der unmittelbar vor dem Fahrzeug liegende Teil der Fahrbahn beleuchtet (Abblendlicht). Durch einseitiges Verkürzen der Abblendkappe wird beim Abblenden ein ungleichmäßiges Beleuchten der Fahrbahn in der Form erreicht, daß die rechte Fahrbahnhälfte auf eine größere Entfernung als die linke beleuchtet wird. Vorteile: zeitigeres Erkennen von Verkehrszeichen, Kurven, Fußgängern usw. als beim symmetrischen Abblendlicht. Vor der Lampe befindet sich eine Streuscheibe zum Verbessern der Lichtverteilung.	6 12 24	45 55	40 50	6,3 28,0	600	400	550	75	150	P 45 t 41 TGL RGW 783	farblos klar	in Kraftfahrzeugen aus der Produktion der DDR fast ausschließlich eingebaut, außerdem im Pkw Typ Moskwitsch mit Rechteckscheinwerfern, im Pkw Typ Skoda und Lada
Symmetrisches Abblendlicht TGL 11413/02	Bilux-Lampe (auswechselbar), Prinzip wie beim asymmetrischen Abblendlicht; Abblendkappe nicht einseitig verkürzt, deshalb gleich weites Beleuchten der Fahrbahnhälften	6 12	15 25 35	15 25 35	6,75 6,3 13,5	180 350 520	125 250 375	190 375 560	100	160	BAX 15 d BA 20 d TGL RGW 783	farblos klar	für Kraftfahrzeuge aus der Produktion der DDR fast völlig durch asymmetrisches Abblendlicht ersetzt
Sealed-Beam-Abblendlicht	Bilux-Lampe (je nach Bauweise auswechselbar oder nicht), erste Wendel wie beim asymmetrischen Abblendlicht (Fernlicht), zweite Wendel seitlich versetzt oberhalb der Fernlichtwendel; damit ähnliche Wirkung wie beim asymmetrischen Abblendlicht; Nachteile: große Blendwirkung, höhere Lampenleistung	6 12	in der DDR nicht standardisiert										in älteren Importfahrzeugen eingebaut

Tabelle 5.193: Gegenüberstellung technischer Daten von Halogen- und Normalglühlampen ( )

Nennwerte		Prüfwerte bei Prüfspannung			Kolbendurchmesser	Gesamtlänge	Durchmesser des Sockelringes
Spannung	Leistungsaufnahme	Prüfspannung	Lichtstrom	Mittlere Lebensdauer			
V	W	V	lm	h	mm	mm	mm
6 (6)	55 (45)	6,3 (6,3)	1050 (600)				
12 (12)	55 (45)	13,2 (13,2)	1450 (600)	150 (100)	11,5 (41)	42 (82)	22,5 (45)
24 (24)	70 (55)	28 (28,0)	1750 (600)				

Nebelscheinwerfer sind so konstruiert und so am Kraftfahrzeug anzubringen, daß ein gleichmäßig helles, in die Breite gerichtetes Lichtband ausgestrahlt wird. Damit können auch bei dichtem Nebel Straßenränder, -begrenzungen, Verkehrszeichen, Hindernisse usw. erkannt werden. Ein vor der Glühlampe angebrachter spezieller Abdeckschirm verhindert den Austritt von direktem Licht. Gleichzeitig wird damit ein Anleuchten des Nebels von unten und damit ein Verschlechtern der Sicht auf Fahrbahnmarkierungen verhindert. Die Farbe der Streuscheibe (weiß oder gelb) hat auf die Wirkung des Scheinwerfers keinen oder nur geringen Einfluß.

Kurvenstrahler sollen ein besseres Ausleuchten der Fahrbahn bei Richtungsänderungen bewirken. Besonders trifft das für das Befahren von engen Rechtskurven zu.

Einsatz von Halogenglühlampen

Durch den Einsatz der Halogenglühlampe (Prinzip der Lichterzeugung sowie Aufbau und Vorteile vgl. 5.5.3.1.) ergeben sich für die Beleuchtungsanlage der Kraftfahrzeuge wesentliche Vorteile. Auf Grund der großen Lichtleistung und einer geeigneten Konstruktion der Scheinwerfer ist es möglich, die Fahrbahn einschl. der Ränder optimal zu beleuchten. Das bedeutet eine bisher nicht erreichte gute Sicht bei allen Wetterbedingungen, vor allem bei Nebel und Schneefall, und damit größere Sicherheit bzw. das Fahren mit höheren Geschwindigkeiten. In Tabelle 5.193 werden die wichtigsten technischen Daten einer Halogenglühlampe nach TGL 200-8188/02 und einer Normalglühlampe für asymmetrisches Abblendlicht nach TGL 11413/01 verglichen. Dabei sind die Werte der Normalglühlampe in Klammern gesetzt.

Lebensdauer von Glühlampen für Kraftfahrzeugscheinwerfer

Die in Tabelle 5.193 angegebene Lebensdauer gilt für die entsprechenden Prüfspannungen. Bei darunter- oder darüberliegenden Werten ergeben sich erhebliche Abweichungen bezüglich der Lebensdauer und des Lichtstroms (s. Tabelle 5.194).

Tabelle 5.194: Lebensdauer und Lichtstrom bei unterschiedlichen Netzspannungen

Netzspannung %	Lebensdauer %	Lichtstrom %
85	1000	53
90	440	67
95	210	83
100	100	100
105	50	120
110	25	145
120	6	200

Bremslichtkontrolle

Eine einfache Bremslichtkontrolle am Armaturenbrett des Kraftfahrzeuges läßt sich mit einem Kontrollrelais, einer -lampe und einem GEKO-Kontakt[1]) durchführen. Der Vorteil des Relais liegt nicht nur darin, daß bei Ausfall einer oder beider Bremsleuchten die Kontrollampe verlischt, sondern es werden auch alle dazugehörigen Leitungen überwacht. Es ist wichtig, bei der Auswahl des Relais auf einen richtig dimensionierten GEKO sowie auf eine den Erfordernissen entsprechende Windungszahl der den GEKO umgebenden Spule zu achten. Beim GEKO sind die Toleranzen des Kontakts sowie die Bordspannung des Fahrzeugs zu beachten, während bei der Spule die Leistung und die Toleranzen der zu überwachenden Leuchten und der Spannungsabfall über den Zuleitungen wichtig sind. GEKO können auch zur Kontrolle anderer elektrotechnischer Einrichtungen, z. B. Blinklicht, Rücklicht, Heizung, eingesetzt werden. Dabei ist jedoch auf die jeweilige Betriebsart (Dauerbetrieb, Kurzzeitbetrieb usw.) zu achten und der notwendige Drahtdurchmesser auszuwählen.

Warnblinkanlage

Im Bild 5.125 ist eine Warnblinkanlage[2]) für den Anschluß an die bereits im Fahrzeug vorhandene Fahrtrichtungsblinkanlage dargestellt. Mit dieser Schaltung ist es durch den Einsatz eines zusätzlichen, serienmäßigen Blinkgebers, eines Umschalters sowie einer Kontrollampe möglich, alle geforderten Bedingungen zu erfüllen. Der Einbau ist auch in Importfahrzeuge

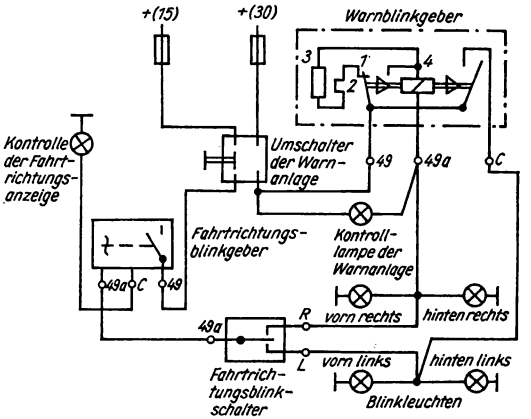


Bild 5.125. Schaltung einer Warnblinkanlage

möglich. Beim Einschalten der Warnanlage wird die Verbindung von der Sicherung 15 (spannungführend nur bei eingeschalteter Zündung) zum Fahrtrichtungsblinkgeber unterbrochen. Der Warnblinkgeber (Klemme 49) erhält über die Sicherung 30 (ständig spannungführend) Strom, der durch den Blinkanker 1, den Hitzdraht 2, den Vorwiderstand 3, die Stromspule 4 über Klemme 49a zu den Blinkleuchten der rechten Seite fließt. Der Hitzdraht 2, der den Blinkanker 1 in kaltem Zustand offenhält, erwärmt sich, dehnt sich aus, und die Stromspule 4 zieht den Blinkanker 1 an. Der Strom fließt nun vom Blinkanker 1 über die Kontakte direkt in die Stromspule und zu den Blinklampen, die jetzt aufleuchten. Gleichzeitig zieht die Stromspule den Kontrollanker 5 an, der die an Klemme C angeschlossenen Blinkleuchten der linken Fahrzeugseite einschaltet. Inzwischen kühlt sich der bei angezogenem Blinkanker kurzgeschlossene Hitzdraht wieder ab. Er zieht sich zusammen und löst den Blinkanker 1 vom Magnetkern der Stromspule 4. Die Blinklampen verlöschen, weil nun wieder

[1]) Beschreibung und Wirkungsweise der GEKO-Kontakte s. 4.2.1.

[2]) Diese Schaltung ist patentiert unter WP 63 c/130 705.

der Hitzdraht und der Vorwiderstand wirksam sind, die den Stromfluß reduzieren. Auch der Kontrollanker 5 fällt dabei vom Magnetkern ab und unterbricht die Verbindung zur Klemme C.

5.9.6. Batterieschutz durch Rückstrom-Schutzdiode

Wie bekannt, wird die Lichtmaschine eines Kraftfahrzeugs erst dann zum Laden der Batterie benutzt, wenn ihre Spannung größer als die der Batteriespannung ist. Dabei bestimmt die Größe des Spannungsgefälles den Ladestrom von der Lichtmaschine zur Batterie. Beim Sinken der Lichtmaschinenspannung unter den Wert der Batteriespannung — beim Leerlauf oder bei defekter Lichtmaschine — kommt es zum Fließen eines unerwünschten Entladestroms von der Batterie zur Lichtmaschine. Dieser ist ebenfalls vom vorhandenen Spannungsgefälle abhängig. Er beträgt bei 6-V-Anlagen etwa 5···8 A und bei 12-V-Anlagen 3···5 A. Um ihm vorzubeugen, wird zwischen Batterie und Lichtmaschine ein Rückstromschalter eingebaut, der bei einem Rückstrom den Stromkreis unterbricht. Dabei wirkt sich das besonders im Stadt- und Kurzstreckenverkehr häufige Betätigen des Rückstromschalters ungünstig auf die Lebensdauer der Batterie aus, da der genannte Schalter einen hohen Ansprechstrom besitzt und damit häufiges Entladen der Batterie, verbunden mit schnellem Verschleiß, die Folge ist. Diesem Nachteil kann durch Einbau einer Diode[1]), die bereits bei einem Rückstrom von wenigen Milliampere unterbricht, begegnet werden. Tabelle 5.195 führt die dafür einsetzbaren Dioden auf.

Tabelle 5.195: Rückstrom-Schutzdioden

Typ	GY 120	GY 121	SY 160	SY 170
Sperrspannung in V	20	40	50	100
Durchlaßstrom in A	10	10	10	25
Spitzenstrom in A	32	32	100	100
Sperrstrom in mA	2	2	3	8
Spannungsabfall in Durchlaßrichtung in V	0,6	0,6	0,65	0,75

Bei 6-V-Anlagen und Verwenden der GY 120, GY 121 oder SY 160 ist zu beachten, daß jeweils zwei Dioden parallelgeschaltet werden, weil sonst die Einzeldiode durch die über 10 A liegenden Ladeströme zerstört werden würde. Dabei sollten beim Parallelschalten Dioden mit annähernd gleichen Kenndaten verwendet werden, um eine gleichmäßige Stromverteilung zu gewährleisten. Obwohl die Siliziumdioden (SY 160, SY 170) einen größeren Spannungsabfall als die Germaniumdioden (GY 120, GY 121) aufweisen, sollte ihnen wegen ihrer Zuverlässigkeit der Vorzug gegeben werden, da sie robuster und für Umgebungstemperaturen von −55 ··· +125 °C gebaut sind. Der Einbau der Dioden erfolgt zwischen Batterie und Regler so, daß beim Absinken der Lichtmaschinenspannung unter den Wert der Batteriespannung kein Rückstrom zum Regler fließen kann. Um die Dioden gut zu kühlen, sind Kühlbleche anzubringen.

5.9.7. Zündkerzen, Hochleistungszündspulen

Eine für moderne Hochleistungsverbrennungsmotoren geeignete *Zündkerze* zeigt Bild 5.126. Zündkerzen werden u. a. in Abhängigkeit von der Motorcharakteristik und der Fahrweise ausgewählt. Wichtigstes Merkmal ist dabei der *Wärmewert*. Er kennzeichnet die Fähigkeit einer Zündkerze, die beim Betrieb des Motors entwickelte Verbrennungswärme unter Vollast so über die in den Brennraum hineinragenden Zündkerzenteile abzuführen, daß die Temperatur dieser Teile einen bestimmten Wert nicht überschreitet. Zündkerzen mit den Gewinden M 14 und M 18 stehen in der Wärmewertreihe 95, 125, 145, 175, 200, 225, 240, 260 zur Verfügung. Es ist der Wärmewert richtig, bei dem sich während des Motorbetriebes an den in den Brennraum hineinragenden Zündkerzenteilen Temperaturen von 450···850 °C einstellen. Ist der Wärmewert zu niedrig gewählt, können sich unzulässig hohe Temperaturen einstellen, die zu Motorschäden führen. Bei zu hohem Wärmewert bleibt die Zündkerze zu kalt, verrußt, und es kommt zu Zündaussetzern.

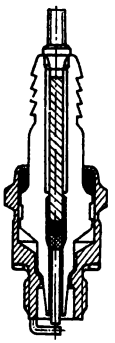


Bild 5.126. Zündkerze

Mit Hochleistungszündspulen lassen sich Startverhalten, Kraftstoffverbrauch und Verbrennungsablauf von Zweitakt- und Viertaktmotoren wesentlich verbessern, da mit diesen Zündspulen kräftigere Zündfunken und eine Erhöhung der Funkenzahl je Minute möglich sind. In Tabelle 5.196 sind technische Daten von drei Ausführungen der Zündspulen gegenübergestellt.

Tabelle 5.196: Technische Daten von Zündspulen

Spulentyp	Kleinzündspule	Normalausführung	Hochleistungsspule
Durchmesser in mm	40	63	63
Anlaßfunkenlänge in mm (bei 3 V und 300 Funken/min)	4	7	10
Betriebsfunkenlänge in mm (bei 6 V und 300 Funken/min)	9	12	15
Höchstfunkenzahl/min (bei 6 V und 6 mm Funkenlänge)	8000	12000	14000

Beim Verwenden von Hochleistungszündspulen empfiehlt es sich, den Elektrodenabstand der Zündkerzen zu erhöhen (bis 1,0 mm), da damit eine maximale Leistungssteigerung erreicht und gleichzeitig einer Brückenbildung zwischen den Elektroden der Zündkerzen entgegengewirkt wird.
Diese Maßnahme ist völlig unkritisch, da der Zündfunke ausreichend groß ist. In diesem Zusammenhang ist interessant, daß Zweitaktmotoren bei geringer Belastung mehr Zündspannung als bei Vollgas benötigen. Beim Viertaktmotor ist es umgekehrt. Einen Vergleich zeigen die Bilder 5.127 und 5.128.
Dieser Effekt ist durch die je nach Motorprinzip wirkenden Einflüsse, z. B. Gemischbildung, Gasströmung, Temperaturzustand, Verdichtung, Funkenfolge, erklärbar. Eine weitere

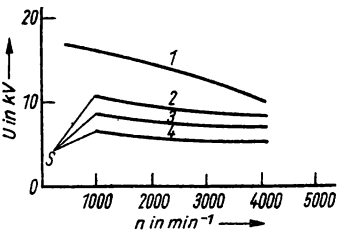


Bild 5.127. Zündspannungsbedarf beim 2-Takt-Motor
1 maximales Spannungsangebot der Zündanlage, 2 Standgas, 3 halbe Last, 4 Vollgas; *S* Spannungsbedarf an den Kerzenelektroden

[1]) Aufbau und Wirkungsweise von Dioden s. 2.5.8.···2.5.12.

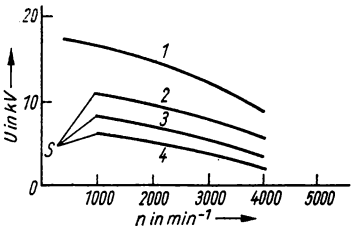


Bild 5.128. Zündspannungsbedarf beim 4-Takt-Motor
1 maximales Spannungsangebot der Zündanlage, 2 Vollgas, 3 halbe Last, 4 Standgas; *S* Spannungsbedarf an den Kerzenelektroden

Rolle spielt dabei auch das Absinken des Spannungsangebots mit steigender Drehzahl. Dadurch kann es beim Beschleunigen im 1. Gang zum plötzlichen Aussetzen der Zündung kommen. Mit dem Einbau von Hochleistungszündspulen steht ein derart großes Spannungsangebot zur Verfügung, so daß diese Erscheinung völlig ausgeschaltet ist.
Ein Auswechseln der serienmäßig eingebauten Batterien gegen leistungsstärkere ist nicht erforderlich. Das gleiche gilt für die Unterbrecherkontakte.

5.9.8. Spezialzündanlagen

Transistorzündanlage

Der herkömmlichen Art des Zündens von explosiblen Kraftstoff-Luft-Gemischen mit Zündspulen haften folgende Nachteile an:

1. hohe Belastung der Unterbrecherkontakte,
2. Absinken der Zündspannung bei zunehmender Drehzahl,
3. kein plötzliches Abheben der Unterbrecherkontakte bei niedrigen Drehzahlen und damit kein ausreichender Zündfunke,
4. starkes Korrodieren der Unterbrecherkontakte.

Diese Nachteile können mit einer Transistorzündanlage ausgeschaltet werden.
Das Prinzip der Transistorzündanlage besteht im Verwenden eines Leistungstransistors, der die mechanisch betätigten Unterbrecherkontakte entlastet (bis zu 80%) und gleichzeitig den Zündspannungsverlauf verändert (Bild 5.129).

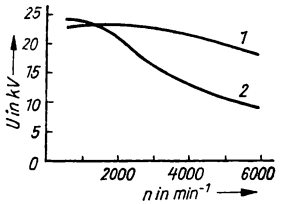


Bild 5.129. Sekundärspannungsverlauf einer Transistor- (1) und einer Spulenzündanlage (2)

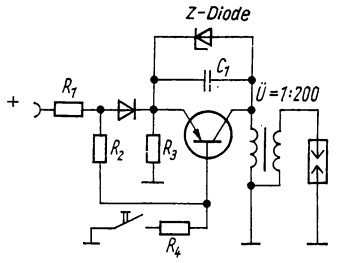


Bild 5.130. Schaltung einer Transistorzündanlage

Dem Bild 5.129 ist eindeutig zu entnehmen, daß bei hohen Drehzahlen die angebotene Zündspannung gegenüber geringen Drehzahlen nur geringfügig absinkt. Gleichzeitig werden durch die Transistorzündanlage bei extrem niedrigen Drehzahlen gleichmäßigere Sekundärspannungsimpulse erzeugt. Damit wird das Kaltstart- und Leerlaufverhalten des Motors günstig beeinflußt. Durch die größere Zündspannung ist, wie beim Verwenden der Hochleistungszündspule, das Vergrößern der Elektrodenabstände der Zündkerzen bis auf 1,0 mm möglich. Bild 5.130 zeigt die Prinzipschaltung einer Transistorzündanlage. Als Nachteile dieser Anlage müssen genannt werden:

a) Verwenden einer Zündspule mit einem Übersetzungsverhältnis bis 1:200 (konventionelle Zündspule bis 1:80),

b) Leistungsaufnahme nicht geringer als bei herkömmlicher Zündanlage,

c) Flankensteilheit der Zündspannung kann nur in bestimmten Grenzen verbessert werden,

d) höhere Anschaffungskosten als bei konventioneller Zündanlage.

Kondensatorzündanlage (Thyristorzündanlage)

Einen weiteren wesentlichen Fortschritt stellt die Kondensatorzündanlage dar. Bei dieser Anlage wird der bisher verwendete induktive Energiespeicher durch einen kapazitiven ersetzt und damit ein sehr steiler Zündspannungsanstieg erreicht.
Bild 5.131 zeigt die Prinzipschaltung einer Kondensatorzündanlage.
Im Bild 5.132 wird der Spannungsanstieg bei der Kondensatormit dem bei der Spulenzündung verglichen.

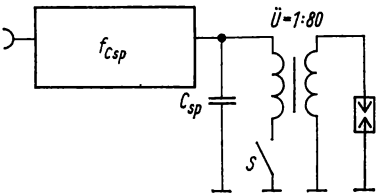


Bild 5.131. Schaltung einer Kondensatorzündanlage
f_{Csp} Gleichspannungserzeugung, C_{sp} Speicherkondensator, S Steuerkontakt

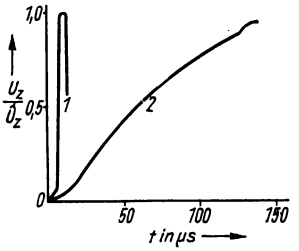


Bild 5.132. Sekundärspannungsanstieg bei
(1) Kondensatorzündung ($\approx$ 8 kV/µs) und
(2) Spulenzündung ($\approx$ 350 V/µs)

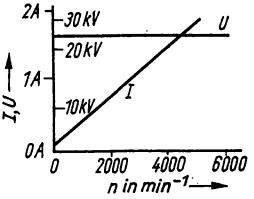


Bild 5.133. Strom- und Spannungsverlauf bei einer Kondensatorzündanlage
U Zündspannung, *I* Stromaufnahme des Zündsystems

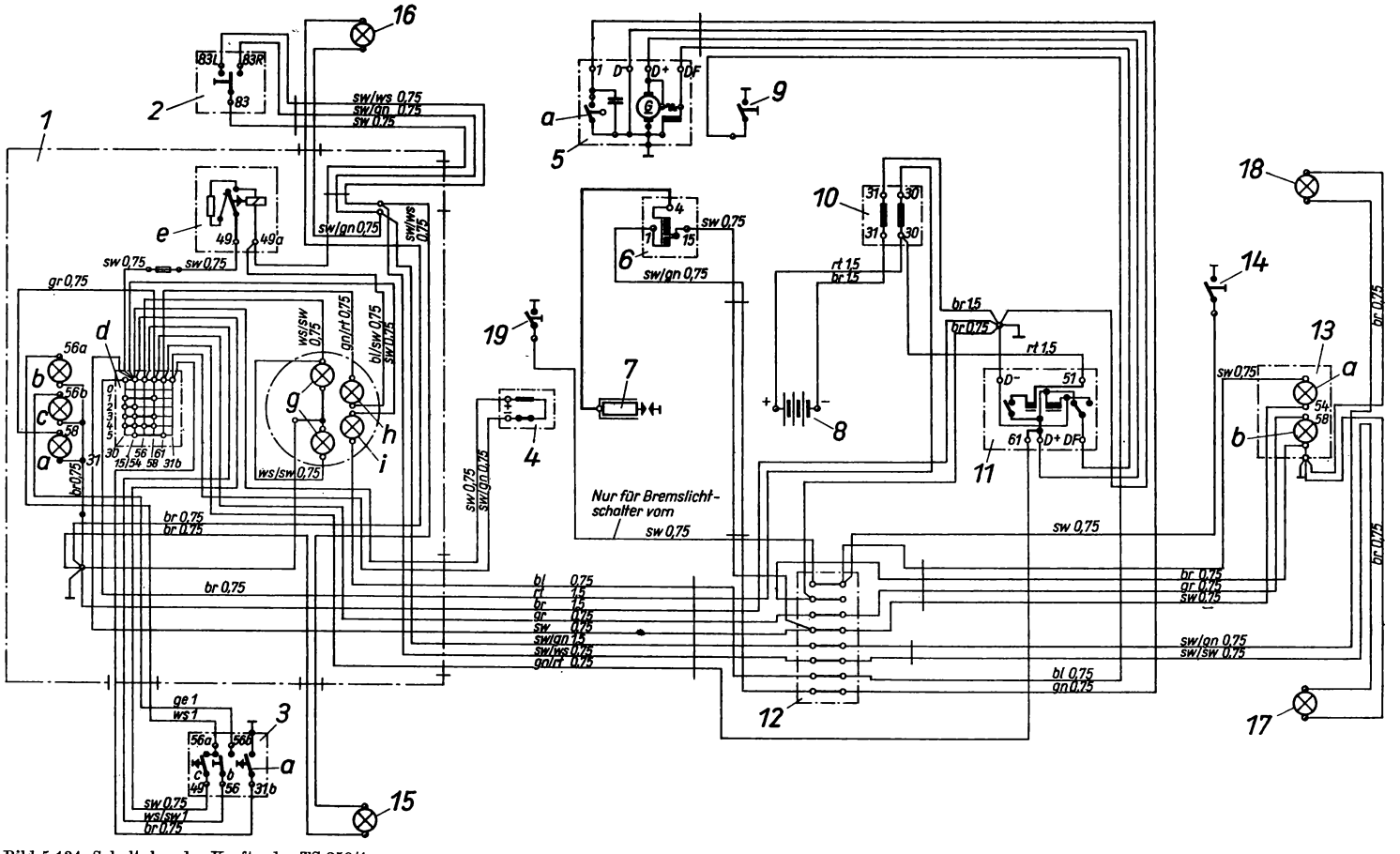
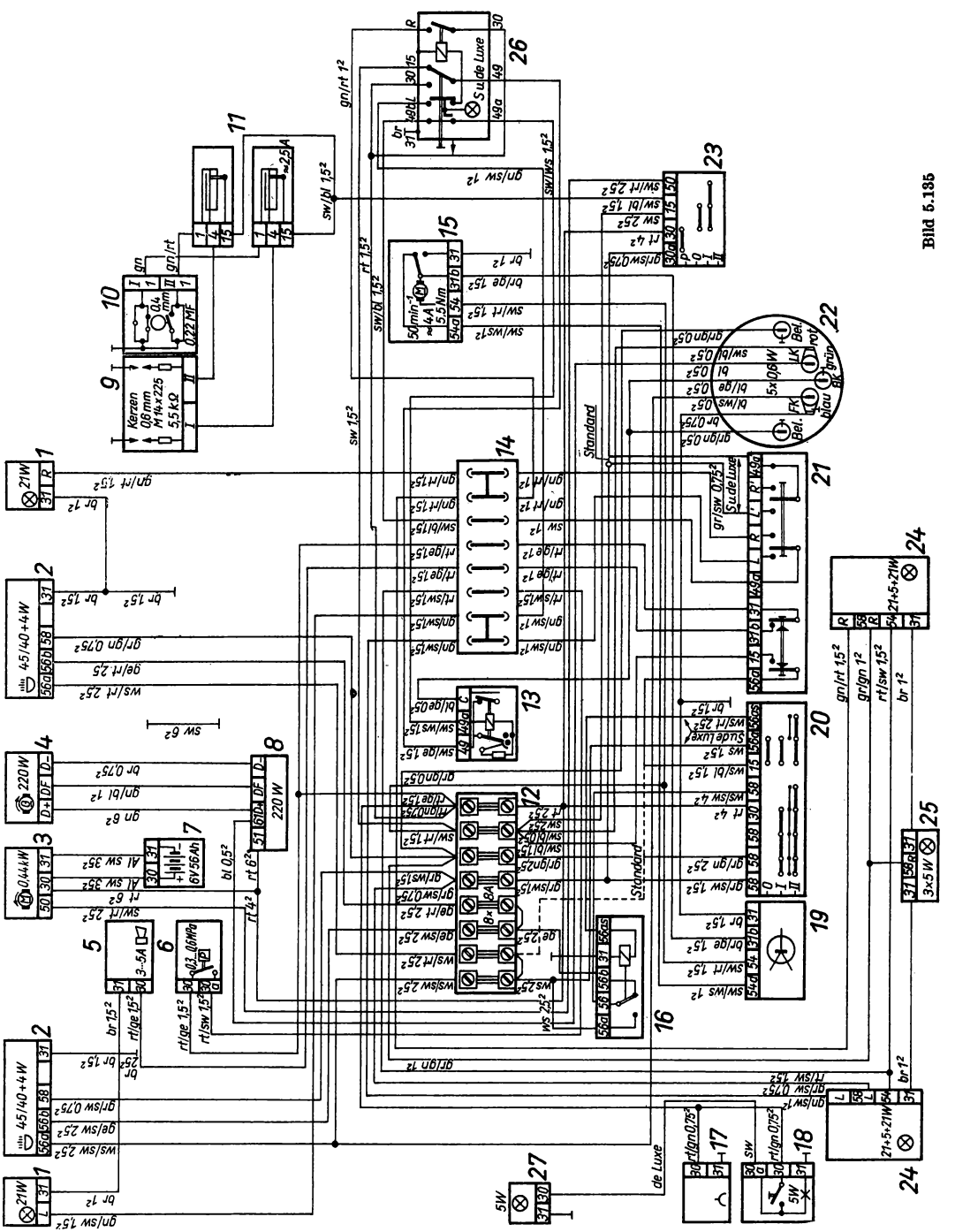


Bild 5.134. Schaltplan des Kraftrades TS 250/1
1 Scheinwerfer, 1 a Standlicht, 1 b Fernlicht, 1 c Abblendlicht, 1 d Zündlichtschalter, 1 e Blinkgeber, 1 f Tachobeleuchtung, 1 g Ladekontrolleuchte und Blinkkontrolle, 1 h Leerlaufkontrolleuchte, 1 i Buchsenklemmleiste, 2polig, 2 Blinkschalter, 3 komb. Abblendschalter, 3 a Signalhorndruckknopf, 3 b Abblendschalter, 3 c Lichthupendruckknopf, 4 Signalhorn, 5 Lichtmaschine, 5 a Unterbrecher, 6 Zündspule, 7 Zündkerze, 8 Batterie, 9 Leerlaufschalter, 10 Sicherungsdose, 11 Reglerschalter, 12 Buchsenklemmleiste, 2polig, 13 Brems-Schluß-Kennzeichen-Leuchte, 13 a Bremsleuchte, 13 b Schluß- und Kennzeichenleuchte, 14 Bremslichtschalter, 15 Blinkleuchte, vorn links, 16 Blinkleuchte, vorn rechts, 17 Blinkleuchte, hinten links, 18 Blinkleuchte, hinten rechts


Kerzen
Standard
de Luxe
Bel.
LK
FK
rot
blau
grün
Bild 5.135

Der steile Spannungsanstieg wirkt sich besonders günstig aus auf Zündstörungen durch Nebenschlüsse, wie sie durch verrußte und verölte Zündkerzen auftreten können. Als weitere Vorteile sind zu nennen: das immer gleichmäßige Aufladen des Kondensators und damit bei allen Drehzahlen Zündfunken mit gleichem Energieinhalt, eine der Drehzahl proportionale Stromentnahme (Bild 5.133), d. h., beim Starten wird der Batterie nur eine geringe Energiemenge entnommen, sowie eine geringe Belastung (bis 60 mA) des Steuerkontakts.
Die bisher entwickelten Kondensatorzündanlagen wurden meist mit einem Thyristor bestückt, der die Funktion eines Steuerkontakts hatte. Um die Anlage weiter zu verbilligen, läßt sich anstelle des Thyristors auch eine Kaltkatoden-Leistungsschaltröhre verwenden.
Die Bilder 5.134 und 5.135 enthalten Schaltpläne für Krafträder und Pkw.

5.9.9. Steckverbinder

Zur Stromversorgung der elektrischen Einrichtungen von Anhängefahrzeugen werden 7polige Steckverbinder (nach TGL 27292) verwendet. Kennwerte s. Tabelle 5.197.

Tabelle 5.197: Kennwerte für 7polige Steckverbinder

Bezeichnung der Kontakte	Zuordnung	Nennstrom A	Leiternennquerschnitt mm²
L	Fahrtrichtungsanzeiger, links	2,5	
54g	Reserve		
31	Masse	16	
R	Fahrtrichtungsanzeiger, rechts		
58R	Schlußleuchte, rechts Kennzeichenbeleuchtung	2,5	bis 4
54	Bremsleuchte	8	
58L	Schlußleuchte, links Kennzeichenbeleuchtung	2,5	

Bild 5.135. Schaltplan des Pkw Typ Trabant 601
1 Blinkleuchten, 2 Scheinwerfer, 3 Anlasser, 4 Lichtmaschine, 5 Signalhorn, 6 Bremslichtschalter, 7 Batterie, 8 Reglerschalter, 9 Zündkerzen, 10 Unterbrecher, 11 Zündspulen, 12 Sicherungsdose, 13 Blinkgeber, 14 Verteiler, 15 Scheibenwischermotor, 16 Abblenderelais (S und de Luxe), 17 Steckdose, 18 Innenleuchte, 19 Intervallschalter (S und de Luxe), 20 Lichtschalter, 21 Fahrtrichtungs-Anzeigeschalter (S und de Luxe), 22 Tachometer, 23 Zündanlaßlenkschloß (S und de Luxe), 24 Blink-Schluß-Bremsleuchten, 25 Kennzeichenleuchte, 26 Schalter für Warnblinkanlage (S und de Luxe), 27 Motorraumleuchte (de Luxe);
Standardausführung: 16 Fußabblendschalter, 19 Scheibenwischerschalter, 21 Fahrtrichtungs-Anzeigeschalter, 23 Zündanlaßschalter
sw schwarz, rt rot, gn grün, ws weiß, ge gelb, gr grau, bl blau, br braun, li lila
1 PS = 735,498 75 W, 1 at = 98,066 5 kPa,
1 kp · m = 9,806 65 J

6. Informationsanlagen

6.1. Rundfunktechnik

6.1.1. Grundlagen der Rundfunktechnik

Tabelle 6.1: Frequenz- und Wellenbereiche (nach TGL 13020)

Bezeichnung der Wellen	Wellenlänge	Frequenz
Myriameterwellen VLF	über 10 km	bis 30 kHz
Kilometerwellen LF	1···10 km	30···300 kHz
Hektometerwellen MF	0,1···1 km	300···3000 kHz
Dekameterwellen HF	10···100 m	3···30 MHz
Meterwellen VHF	1···10 m	30···300 MHz
Dezimeterwellen UHF	0,1···1 m	300···3000 MHz
Zentimeterwellen SHF	1···10 cm	3···30 GHz
Millimeterwellen EHF	1···10 mm	30···300 GHz

Bild 6.1 zeigt die Zuordnung der Einsatzgebiete zu den Wellenbereichen.
Für die Rundfunktechnik stehen die Bereiche nach Tabelle 6.2 zur Verfügung.

Tabelle 6.2: Bereiche des Hör- und Fernseh-Rundfunks

Bezeichnung	Wellenlänge	Frequenz
Langwelle LW	1,05···2 km	150···285 kHz
Mittelwelle MW	0,18···0,58 km	520···1605 kHz
Kurzwelle KW	19···50,8 m	5,9···15,55 MHz
Band I	4,65···6,80 m	41···68 MHz
Band II UKW	3···3,43 m	87,5···100 MHz
Band III VHF	1,33···1,69 m	174···230 MHz
Band IV } UHF	38,2···63 cm	470···789 MHz
Band V }		

6.1.2. Hör-Rundfunk

6.1.2.1. Grundlagen

Die Übertragung der Informationen des Rundfunks erfolgt durch Modulation elektromagnetischer Wellen, die Ausbreitung in Form von Bodenwellen (BW) oder Raumwellen (RW) in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung (Tabelle 6.3).

Bodenwellen folgen der Erdkrümmung, gelangen unmittelbar vom Sender zum Empfänger.

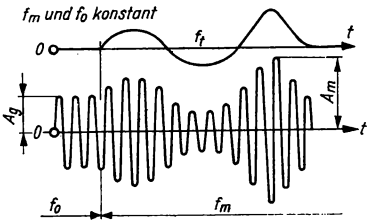
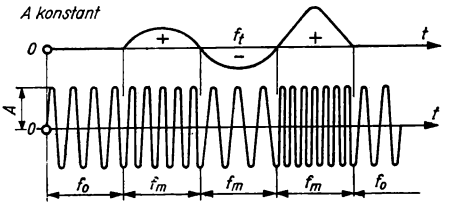
Raumwellen pflanzen sich, wie das Licht, geradlinig fort. Modulation der Sendefrequenz als *Amplituden-Modulation* (AM) oder *Frequenz-Modulation* (FM).
AM: Tonfrequenz (NF) überlagert die Trägerfrequenz (TF); Modulationsgrad = Amplitudenverhältnis (bis 100%).
FM: Tonfrequenz (NF) beeinflußt die von positiven Halbwellen erhöhte, von negativen erniedrigte Grundfrequenz des Senders; Frequenzhub = größte Frequenzabweichung.
Empfangsbereiche des Rundfunks und ihre Modulationsart s. Tabelle 6.3. Bei der Übertragung von Stereoinformationen erfolgt eine zusätzliche Übertragung von Informationen für den linken und den rechten Kanal. Gebräuchlichstes Verfahren ist die Übertragung mit Pilotton (teilunterdrückt) und Hilfsträger (unterdrückt) — *Pilottonverfahren* (Bild 6.2).

Stereofone Signale

A	Signal mit Information für den linken Kanal
B	Signal mit Information für den rechten Kanal
A + B	Summensignal M, enthält Mitteninformation (entspricht monofonem Signal)
A − B	Differenzsignal S, enthält Richtungsinformation

Die Tabellen 6.4 und 6.5 enthalten Übersichten der DDR-Hörrundfunksender.

Tabelle 6.3: Übertragungseigenschaften des Hör-Rundfunks

Wellenbereich	Ausbreitungsbedingungen	Modulation
Langwellen LW	Bodenwellen, berühren nicht die Ionosphäre, gewährleisten gleichmäßigen Empfang bei Tag und Nacht (wenig Schwund)	
Mittelwellen MW	tagsüber Bodenwellen, nachts z. T. auch Raumwellen (besserer Empfang bei Nacht)	
Kurzwellen KW	Raumwellen, werden von der Ionosphäre reflektiert oder laufen um den Erdball (Echoerscheinungen); Schwund entsteht infolge Änderung der Höhenlage der Ionosphäre	
		Amplitudenmodulation (AM): A_m modulierte, A_0 unmodulierte Amplitude; f_m modulierte, f_0 unmodulierte Trägerfrequenz
Ultrakurzwellen UKW	praktisch ohne Bodenwellen, pflanzen sich geradlinig fort, können gebündelt und gerichtet werden wie Licht; Reichweite hängt von der Sendeantennenhöhe ab	
		Frequenzmodulation (FM): A Amplitude der Grundfrequenz (konstant), f_m modulierte, f_0 Grund-, f_t Tonfrequenz

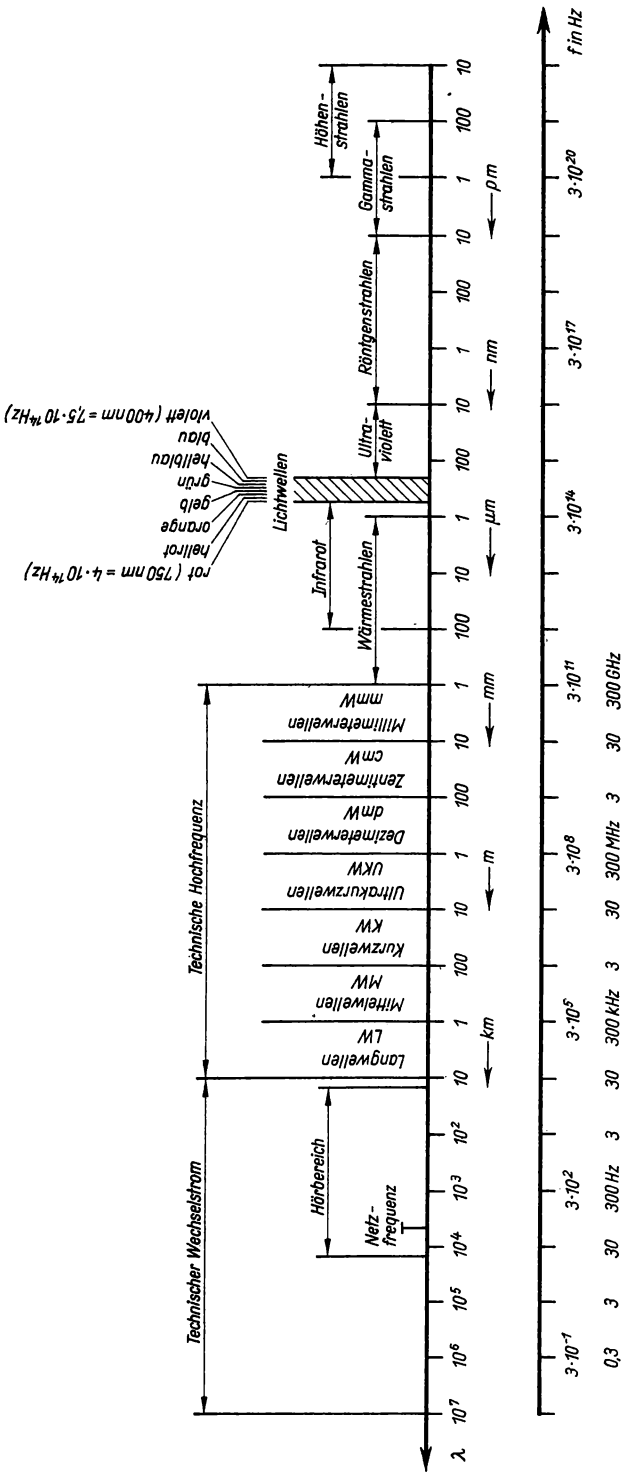


Bild 6.1. Elektromagnetisches Spektrum

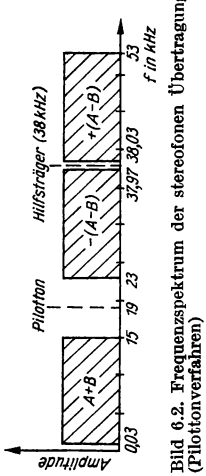


Bild 6.2. Frequenzspektrum der stereofonen Übertragung (Pilottonverfahren)

Tabelle 6.4: DDR-Hörrundfunksender (außer UKW)

Station	Frequenz kHz	Station	Frequenz kHz
Radio DDR I		**Berliner Rundfunk**	
Leipzig	531	Neubrandenburg	657
Greifswald	531	Burg (nur am Tage)	657
Rostock	558	Berlin	693
Neubrandenburg	558	Hoyerswerda	999
Schwerin	576	Schwerin	999
Potsdam	603	Weimar	999
Putbus	729	Plauen	1170
Königs Wusterhausen	882	Reichenbach	1170
Burg	1044	Bernburg	1431
Dresden	1044	Karl-Marx-Stadt	1431
Wachenbrunn	1044	Seelow	1431
Stimme der DDR		Wachenbrunn	1431
Oranienburg	182	Dresden	1575
Burg	783	Beeskow	1575
Berlin (nur am Tage)	1359	Keula	1575
		Weida	1575

Tabelle 6.5: UKW-Sender der DDR

Station	Frequenz MHz	Kanal	Programm[1])
Ultrakurzwelle			
Inselsberg III	87,85	3	DDR I
Marlow III	88,25	4	DDR I
Leipzig III	88,45	5	DDR I
Brocken III	88,95	6	DDR I
Schwerin III	89,20	7	DDR I
Dequede III	89,40	8	DDR I
K.-Marx-Stadt II	89,80	9	BR
Dresden II	90,10	10	BR
Inselsberg II	90,20	11	BR
Leipzig II	90,40	11	BR
Rheinsberg	90,50	12	DDR II
Marlow IV	91,05	14	DDR II
Berlin II	91,40	15	BR
Brocken II	91,55	15	BR
Sonneberg II	91,70	16	BR
Dresden IV	92,25	17	DDR II
Inselsberg IV	92,55	18	DDR II
Schwerin IV	92,75	19	DDR II
K.-Marx-Stadt IV	92,85	19	DDR II
Marlow II	93,50	22	BR
Leipzig IV	93,85	23	DDR II
Sonneberg I	94,20	24	StDDR
Brocken IV	94,60	25	DDR II
Dequede IV	94,90	26	DDR II
Berlin V	95,05	27	BR
Schwerin I	95,25	27	StDDR
Dresden III	95,40	28	DDR I
Berlin III	95,80	29	DDR I
Helpterberg III	95,95	30	DDR I
Leipzig I	96,60	32	StDDR
Marlow I	96,65	32	StDDR
Frankfurt/Oder IV	96,80	33	DDR II
Dequede I	96,90	33	StDDR
K.-Marx-Stadt I	97,05	34	StDDR
Inselsberg I	97,15	34	StDDR
Dresden I	97,25	34	StDDR
Brocken I	97,40	35	StDDR
Berlin I	97,65	35	StDDR
Löbau IV	98,20	37	DDR II
Schwerin II	98,55	38	BR
Cottbus IV	98,60	39	DDR II
Dequede II	98,90	40	BR
Berlin IV	99,70	42	DDR II

[1]) DDR I = Radio DDR, 1. Programm,
DDR II = Radio DDR, 2. Programm
StDDR = Stimme der DDR,
BR = Berliner Rundfunk.

Tabelle 6.6.: Kenngrößen des AM-Empfangsteils von Hör-Rundfunkempfängern (nach TGL 8836)

Parameter			Heimempfänger Geräteklasse				Autoempfänger Geräteklasse			Koffer-empfänger Geräteklasse			Taschenempfänger Geräteklasse	
			1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2
Rauschbegrenzte Empfindlichkeit	LW	dB (µV)	≤ 40	≤ 44	≤ 44	≤ 46	≤ 40	≤ 43	≤ 47					
		dB (µV/m)	≤ 64	≤ 68	≤ 68	≤ 68				≤ 64	≤ 66	≤ 68	≤ 70	≤ 70
	MW	dB (µV)	≤ 34	≤ 40	≤ 40	≤ 42	≤ 32	≤ 34	≤ 36					
		dB (µV/m)	≤ 50	≤ 54	≤ 58	≤ 60				≤ 56	≤ 58	≤ 60	≤ 62	≤ 64
	KW	dB (µV)	≤ 34	≤ 34	≤ 34	≤ 38	≤ 30	≤ 32	≤ 37					
		dB (µV/m)								≤ 35	≤ 38	≤ 40	≤ 54	≤ 58
										≤ 48	≤ 51	≤ 53		
Trennschärfe	Einsignal	dB	≥ 45	≥ 40	≥ 35	≥ 30	≥ 40	≥ 35	≥ 30	≥ 45	≥ 35	≥ 25	≥ 25	≥ 20
	Zweisignal	dB	nicht standardisiert		≥ 16	≥ 6	≥ 14	≥ 6	≥ −1	≥ 16	≥ 4	≥ −5	≥ −5	≥ −10
Elektrische Gesamtübertragungskurve[1])		f_a Hz								≤ 80	≤ 100	≤ 125	≤ 315	≤ 315
		f_o Hz	≥ 2500	≥ 2200	≥ 2000	≥ 1800				≥ 2000	≥ 1600	≥ 1600	≥ 1600	≥ 1600
Klirrfaktor		%	≤ 4	≤ 5	≤ 5	≤ 6				≤ 4	≤ 6	≤ 6	≤ 7	≤ 8
Zwischenfrequenzstörverhältnis		dB	≥ 50	≥ 40	≥ 35	≥ 20	≥ 50	≥ 40	≥ 40	≥ 35	≥ 30	≥ 30	≥ 25	≥ 20
Spiegelfrequenzstörverhältnis	LW/MW	dB	≥ 40	≥ 40	≥ 35	≥ 30	≥ 50	≥ 36	≥ 36					
	KW	dB	≥ 20	≥ 20	≥ 18	≥ 16	≥ 16	≥ 10	≥ 10					

[1]) −3 dB, bezogen auf 1000 Hz

Tabelle 6.7: Kenngrößen des FM-Empfangsteils von Hör-Rundfunkempfängern (nach TGL 8836)

Parameter		Heimempfänger Geräteklasse				Autoempfänger Geräteklasse			Kofferempfänger Geräteklasse			Taschenempfänger Geräteklasse	
		1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2
Rauschbegrenzte Empfindlichkeit	dB (pW)	$\leqq -17$	$\leqq -15$	$\leqq -12$	$\leqq -10$	$\leqq -9$	$\leqq -6$	$\leqq -6$	$\leqq -12$	$\leqq -8$	$\leqq -7$	$\leqq -3$	–
Trennschärfe Einsignal	dB	$\geqq 60$	$\geqq 50$	$\geqq 45$	$\geqq 35$	$\geqq 42$	$\geqq 38$	$\geqq 34$	$\geqq 45$	$\geqq 35$	$\geqq 20$	$\geqq 20$	–
Trennschärfe Zweisignal	dB					$\geqq 20$	$\geqq 16$	$\geqq 12$	$\geqq 22$	$\geqq 13$	$\geqq 3$	$\geqq -3$	
Elektrische Gesamtübertragungskurve[1])	f_u Hz								$\leqq 80$	$\leqq 100$	$\leqq 125$	$\leqq 315$	–
	f_o Hz	$\geqq 15000$	$\geqq 1500$	$\geqq 15000$	$\geqq 12000$				$\geqq 12500$	$\geqq 10000$	$\geqq 8000$	$\geqq 7100$	–
Klirrfaktor	%	$\leqq 1$	$\leqq 1$	$\leqq 1{,}5$	$\leqq 2{,}5$				$\leqq 3$	$\leqq 4$	$\leqq 5$	$\leqq 5$	–
Zwischenfrequenzstörverhältnis	dB	$\geqq 70$	$\geqq 65$	$\geqq 60$	$\geqq 55$	$\geqq 55$	$\geqq 55$	$\geqq 50$	$\geqq 60$	$\geqq 50$	$\geqq 50$	$\geqq 35$	
Spiegelfrequenzstörverhältnis	dB	$\geqq 70$	$\geqq 50$	$\geqq 32$	$\geqq 23$	$\geqq 40$	$\geqq 26$	$\geqq 26$					
Gesamtübersprechdämpfung	dB	$\geqq 30$	$\geqq 26$	$\geqq 24$	$\geqq 20$				$\geqq 28$	$\geqq 24$	–	–	–

[1]) -3 dB, bezogen auf 1000 Hz

Tabelle 6.8: Kenngrößen des NF-Verstärkers von Hör-Rundfunkempfängern (nach TGL 8836)

Parameter		Heimempfänger Geräteklasse				Autoempfänger Geräteklasse			Kofferempfänger Geräteklasse			Taschenempfänger Geräteklasse	
		1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2
NF-Übertragungsbereich	f_u Hz	$\leqq 30$	$\leqq 30$	$\leqq 50$	$\leqq 80$	$\leqq 100$	$\leqq 100$	$\leqq 150$	< 80	$\leqq 100$	$\leqq 125$	$\leqq 315$	
	f_o Hz	$\geqq 20000$	$\geqq 20000$	$\geqq 16000$	$\geqq 15000$	$\geqq 12500$	$\geqq 12500$	$\geqq 10000$	$\geqq 12500$	$\geqq 10000$	$\geqq 8000$	$\geqq 7100$	
Ausgangsleistung mono	W	–	–	$\geqq 3$	$\geqq 1$	$\geqq 4$	$\geqq 3{,}5$	$\geqq 3{,}5$	$\geqq 1{,}8^1)$	$\geqq 0{,}9^1)$	$\geqq 0{,}4^1)$	$= 0{,}2^1)$	$= 0{,}1^1)$
Ausgangsleistung stereo	W	$\geqq 25$	$\geqq 15$	$\geqq 7$	$\geqq 4$	$\geqq 2 \times 4$	$\geqq 2 \times 3{,}5$	$\geqq 2 \times 3{,}5$	$\geqq 2 \times 1{,}8^1)$	$\geqq 2 \times 0{,}9^1)$			
Nennklirrfaktor	%	$\leqq 1$	$\leqq 2$	$\leqq 3$	$\leqq 5$	$\leqq 10$	$\leqq 10$	$\leqq 10$	$\leqq 2$	$\leqq 3$	$\leqq 3$	$\leqq 4$	$\leqq 5$
NF-Übersprechdämpfung	dB	$\geqq 40$	$\geqq 35$	$\geqq 32$	$\geqq 30$	nicht standardisiert							
Gleichlauf der NF-Kanäle	dB	$\leqq 4$	$\leqq 4$	$\leqq 6$	$\leqq 9$	nicht standardisiert			$\leqq 4$	$\leqq 7$			
Resteigenstörung mono	µW	–	–	$\leqq 2$	$\leqq 5$				$\leqq 3\,\mu V$	$\leqq 5\,\mu V$			
Resteigenstörung stereo	µW	$\leqq 1$	$\leqq 1$	$\leqq 2$	$\leqq 2$								

[1]) Batteriebetrieb

Tabelle 6.9: Ausstattungsgrad von Hör-Rundfunkempfängern (nach TGL 8836)

Zusatzeinrichtungen	Heimempfänger Geräteklasse				Autoempfänger Geräteklasse			Kofferempfänger Geräteklasse			Taschenempfänger Geräteklasse	
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2
Antennen- und Erdanschluß	×	×	×	×				×	×			
Ferritantenne	×	×	×	×				×	×	×	×	×
Senderprogrammierung	×	×	keine Forderung		×	×	keine Forderung	×				
Rausch- und Rumpelfilter	×	keine Forderung										
TA- und TB-Anschluß	×	×	×	keine Forderung	× TB	× TB	keine Forderung	×	×	–	–	–
Abstimmanzeige	×	×	×	keine Forderung				×				
Automatische Scharfabstimmung	×	×	×	keine Forderung	×	×	keine Forderung	×	×	–	–	–
Klangsteller	×	×	×	×	×	×	keine Forderung	×	×	–	–	–
Kopfhörerbuchse	×	×	×	×				×	×	–	–	–

6.1.2.2. Empfängertechnik (Super)

Super: Empfängertyp, bei dem durch Überlagerung der Trägerfrequenz des Senders mit einer intern erzeugten Oszillatorfrequenz eine annähernd konstante Zwischenfrequenz erzeugt wird, die besser verstärkt und von Störungen befreit werden kann als bei einem Geradeausempfänger.

Kenngrößen

Trennschärfe: Maß der Abtrennung eines benachbarten Störsignals; angegeben als Verhältnis der notwendigen HF-Eingangspegel des Stör- und Nutzsignals, bezogen auf definierte Verhältnisse am Ausgang;

geräuschbegrenzte Empfindlichkeit: kleinster HF-Eingangspegel, der bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von 30 dB mindestens Standardausgangsleistung (50 mW) erzeugt;

verstärkungsbegrenzte Empfindlichkeit: HF-Eingangspegel, der bei Einstellung aller Regler auf maximale Verstärkung Standardausgangsleistung erzeugt;

Signal-Rausch-Verhältnis: Verhältnis der NF-Ausgangsspannung des Nutzsignals zur Ausgangsspannung des statischen Rauschens, gemessen über der Standardbelastung;

elektrischer Frequenzgang: über der Standardbelastung erzeugte NF-Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz des Tonträgers;

Spiegelfrequenz-Störverhältnis: Verhältnis der Amplitude des Nutzsignals zur Amplitude des Signals mit Spiegelfrequenz (Frequenz, die durch Addition zur Oszillatorfrequenz ebenfalls die Zwischenfrequenz ergibt), die die gleiche Ausgangsleistung erzeugt;

Kreuzmodulation: Modulationsstörung, die beim gleichzeitigen Empfang mehrerer Trägerfrequenzen auftritt, wenn diese nichtlineare Schaltelemente durchlaufen;

Klirrfaktor k: Maß der nichtlinearen Verzerrungen; Verhältnis der Effektivwerte der Oberwellen zum Gesamtsignal:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \cdots + A_n^2}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \cdots A_n^2}}$$

A_1 Grundschwingung, $A_2 \cdots A_n$ Oberwellen

Klassifizierung der Empfänger und ihrer Baugruppen s. Tabellen 6.6···6.9.

Blockschaltbild

Entsprechend der Funktion lassen sich Super in verschiedene Baugruppen einteilen (Bild 6.3, Tabelle 6.10).

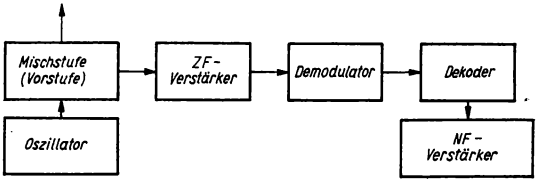


Bild 6.3. Blockschaltbild eines Supers

Der Dekoder ist in Stereogeräten, die HF-Vorstufe in Geräten der Spitzenklasse vorhanden.

Tabelle 6.10: Funktionsgruppen eines Supers

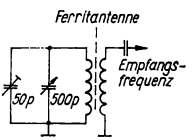
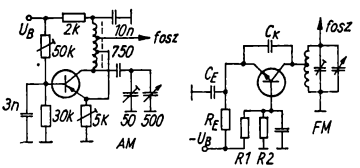
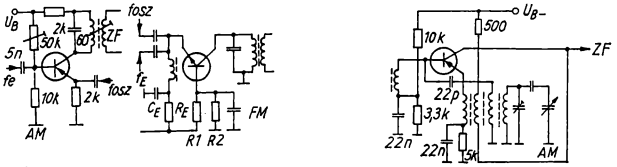
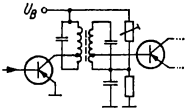
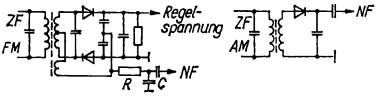
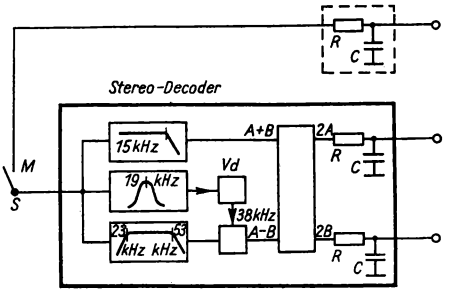
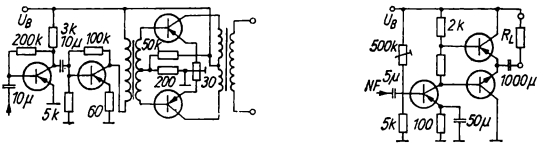
Baugruppe	Funktion	Beispiel
Antenne, einschließlich Eingangskreis	Aufnahme der Sendeenergie, Einkopplung in einen Schwingkreis aus Eingangsspule und Drehkondensator (bzw. Kapazitätsdiode), Selektion einer Trägerfrequenz	
Oszillator	Erzeugung einer Sinusspannung, deren Frequenz im Gleichlauf mit der Veränderung des Eingangskreises annähernd der Summe von Sende- und Zwischenfrequenz ist	

Tabelle 6.10 (Fortsetzung)

Baugruppe	Funktion	Beispiel
Mischstufe	Bildung der Zwischenfrequenz durch Überlagerung der Oszillatorfrequenz mit der Sendefrequenz. Aus ökonomischen Gründen sind Misch- und Oszillatorstufe meist vereint (selbstschwingende Mischstufe)	
ZF-Verstärker	selektive Verstärkung der Zwischenfrequenz (ZF) etwa 1000fach; Begrenzung der maximalen Ausgangsspannung durch Verstärkungsregelung	
Demodulator	Abtrennung der Hochfrequenz (Trägerfrequenz) von der überlagerten Tonfrequenz (NF); Gewinnung der Regelspannung für den ZF-Verstärker	
Dekoder	bei Stereogeräten Abtrennung der Links/Rechts-Information; Ansteuerung des linken bzw. rechten NF-Kanals	
NF-Verstärker	Verstärkung der abgetrennten NF; Bereitstellung der zur Ansteuerung der Lautsprecher erforderlichen Leistung; Lautstärke- und Frequenzgangregelung; bei Stereogeräten zwei gleiche parallele Verstärker für den linken bzw. rechten Kanal, die über einen Balanceregler (Mitteneindruck) verbunden sind	

Funktionsgruppe Antenne (einschl. Eingangskreis)

Tabelle 6.11: Außenantennen für den LMK-Bereich

Bild	Anwendung	Richtwirkung	Wirksame Höhe H_w	Strahlungs- / Wellen-Widerstand in Ω		Eigenwelle λ_e in m	Eigeninduktivität	Eigenkapazität
6.4 L-Antenne (Eindraht)	im Freien	in Drahtrichtung	$H_w \approx H$	$1580\left(\frac{H}{\lambda}\right)^2$	$Z = 60k = \sqrt{\frac{L}{C}}$	$4\cdots5{,}5A_w$	$L_e = 0{,}2Ak$	$C_e = 55\frac{A}{k}$
6.5 Schräg-Ant. (Eindraht)	niedrige Bauten	gering	$H_w \approx zH_m$ H im Mittel			$4{,}2A$	$k = \ln\cdot\frac{4000H_w}{d}$	statisch ohne Ableitung
6.6 Einstab- (Vertikal-) Antenne	auf dem Dach	keine b) verlängert, c) verkürzt, d) abgestimmt	$H_w \approx 0{,}636H$	$\approx 40\,\Omega$ | $\approx 100\,\Omega$ Für H_w = $\lambda{:}4$ | $\lambda{:}2$		$4{,}1H$	$L_e = 0{,}2Hk_1$ $k_1 = \ln\cdot\frac{815H}{\sqrt{d}}$	$C_e = 55H{:}k_2$ $k_2 = \ln\cdot\frac{1150H}{d}$
6.7 Rahmen-Antenne	drehb. Peilung	beste: senkr. z. Fläche	$6{,}28\cdot\frac{a^2\cdot N}{\lambda\cdot 100}$	$88\cdot\frac{a^2\cdot N}{\lambda\cdot 100}$	$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$	$6{,}28\sqrt{LC}$	$L_e \approx 0{,}02\cdot\frac{(na)^2}{\sqrt{a^2+0{,}4and}}$	

H_w und a in cm; N Windungszahl; Draht-Ø d in mm; Länge A, wirksame Länge A_w, Höhe H in m, Wellenlänge λ in m

Bauformen der Außenantennen s. die Bilder 6.4···6.7.

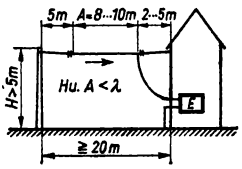


Bild 6.4. L-Antenne (Eindraht)

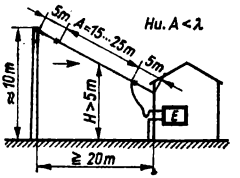


Bild 6.5. Schrägantenne (Eindraht)

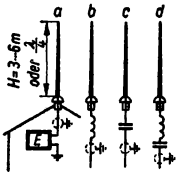


Bild 6.6. Vertikalstabantenne

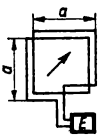


Bild 6.7. Rahmenantenne

Antennen für den UKW-Bereich s. 6.1.3. (Fernsehantennen)

Tabelle 6.12: Feldstärke E der ankommenden Wellen und wirksame Bezugshöhen H_w

Ort	E in %	H_w in m
2 m über Dach	100	—
im Dachboden	75	0,5
im 2. Stock	60	0,27
im 1. Stock	29	0,13
im Erdgeschoß	8	0,06
im Keller	4	0,04
Kraftwagenantenne	—	1,0

Behelfsantennen für den LMK-Bereich: Die Wirkung ist um ein Vielfaches geringer als bei Hochantennen, außerdem sind sie störanfälliger. Dachbodenantennen sind L-Antennen und wie diese zu isolieren und gegen Überspannung zu sichern (Bild 6.8).

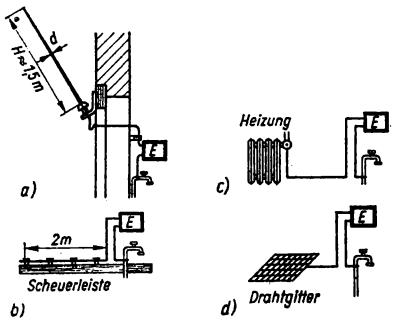


Bild 6.8. Behelfsantennen für den LMK-Bereich
a) Fensterantenne, b) Zimmerdrahtantenne, c) Heizung als Antenne, d) Drahtgitterantenne

Rundfunk-Gemeinschaftsantenne s. Bild 6.9.

Rundfunk-Gemeinschaftsantenne: Anwendung in Wohnblocks. Ohne Antennenverstärker (AV) bis zu 5 Anschlußstellen (As); mit einem AV bis zu 50 As; mit 2 AV bis zu 100 As. Stichleitungen nur bis zu 10 m, sonst Schleifenleitung.

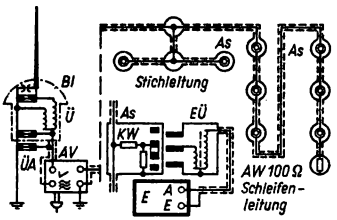


Bild 6.9. Rundfunk-Gemeinschaftsantenne

Beispiel: Einstabantenne: $H = 5$ m; mittlerer Durchmesser 20 mm. Eigenkapazität $C_e = \frac{55H}{k_2}$;

$$k_2 = \ln \frac{1150H}{d} = \ln \frac{1150 \cdot 5\text{ m}}{20\text{ mm}} = \ln 287 = 5{,}66;$$

$$C_e = \frac{55 \cdot 5\text{ m}}{5{,}66} = 48{,}6\text{ pF}.$$

Unter Berücksichtigung parasitärer Kapazitäten wird C_e = 56 pF gewählt.

Antennenübertrager (Ü): Bei einer mittleren Frequenz f = 500 kHz wird der kapazitive Antennenwiderstand

$$R_e = \frac{10^6}{2\pi f \cdot C_e} = \frac{160 \cdot 10^6}{500\text{ kHz} \cdot 56\text{ pF}} = 5700\ \Omega.$$

Das abgeschirmte Kabel der Schleifenleitung habe einen kapazitiven (Wellen-)Widerstand von $R_k = 100\ \Omega$. Das Übersetzungsverhältnis des Antennenübertragers wird daher

$$\ddot{u}_A = \sqrt{R_e : R_k} = \sqrt{5700\ \Omega : 100\ \Omega} = 7{,}5:1.$$

Empfängerübertrager (EÜ): Bei einem Empfänger-Eingangswiderstand von $R_E = 5000\ \Omega$ wird das Übersetzungsverhältnis des EÜ:

$$\ddot{u}_E = \sqrt{R_k : R_E} = \sqrt{100\ \Omega : 5000\ \Omega} = 1:7.$$

Antennenverstärker (AV) sind HF-Verstärker, die bei sämtlichen Frequenzen die aufgenommene Energie gleichmäßig verstärken (aperiodische Verstärker).

Anschlußstellen (As): Der Empfängerübertrager wird an das abgeschirmte Kabel über einen ohmschen Widerstand angeschlossen, der meist als Spannungsteiler (z. B. 2000 Ω/1000 Ω) ausgeführt ist.

Abschlußwiderstand (AW): Zur Vermeidung rückläufiger (stehender) Wellen wird das Schleifenkabel mit einem ohmschen Widerstand in der Größe seines Wellenwiderstandes (100 Ω) abgeschlossen.

Blitzschutz (Bl) und *Überspannungsableiter* (ÜA): Die Antenne wird über einen Plattenableiter (Bl) und einen Überspannungsableiter (ÜA) an Erde gelegt. Die Kabelseele und die Abschirmung erhalten ebenfalls je einen ÜA. Die Abschirmung ist hinter dem AV zu erden (Schutz bei ausgebautem AV).

Abgleich des Eingangskreises: Gleichlaufherstellung, d. h. parallele Veränderung von Eingangsfrequenz EF und Oszillatorfrequenz OF zur Bildung einer konstanten Zwischenfrequenz ZF

$$ZF = OF - EF.$$

Exakter Gleichlauf ist nur an einzelnen Punkten möglich (Einpunkt-, Zweipunkt-, Dreipunktabgleich) (Bilder 6.10 und 6.11).

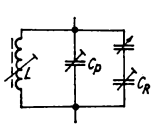


Bild 6.10. Schwingkreis zum Dreipunktabgleich

Nach Anschluß des Empfängers über eine Ersatzantenne (Tabelle 6.14) an einen Generator wird durch wechselseitiges Verändern der Induktivität L (Abgleichfrequenz f_{A2} nach Tabelle 6.13) und der Kapazität C_D (Abgleichfrequenz f_{A1}) der Zweipunktabgleich hergestellt. Bei Dreipunktabgleich erfolgt zusätzlicher Abgleich bei der Frequenz f_K.

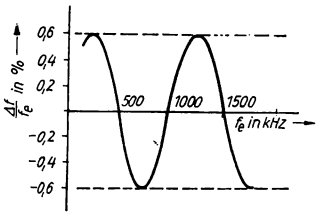


Bild 6.11. Fehlerkurve des Dreipunktabgleichs

Tabelle 6.13: Lage der Abgleich- und Kontrollfrequenzen (nach TGL 200-7100)

Empfangsbereich	Abgleichfrequenz f_{A1}	Abgleichfrequenz f_{A2}	Kontrollfrequenz f_K
Langwelle (150···285 kHz)	160 kHz	270 kHz	200 kHz
Langwellensonderbereich (150···405 kHz)	160 kHz	375 kHz	270 kHz
Mittelwelle (520···1605 kHz)	584 kHz 560 kHz	1500 kHz 1500 kHz	935 kHz 935 kHz[1])
Kurzwelle (5,9···15,55 MHz)	7,23 MHz	14 MHz	entfällt

[1]) Bei Abstimmung mit Variometer oder Kleinstdrehkondensatoren sind auch die Abgleichfrequenzen $f_{A1} = 540$ kHz und $f_{A2} = 1{,}4$ MHz zugelassen.

Die Eingangsempfindlichkeit wird begrenzt durch das Rauschen des Verstärkers. Vorwiegend Angabe als Rauschzahl F (dimensionslos, in kT_0-Einheiten oder in dB), zusätzliche Rauschzahl F_z, Rauschtemperatur T_R in K oder Rauschleistung.

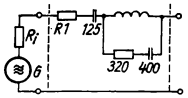
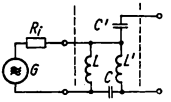
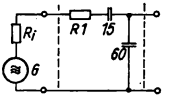
$$F = \frac{\text{Leistungsstörabstand am Eingang}}{\text{Leistungsstörabstand am Ausgang}} = \frac{P_{S1}/P_{R1}}{P_{S2}/P_{R2}}$$

P_S Signalleistung, P_R Rauschleistung

kT_0-Zahl: Angabe der Eingangsleistung je 1 Hz Bandbreite in Vielfachen von kT_0 ($kT_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ in W/Hz), die zur Erzielung eines Störabstandes 1:1 erforderlich ist. Je größer die kT_0-Zahl, desto größer ist die Rauschleistung.

Umrechnung der Angaben der Rauschzahl F s. Bilder 6.12 bis 6.14.

Tabelle 6.14: Antennennachbildungen (nach TGL 8836/04)

AM-Empfänger	FM-Empfänger	Autoempfänger
		
	$R_i = 60\,\Omega$: $C = C' = 14{,}2$ pF $L = L' = 0{,}2\,\mu$H $R_i = 70\,\Omega$: $C = C' = 13$ pF $L = L' = 0{,}22\,\mu$H	$R_i + R1 = 80\,\Omega$

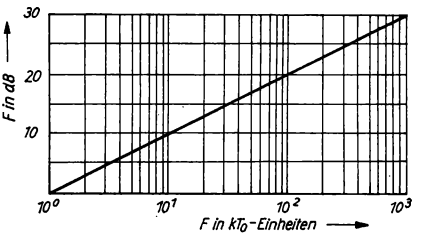


Bild 6.12. Umrechnung der Rauschzahlen F (in dB) in dimensionslose Rauschzahl

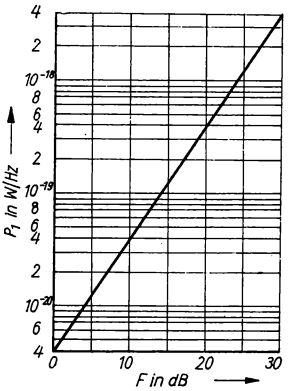


Bild 6.13. Erforderliche Eingangsleistung als Funktion der Rauschzahl F (in dB) für Rauschabstand 1:1

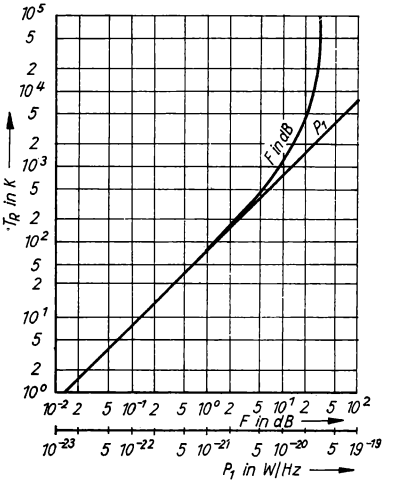


Bild 6.14. Zusammenhang zwischen Rauschtemperatur T_R und Rauschzahl F sowie Eingangsleistung P_i für Rauschabstand 1:1

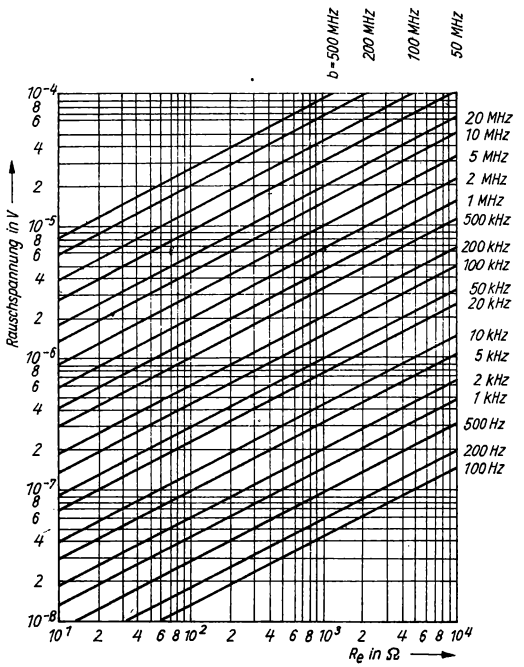


Bild 6.15. Rauschspannung als Funktion von Eingangswiderstand und Verstärkerbandbreite

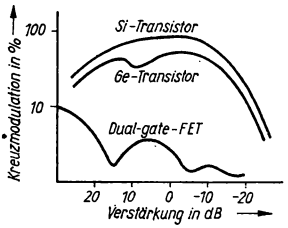


Bild 6.16. Kreuzmodulation in halbleiterbestückten Mischstufen

Tabelle 6.15: Umrechnung einzelner Rauschkenngrößen

	F	F' [dB]	T_R [K]
F	1	$10^{0{,}1F'}$	$1 + \frac{T_R}{T_0}$
F' [dB]	$10 \cdot \lg F$	1	$10 \cdot \lg\left(1 + \frac{T_R}{T_0}\right)$
T_R [K]	$(F - 1)\,T_0$	$(10^{0{,}1F'} - 1)\,T_0$	1

$F' = F$ [dB]; $T_0 = 290$ K

Abhängigkeit der Rauschspannung von Eingangswiderstand und Bandbreite s. Bild 6.15.

Tabelle 6.16: Empfohlene HF-Meßsignale

Parameter	AM	FM
Modulation	1 kHz	1 kHz
Modulationsgrad, -hub	30%	22,5 kHz
Ausgangsspannung	10 µV···100 mV	1 µV···50 mV
Ausgangsimpedanz	60 Ω	60 Ω

Funktionsgruppe HF-Verstärker
(Oszillator, Mischstufe, ZF-Verstärker, Demodulator)

Abhängigkeit der Kreuzmodulation in Mischstufen vom verwendeten Halbleiter s. Bild 6.16.

Tabelle 6.17: Anzustrebende Werte für HiFi-Qualität des HF-Verstärkers

Kenngröße	Richtwerte	Toleranz
Amplitudenfrequenzgang	30···15 000 Hz	±1 dB
	125···10 000 Hz	±0,5 dB
Übersprechabstand	30···15 000 Hz	30 dB
	125···10 000 Hz	40 dB
Nichtlineare Verzerrungen	63 Hz	−40 dB
	1 kHz	−40 dB
Phasendifferenz (Eingang Antenne bis Ausgang Dekoder)	50 Hz	15°
	4 kHz	10°
	15 kHz	15°

Wichtigste FM-Demodulatoren s. Bild 6.17.

PLD-Detektor: Ein spannungsgeregelter Oszillator (VCO) wird durch die Regelspannung eines Phasendetektors so nach-

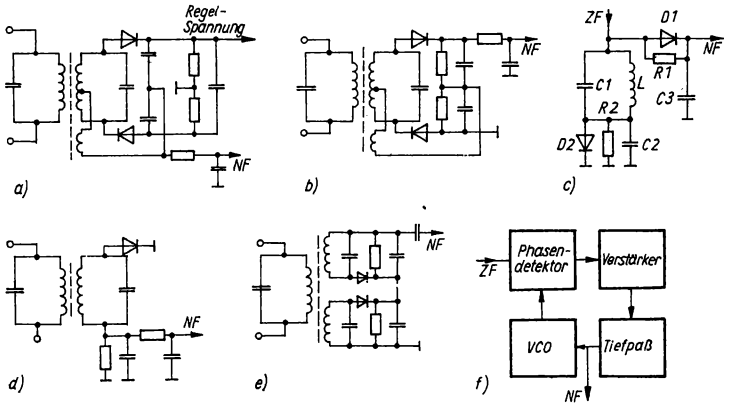


Bild 6.17. Varianten von FM-Demodulatoren
a) Synchrondetektor, b) Ratiodetektor, c) Phasendiskriminator, d) Einflankendemodulator für PLD-Demodulator, e) Zweiflankendemodulator, f) PLD-Detektor

geregelt, daß seine Frequenz der Zwischenfrequenz entspricht. Die nach dem Tiefpaß vorhandene Regelspannung entspricht der NF des frequenzmodulierten Signals [Bild 6.17f)].

Tabelle 6.18: Vergleich einiger FM-Demodulatoren

Kenngröße	Hub	Ratio-detektor	Synchron-detektor	PLD-Detektor
Ausgangsspannung	12 kHz 75 kHz	50 mV 310 mV	20 mV 125 mV	120 mV 700 mV
Demodulations-schwelle	75 kHz	1,5 µV	0,9 µV	0,85 µV
Eingangsspannung für Rauschabstand 24 dB	75 kHz	13,5 µV	8,2 µV	8 µV
Eingangsspannung für volle Begrenzung		200 µV	5 µV	5 µV

Funktionsgruppe NF-Verstärker

Dynamik: Verhältnis des Pegels bei größter Lautstärke zu Pegel bei kleinster Lautstärke (Fremdspannung)

$$\text{Dynamik in dB} = 20 \cdot \lg \frac{U_{max}}{U_{fremd}}$$

$$\text{Lautstärke in phon} = 20 \lg \frac{p_2}{p_1}, \text{ mit}$$

p_2 Schalldruck, p_1 kleinster Schalldruck (»Reizschwelle«), den der normal hörende Mensch bei 1000 Hz noch wahrnehmen kann ($2 \cdot 10^{-4}$ µB).

Tabelle 6.19: Dynamik einiger NF-Quellen

NF-Quelle	Dynamik dB	Leistungsverhältnis
Sprache	23	1 : 200
Tanzmusik	30	$1 : 10^3$
Unterhaltungsmusik	40	$1 : 10^4$
Sinfonieorchester	90	$1 : 10^9$
Normalrillenschallplatte	45	$1 : 3 \cdot 10^4$
Mikrorillenschallplatte	52	$1 : 2 \cdot 10^5$
Studiomagnettongerät	60	$1 : 10^6$
HiFi-NF-Verstärker	80···90	$1 : 10^8 \cdots 10^9$
AM-Hörrundfunk	40	$1 : 10^4$
FM-Hörrundfunk	50	$1 : 10^5$

Tabelle 6.20: Parameter einiger NF-Quellen

NF-Quelle	Spannung	Quell-widerstand bei 1000 Hz	Frequenz-bereich
Kohlemikrofon	100 mV	30···50 Ω	300···4000 Hz
Kristallmikrofon	2 mV	160 kΩ	100···7000 Hz
Tauchspulmikrofon	0,15 mV	200 Ω	30···12000 Hz
Kondensator-mikrofon	1,5 mV	200 Ω	30···16000 Hz
Magnetischer Tonabnehmer	10···20 mV	einige kΩ	30···15000 Hz
Kristall-tonabnehmer	0,8···1,6 V	200···500 kΩ	40···12000 Hz
Dynamischer Tonabnehmer	einige mV	2···15 Ω	30···15000 Hz
AM-Diodenausgang	5···50 mV	10···100 kΩ	50···10000 Hz
FM-Demodulator	100 bis 500 mV	einige kΩ	30···16000 Hz

Berechnung der notwendigen Verstärkerausgangsleistung zur Beschallung von Räumen:

$$P \approx 2Vk \cdot 10^{-3} \frac{1}{T_h}$$

V Rauminhalt in m³, k Geräuschfaktor (1···10), T_h Nachhallzeit in s.

Tabelle 6.21: Richtwerte zur Beschallung von Räumen

Rauminhalt	Erforderliche Verstärkerausgangsleistung		
	stark gedämpfter Raum	normal gedämpfter Raum	halliger Raum
m³	W	W	W
100···500	2···4	1···3	0,5···1,5
500···5000	5···30	1···15	0,8···3
5000	40	20	5

Für HiFi-Qualität werden an die Übertragung und Wiedergabe besondere Anforderungen gestellt (Tabelle 6.22).

Tabelle 6.22: Anzustrebende Parameter für HiFi-Qualität

Parameter	Richtwerte	Toleranz
Amplitudenfrequenzgang	30···15000 Hz 125···10000 Hz	+0, −0,5 dB +0, −0,5 dB
Übersprechabstand	125···10000 Hz	75 dB
Phasendifferenz (Eingang−Ausgang)	50 Hz 4 kHz 15 kHz	10° 5° 10°
Klirrfaktor	< 3%	
Intermodulationsfaktor	< 1,2%	
Tonhöhenabweichungen	< 1,2%	
Tonhöhenschwankungen	< 0,35%	

Zulässige Dauerschallpegel
6···22 Uhr 40 dB
22···6 Uhr 30 dB

Sehr gute Übertragungseigenschaften sind mit der eisenlosen Gegentaktendstufe zu erreichen (Bild 6.18).

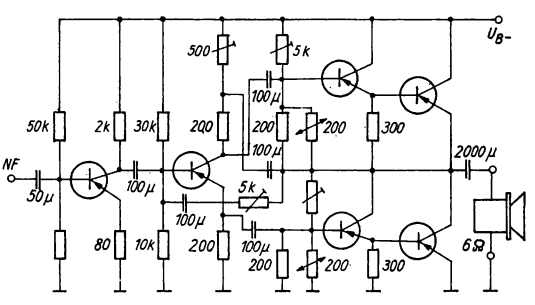


Bild 6.18. Schaltungsbeispiel einer eisenlosen Endstufe

Die Abhängigkeit der erzielbaren Ausgangsleistung der Endstufe nach Bild 6.18 von den Betriebswerten zeigt Bild 6.19 (Richtwerte).

Lautsprecher: dienen der Umsetzung der elektrischen in mechanische (akustische) Energie. Ersatzschaltbild s. Bild 6.20. Darin bedeuten:

$R1$ ohmscher Widerstand der Schwingspule, R_w Verlustwiderstand durch Wirbelströme, $L1$ Induktivität der Schwingspule, M Masse des schwingenden Systems, F Federung des schwingenden Systems, R_m Reibungsdämpfung des schwingenden

Systems, M_L mitschwingende Luftmasse, R_S Strahlungswiderstand, K Umrechnungsfaktor zwischen mechanischen und elektrischen Größen $K = B \cdot l$ (B Induktion im Luftspalt, l Leiterlänge im homogenen Feld).

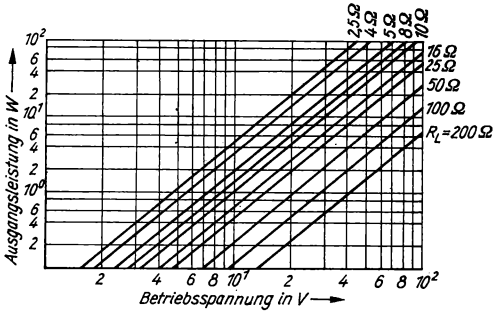


Bild 6.19. Ausgangsleistung der Endstufe nach Bild 6.18 in Abhängigkeit von Betriebsspannung und Lastwiderstand

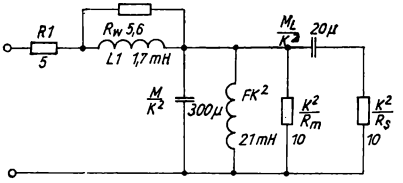


Bild 6.20. Elektroakustisches Ersatzschaltbild eines dynamischen Lautsprechers (bis 500 Hz)

Typischer Impedanzverlauf eines dynamischen Lautsprechers s. Bild 6.21.
Zur Verbesserung des Raumeindrucks wird die *Mehrkanalübertragung* angewendet. Verfahren der Mehrkanalübertragung s. Tabelle 6.23.
Entsprechend dem übertragenen Frequenzband werden Lautsprecher in Hoch- und Tieftonlautsprecher eingeteilt. Bei

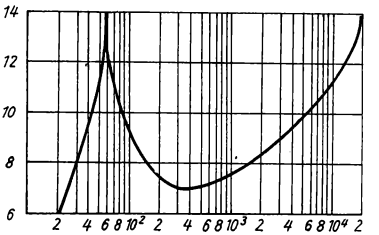


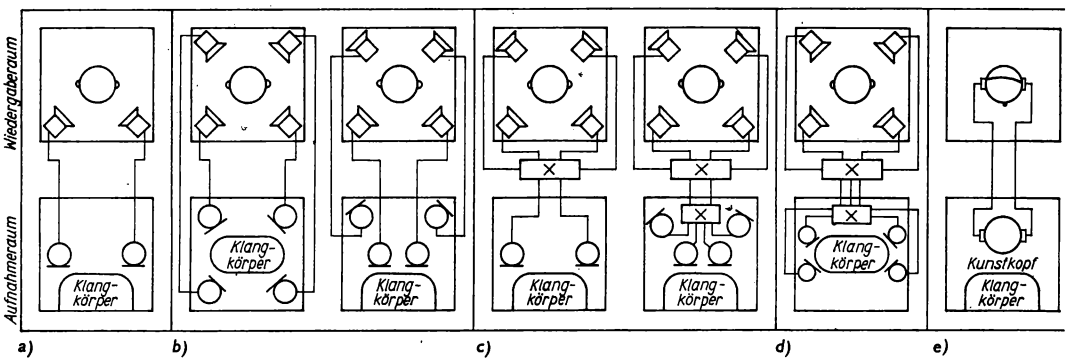
Bild 6.21. Typischer Impedanzverlauf eines Lautsprechers

Tabelle 6.24: Schaltungselemente der Frequenzweichen (s. Bild 6.22)

Weichentyp	Schaltelemente R in Ω, L in H, C in F, f_t in Hz	Flankensteilheit dB/Okt.	Weicheneingangsimpedanz	Bemerkungen
I	$L = \frac{R}{6{,}3 f_t}$	6	R	–
II	$L = \frac{R}{4{,}4 f_t}$ $C = \frac{1}{8{,}9 R f_t}$	12	R	Lautsprecher gegenphasig anschließen
III	$L = \frac{R}{8{,}9 f_t}$ $C = \frac{1}{4{,}4 R f_t}$	12	R	Lautsprecher gegenphasig anschließen

f_t Trennfrequenz; R Nennscheinwiderstand des Lautsprecher

Tabelle 6.23: Mehrkanaltechnik

Stereofonie – Biofonie –	Quadrofonie 4-Kanal-Technik	Pseudo-Quadrofonie	Quadro-Trifonie	Kopfbezogene Stereofonie
				
a)	b)	c)	d)	e)
– hohe Durchsichtigkeit – Natürlichkeit – bestimmte Hörfläche erforderlich – ungenügender Raumeindruck	– nicht einführungsreif – keine internationale Abstimmung – hohe Wiedergabegüte und Natürlichkeit	– Abtrennung zweier zusätzlicher Signale aus dem Stereosignal bzw. Übertragung quadrofoner Signale über 2 Kanäle – Raumeindruck gegenüber Stereofonie verbessert	– Übertragung quadrofoner Signale über 3 Kanäle (Matrizierung) – ökonomisch aussichtsreichste Variante	– hohe Natürlichkeit und Darstellung des Aufnahmeraumes – Kopfhörer erforderlich – mit Stereofonie nicht kompatibel

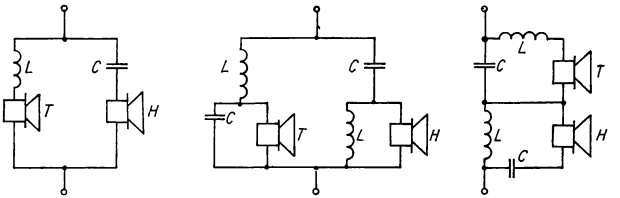


Bild 6.22. Typen von Lautsprecher-Frequenzweichen

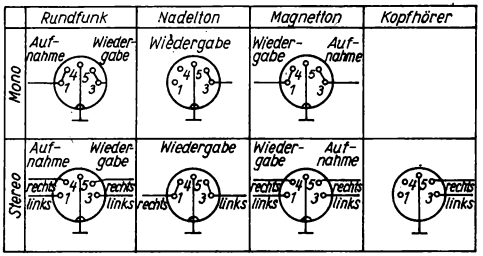




Bild 6.23. Anschlußbelegung von Dioden- und Schaltbuchsen

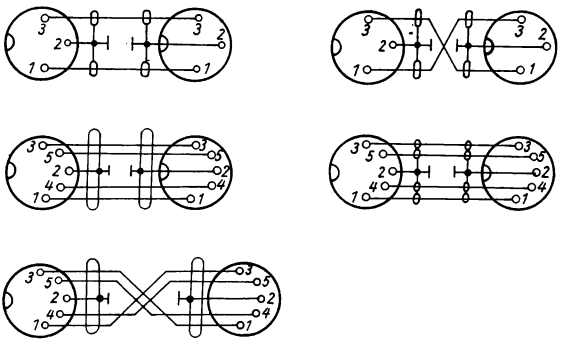


Bild 6.24. Anschlußbelegung von Überspielkabeln

hochwertigen Verstärkern Kombination von Lautsprechern, die über Frequenzweichen angesteuert werden, in Boxen. Typen von Frequenzweichen s. Bild 6.22.
Eigenschaften der Frequenzweichen nach Bild 6.22 s. Tabelle 6.24.
Verbindung von NF-Verstärkern mit NF-Quellen erfolgt über Diodenkabel, -buchsen und Lautsprecherbuchsen. Eine Übersicht über Anschlußbelegungen s. Bilder 6.23 und 6.24.

6.1.3. Fernseh-Rundfunk

6.1.3.1. Grundlagen

Die Qualität eines Fernsehbildes wird im wesentlichen bestimmt von

- Senderausgangsleistung, Trägerfrequenz,
- Entfernung vom Sender,
- Antennenleistung,
- Empfindlichkeit des Empfängers.

Empfangsantennen (nach TGL 200-7047/01; TGL 200-7035/01)

Impedanz: komplexer Eingangswiderstand einer Antenne (»Fußpunktwiderstand«);

Gewinn: Verhältnis der Leistung einer Antenne im Vergleich zu einem abgestimmten angepaßten Halbwellendipol (Angabe in dB);

Vorwärts-Rückwärts-Verhältnis: Verhältnis der Spannungen an der Antenne in Hauptstrahlrichtung und bei Drehung um 180°;

Tabelle 6.25: Richtwerte für ausreichende Fernsehqualität

Band	Feldstärke über 1 µV/m für Bildqualität		Kritischer Abstand vom Sender
	befriedigend dB	erträglich dB	km
I	50	40···45	105
III	60	50···55	90
IV	65	55···60	65
V	72	62···67	50

Öffnungswinkel: Winkelbereich, in dem die Leistung, die an den Verbraucher gelangt, auf die Hälfte absinkt.
Wellenwiderstand der Antenne, der Speiseleitung und des Empfängers müssen einander angepaßt sein.

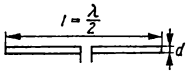
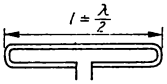
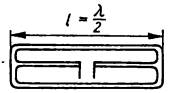
Dimensionierung und Impedanz von Dipolantennen s. Tabelle 6.26.

Der Wellenwiderstand folgt aus Kapazität und Induktivität des Strahlers. Die Kapazität ist eine Funktion der Oberfläche: bei kleinem Durchmesser des Strahlers kleine Kapazität. Die Induktivität ergibt sich aus der Länge des Strahlers.

Großes L/C-Verhältnis: hohe Resonanzschärfe,
kleines L/C-Verhältnis: breitbandige Antenne.

Theoretische $\lambda/2$-Länge wird durch Einflüsse der Erde, Antennenhöhe, Umgebung usw. verkürzt (Verkürzungsfaktor V) (Bild 6.26).

Tabelle 6.26: Dipolantennen

Kenngröße	Halbwellendipol	Schleifendipol	Doppelschleifendipol
Geometrische Abmessungen			
Wellenwiderstand	$\underline{Z}_w'$ (s. Bild 6.25)	$\underline{Z}_w = 4\,\underline{Z}_w'$	$\underline{Z}_w = 9\,\underline{Z}_w'$
Richtwerte	50…70 Ω	240…280 Ω	540…630 Ω

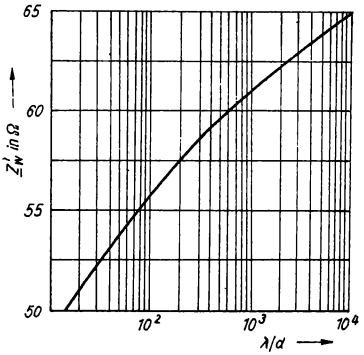


Bild 6.25. Wellenwiderstand $\underline{Z}_w'$ eines Halbwellendipols in Abhängigkeit vom Wellenlänge/Durchmesser-Verhältnis

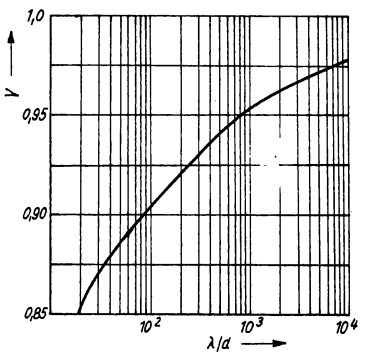


Bild 6.26. Verkürzungsfaktor als Funktion des Wellenlänge/Durchmesser-Verhältnisses

Mehrelementeantennen (Yagi): horizontale Drehrichtstrahler mit höherem Antennengewinn und größerer Richtwirkung. Anordnung und Bezeichnung der Elemente s. Bild 6.27.
Die einzelnen Halbwellenstücke besitzen unterschiedliche Verkürzungsfaktoren.

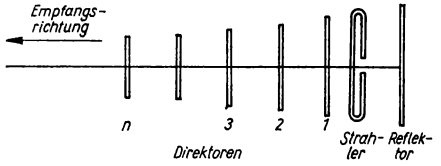


Bild 6.27. Anordnung und Bezeichnung der Elemente einer YAGI-Antenne

Mehrelementeantennen, die in mehreren Etagen übereinander angeordnet sind, erhöhen den Antennengewinn (Tabelle 6.27).

Tabelle 6.27: Antennengewinn (in dB) *als Funktion der Elemente- und Etagenzahl*

Etagenzahl	Anzahl der Elemente in einer Ebene									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,0	1,8	3,4	4,6	5,6	6,5	7,3	7,9	8,3	8,6
2	4,0	5,8	7,4	8,6	9,6	10,5	11,3	11,9	12,3	12,6
3	5,5	7,3	8,9	10,1	11,1	12,0	12,8	13,4	13,8	14,1
4	6,8	8,6	10,2	11,4	12,4	13,3	14,1	14,7	15,1	15,4

Behelfsantennen (Bild 6.28): einfache Dipolantennen zum behelfsmäßigen Fernsehempfang mit geringer Leistung.

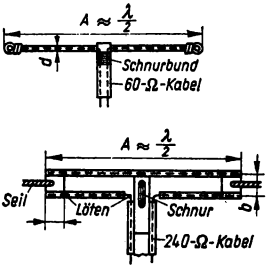


Bild 6.28. Behelfsantennen für den UKW- und Fernsehempfang

Ausführung von Antennenanlagen

Für die Errichtung von Empfangs-Antennenanlagen für den Hör- und Fernseh-Rundfunk sind die Bestimmungen des Standardwerkes nach TGL 200-7051/02 verbindlich.

Außenantennenanlagen dürfen nur von den dafür zuständigen Handwerksbetrieben, Produktionsgenossenschaften usw. errichtet werden.

Innenantennenanlagen sind:

a) Zimmerantennen und Antennen, die im Gerät eingebaut oder mit diesem unmittelbar mechanisch verbunden sind.

b) Antennen unter der Dachhaut, wenn deren äußerster Punkt und die Antennenzuleitung mindestens 0,5 m von der Dachhaut-Innenseite und von Schornsteinen und Entlüftungsanlagen entfernt und die Antennenzuleitung im Inneren des Gebäudes geführt ist. Außen liegende Antennenzuleitungen müssen mindestens 3 m unter einer metallischen Dachrinne oder 2 m unter einer Dachrinne aus nichtleitendem Material geführt sein, wobei der Abstand zur Außenwand des Gebäudes nicht mehr als 2 m betragen darf.

Wenn das Gebäude eine Blitzschutzanlage gemäß den »Allgemeinen Blitzschutz-Bestimmungen (ABB)« aufweist, muß der Mindestabstand D des äußersten Punktes der Antenne oder der Antennenzuleitung zu Blitzschutz-Anlagenteilen nach folgender Beziehung gewählt werden:

$D \leqq \frac{1}{5} R$, wobei D in mm und R in Ω einzusetzen sind (R Gesamterdungswiderstand der Blitzschutzanlage).

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, dann muß eine leitende Verbindung zur Blitzschutzanlage hergestellt werden. Als leitende Verbindung gelten Schutzfunkenstrecken, Trennfunkenstrecken, Überschlagstellen, Isolatoren oder sonstige isolierende Zwischenschichten, wenn die Schlagweite in Luft höchstens 30 mm beträgt oder die Isolation einen entsprechenden Durchschlagswert hat.

Sicherheitsforderungen: nach TGL 200-7051/02.

Zutreffende Arbeitsschutzanordnungen

ASAO 331/2	Hochbau-, Tiefbau- und Ausbauarbeiten
ASAO 336/1	Schornsteinfegerhandwerk
ABAO 346/2	Fernmeldebau
ABAO 612	Arbeiten an bestehenden Leitungen und Gasrohrleitungen
ASAO 631/1	Herstellen von Leitungsgräben und Verlegen von Leitungen in die Erde

Tabelle 6.28: Materialien des Blitzableiterbaus (Mindestwerte)

Werkstoff	oberirdisch	unterirdisch
Rundstahl, stark verzinkt	8 mm ⌀	10 mm ⌀
Bandstahl, stark verzinkt	20 mm × 2,5 mm	30 mm × 3,5 mm
Stahlseil	unzulässig	unzulässig
Rundkupfer	8 mm ⌀	nicht zu empfehlen
Bandkupfer	20 mm × 2,5 mm	nicht zu empfehlen
Kupferseil	7 mm × 3 mm	unzulässig
Stahlkupferdraht	8 mm ⌀ mit 30% Kupfer	nicht zu empfehlen
Rundaluminium	10 mm ⌀	unzulässig
Bandaluminium	20 mm × 4 mm	unzulässig
Aluminiumseil	unzulässig	unzulässig

Speiseleitungen

Sie dienen der Verbindung von Antennen mit Sendern oder Empfängern. Energieverluste auf Speiseleitungen entstehen durch Skin-Effekt (Stromverdrängung zur Leiteroberfläche, Hautwirkung) und dielektrische Verluste in den Isolierstoffen. Leitungsverluste sind frequenzabhängig. Summe aller Verluste △ Dämpfung. Wellenwiderstand $Z_w = \sqrt{L/C}$ (C groß bei geringem Abstand, L groß bei dünnen Leitern).

Fernsehaufnahmetechnik

Tabelle 6.30 enthält die wesentlichsten in der Fernsehtechnik eingesetzten Aufnahmeröhren.

Spektrale Empfindlichkeiten und Restsignalverhalten s. Bilder 6.29 und 6.30.

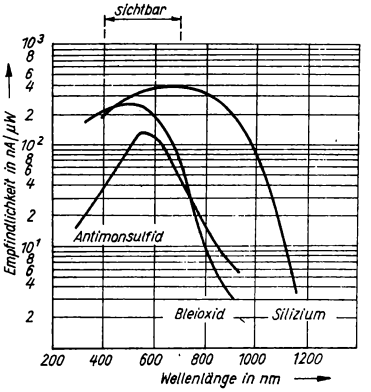


Bild 6.29. Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Aufnahmeröhren

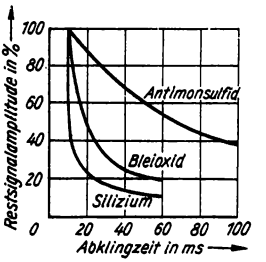
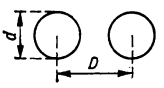


Bild 6.30. Restsignalverhalten verschiedener Aufnahmeröhren

Tabelle 6.29: Dimensionierung von Speiseleitungen

	Bandleitung	Koaxialleitung	
Wellenwiderstand	$Z_w = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{2D}{d}$ [1]	$Z_w = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{D}{d}$	$Z_w = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{1{,}08D}{d}$
Geometrische Abmessungen			

[1]) ε_r relative Dielektrizitätskonstante des Isoliermaterials (vgl. Tabelle 1.69)

Tabelle 6.30: Fernsehaufnahmeröhren

Typ	Lichtempfindliche Schicht	Lichtelektrischer Effekt	Handelsnamen
Endikon	Antimonsulfid	innerer	Vidicon Resistron
Plumbikon	Bleioxid	innerer	
Hybridendikon	Silizium	innerer	Silizium-Diodentarget, Multidioden-Vidicon, Telecon
Super-Orthikon	Antimon–Zäsium	äußerer	
Super-Ikonoskop	Wismut–Silber–Zäsium	äußerer	

Grundprinzip der Fernsehübertragung (CCIR)

1. Das Bild wird punkt- und zeilenweise bei der Aufnahme abgetastet und bei der Wiedergabe durch Anregung von Leuchtstoffen abgestrahlt.
Durch Trägheit des Auges genügt zur scheinbar flimmerfreien Wiedergabe eine Auflösung in 300000···400000 Bildpunkte (≈ 600 Zeilen mit je 600 Bildpunkten). Dabei werden zwei Halbbilder in $^1/_{25}$ s nacheinander übertragen (*Zeilensprungverfahren*), ein Halbbild mit gerader Zeilenzahl (2., 4., 6., usw. Zeile) und ein anderes mit ungerader Zeilenzahl (1., 3., 5., usw. Zeile) (s. Bild 6.31).

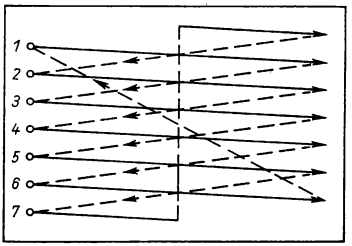


Bild 6.31. Abtastung eines Bildes nach dem Zeilensprungverfahren

2. Jeder Helligkeitswert der Bildpunkte wird in einen proportionalen Spannungspegel umgesetzt. Schwarz besitzt den größten Pegel, weiß den kleinsten (Amplitudenmodulation/Negativmodulation) (Bild 6.32).

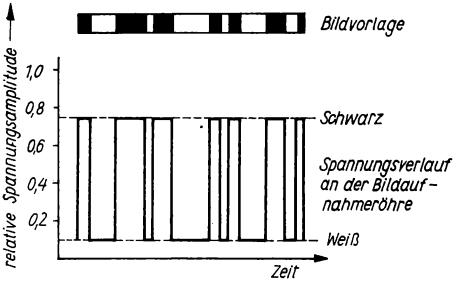


Bild 6.32. Pegelverhältnisse eines Schwarz-Weiß-Bildes

Wechselt von Punkt zu Punkt die Helligkeit, sind je Sekunde 400000/2 Spannungswerte in $^1/_{25}$ s zu übertragen. Das entspricht der höchsten Modulationsfrequenz 5 MHz. Die HF-Verstärkung im Empfänger muß diese Bandbreite verarbeiten können.

3. Zur Synchronisation mit dem Sender (Beginn der Zeilenabtastung und der Halbbilder im Sender muß mit dem Beginn der Zeilenabtastung und der Halbbilder im Empfänger übereinstimmen) sind dem Fernsehsignal Synchronimpulse (Zeilen-

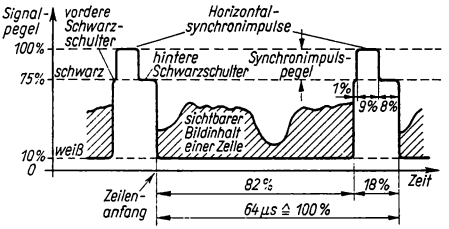


Bild 6.33. Signalpegelaufteilung nach der CCIR-Norm

synchron-/Horizontalimpuls, Bildabtast-/Vertikalimpuls) beigefügt (Bild 6.37). Die Synchronimpulse besitzen den höchsten Spannungspegel und liegen damit im Schwarzbereich (Dunkeltastung, Bild 6.33). Bei der Übertragung von 625 Zeilen und 2 Halbbildern folgt daraus:

$$\text{Zeilenfrequenz } \frac{625 \text{ Zeilen}}{^1/_{25}\text{ s}} = 15625 \text{ Zeilen/s} = 15625 \text{ Hz}$$

$$\text{Bildfrequenz } \frac{2 \text{ Halbbilder}}{^1/_{25}\text{ s}} = 50 \text{ Halbbilder/s} = 50 \text{ Hz}$$

4. Die Tonübertragung erfolgt wie bei UKW-Rundfunk durch Frequenzmodulation (maximaler Frequenzhub ±50 kHz).

5. Zur Begrenzung des abgestrahlten Frequenzbandes wird nur ein Seitenband übertragen (Bild 6.34).

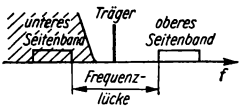


Bild 6.34. Abtrennung eines Seitenbandes

Tabelle 6.31: Zuordnung der Frequenzen zu den Fernsehempfangsbereichen

Kanal	Kanalgrenzen MHz	Bildträger MHz	Tonträger MHz	Mittlere Wellenlänge m bzw. cm
Band I				m
1	41···47	41,25	46,75	6,80
2	47···54	48,25	53,75	6,00
3	54···61	55,25	60,75	5,20
4	61···68	62,25	67,75	4,65
Band III				
5	174···181	175,25	180,75	1,69
6	181···188	182,25	187,75	1,63
7	188···195	189,25	194,75	1,57
8	195···202	196,25	201,75	1,51
9	202···209	203,25	208,75	1,46
10	209···216	210,25	215,75	1,41
11	216···223	217,25	222,75	1,37
12	223···230	224,25	229,75	1,33
Band IV/V				cm
21	470···477	471,25	476,75	63
22	478···485	479,25	484,75	62,5
23	486···493	487,25	492,75	61
24	494···501	495,25	500,75	60
25	502···509	503,25	508,75	59
26	510···517	511,25	516,75	58
27	518···525	519,25	524,75	57,5
28	526···533	527,25	532,75	56,5
29	534···541	535,25	540,75	55,5
30	542···549	543,25	548,75	55
31	550···557	551,25	556,75	54
32	558···565	559,25	564,75	53
33	566···573	567,25	572,75	52,5
34	574···581	575,25	580,75	51,5
35	582···589	583,25	588,75	51
36	590···597	591,25	596,75	50,5
37	598···605	599,25	604,75	50
38	606···613	607,25	612,75	49
39	614···621	615,25	620,75	48,5
40	622···629	623,25	628,75	48
41	630···637	631,25	636,75	47
42	638···645	639,25	644,75	46,5
43	646···653	647,25	652,75	46
44	654···661	655,25	660,75	45,5
45	662···669	663,25	668,75	45
46	670···677	671,25	676,75	44,5
47	678···685	679,25	684,75	44
48	686···693	687,25	692,75	43,5
49	694···701	695,25	700,75	43
50	702···709	703,25	708,75	42,5
51	710···717	711,25	716,75	42
52	718···725	719,25	724,75	41,5
53	726···733	727,25	732,75	41
54	734···741	735,25	740,75	40,5
55	742···749	743,25	748,75	40,3
56	750···757	751,25	756,75	39,8
57	758···765	759,25	764,75	39,3
58	766···773	767,25	772,75	38,9
59	774···781	775,25	780,75	38,5
60	782···789	783,25	788,75	38,2

Bildträger und Tonträger sind um 5,5 MHz versetzt (Tabelle 6.31, Bild 6.35). Kanaleinteilung nach der CCIR-Norm s. Bild 6.36.
Ein vollständiges Synchronimpuls- und Bildsignalgemisch zeigt Bild 6.37.

Ausgleichsimpulse (mit der doppelten Horizontalfrequenz) vor und nach dem Vertikalsynchronimpuls sind zur einwandfreien Trennung der Horizontal- und Vertikalsynchronimpulse im Fernsehempfänger erforderlich; sie sollen die durch das Zeilensprungverfahren bedingte Verschiebung des Abstandes zwischen dem letzten Horizontalsynchronimpuls und dem Vertikalsynchronimpuls, die bei den beiden aufeinanderfolgenden Halbbildern um jeweils eine halbe Zeile entsteht, ausgleichen.
Die Fernsehsender der Deutschen Demokratischen Republik sind in Tabelle 6.32 enthalten.

Kenngrößen von Fernseh-Rundfunkempfängern (nach TGL 14 984)

Rauschbegrenzte Empfindlichkeit: kleinster HF-Eingangspegel, bei dem das Verhältnis des Spitzenwertes der Bildspannung zum Effektivwert der Rauschspannung bei 50% Bildaussteuerung an der gesteuerten Elektrode der Bildwiedergaberöhre 20 dB beträgt, wobei mindestens Standardbildspannung erreicht werden muß;

synchronisationsbedingte Empfindlichkeit: kleinster HF-Eingangspegel, der für die einwandfreie Synchronisation erforderlich ist;

maximal nutzbarer HF-Eingangspegel: HF-Eingangspegel, bei dem noch keine Funktionsstörung eintritt;

Auflösungsvermögen: gekennzeichnet durch die auf dem Bildschirm in horizontaler und vertikaler Richtung maximal wiedergegebene Frequenz;

Trennschärfe: Verhältnis der notwendigen HF-Eingangspegel des Störsignals und des Bildträgersignals für gleiche definierte Verhältnisse am Ausgang;

Spiegelfrequenz-Störverhältnis: Verhältnis des HF-Eingangspegels eines Störsignals mit Spiegelfrequenz (s. 6.1.2.2.) und des HF-Eingangspegels eines Nutzsignals mit Bildträgerfrequenz, wobei beide HF-Eingangspegel unter gleichen

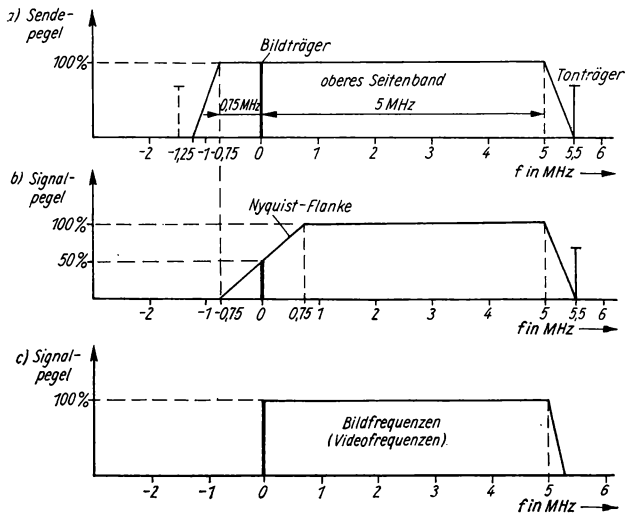


Bild 6.35. Relative Frequenzkurven
a) Sender, b) Empfänger (Bild-ZF-Verstärker),
c) Empfänger (nach der Bildgleichrichtung)

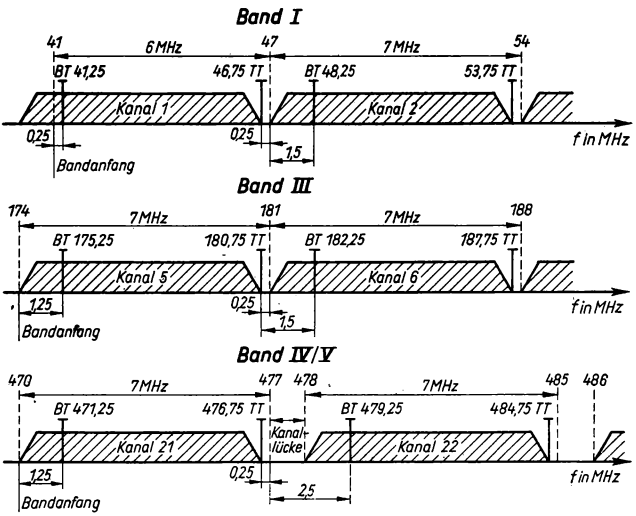


Bild 6.36. Kanalaufteilung nach der CCIR-Norm

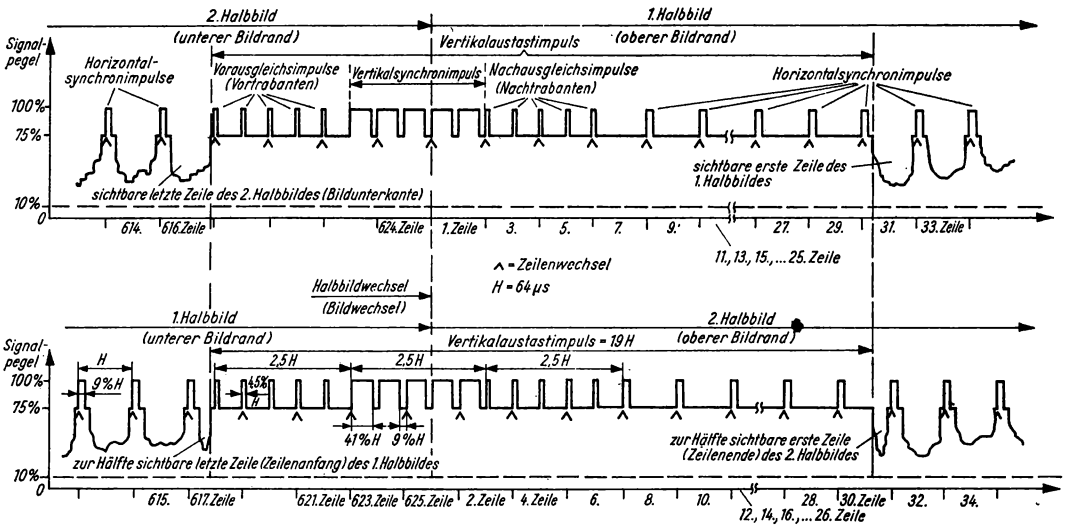


Bild 6.37. Impulsgemisch nach der CCIR-Norm

Tabelle 6.32: Fernsehsender der Deutschen Demokratischen Republik

Station	Kanal	Bildträger MHz	Tonträger MHz
Band I (I. Programm)			
Helpterberg	3	55,25	60,75
Cottbus	4	62,25	67,75
Band III (I. Programm)			
Berlin	5	175,25	180,75
Inselsberg	5	175,25	180,75
Brocken	6	182,25	187,75
Karl-Marx-Stadt	8	196,25	201,75
Marlow	8	196,25	201,75
Leipzig	9	203,25	208,75
Dresden	10	210,25	215,75
Schwerin	11	217,25	222,75
Dequede	12	224,25	229,75

Station	Kanal	Bildträger MHz	Tonträger MHz
Band IV/V (II. Programm)			
Leipzig	22	479,25	484,75
Marlow	24	495,25	500,75
Berlin	27	519,25	524,75
Löbau[1])	27	519,25	524,75
Dresden	29	535,25	540,75
Schwerin	29	535,25	540,75
Dequede	31	551,25	556,75
Inselsberg	31	551,25	556,75
Karl-Marx-Stadt	32	559,25	564,75
Sonneberg	33	567,25	572,75
Brocken	34	575,25	580,75

[1]) I. Programm

Tabelle 6.33: Kenngrößen von Fernseh-Rundfunkempfängern (nach TGL 8838/01)

Kenngröße		Einheit	Kennwerte Gerätetyp	
			stationär	tragbar
Rauschbegrenzte Empfindlichkeit	Bereiche I, III	dB (pW)	≦ 25	≦ 21
	Bereich IV	dB (pW)	≦ 29	≦ 25
Synchronisationsbedingte Empfindlichkeit		dB (pW)	≦ 18	≦ 13
Spiegelfrequenz-störverhältnis	Bereich I	dB	≧ 40	
	Bereich III	dB	≧ 35	
	Bereich IV	dB	≧ 30	
Zwischenfrequenz-störverhältnis		dB	≧ 40	
Maximal nutzbarer HF-Eingangspegel	Bereiche I, III	dB (pW)	≧ 80	
	Bereich IV			

Modulationsbedingungen auf definierte Verhältnisse am Ausgang bezogen werden;

Zwischenfrequenz-Störverhältnis: Verhältnis des HF-Eingangspegels eines Störsignals mit der Bildträger-Zwischenfrequenz und Verhältnis des HF-Eingangspegels eines Nutzsignals mit der Bildträgerfrequenz bei gleichen definierten Verhältnissen am Ausgang.

Eine Einteilung der Empfänger entsprechend vorgenannten Parametern s. Tabelle 6.33.

6.1.3.2. Schwarz-Weiß-Fernsehen

Bild 6.38 enthält die typischen Baugruppen eines Schwarz-Weiß-Fernsehgerätes, Tabelle 6.34 die Funktion und Ausfallerscheinungen.

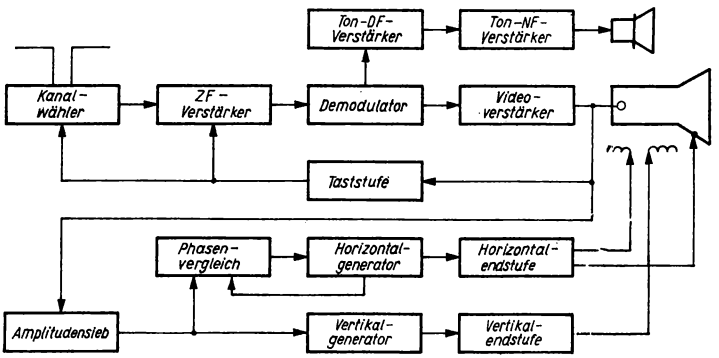


Bild 6.38. Blockschaltbild eines Schwarz/Weiß-Empfängers

Tabelle 6.34: Funktionsgruppen eines Fernsehgerätes

Funktionsgruppe, Funktion	Erscheinungen, deren Ursache im Ausfall der Stufe liegen kann
HF-Vorstufe Verminderung des Eingangsrauschens, Verstärkung der Antennenspannung, Verhinderung der Abstrahlung der Oszillatorspannung über die Antenne	Helligkeit vorhanden; Bild und Ton fehlen vollständig oder sind stark verrauscht
Misch- und Oszillatorstufe Bildung der Zwischenfrequenz von 38,9 MHz für Bild und 33,4 MHz für Ton, Verstärkung der HF Misch-, Oszillator- und HF-Vorstufe bilden den Kanalwähler	Helligkeit vorhanden; Oszillatorausfall: kein Bild, kein Ton, kein Rauschen Oszillator verstimmt: Bildspuren, Rauschen vorhanden Kontaktfehler: Flackern des Bildes
ZF-Verstärker Verstärkung der ZF (Demodulation ergibt Richtspannung von 1,5···3 V), Bandbreite 4,25···4,5 MHz; in Abhängigkeit von der Antennenspannung geregelte Verstärkung	Helligkeit vorhanden; kein Bild, kein Ton, kein Rauschen oder Ton und Bild unempfindlich oder Plastik und starker Brumm im Bild Schwingen des ZF-Verstärkers: Teppichmuster auf dem Bildschirm
Videogleichrichter Trennung des Bildsignals vom ZF-Träger, Auskopplung des Ton-ZF-Trägers	Helligkeit vorhanden; Ton vorhanden, leise oder fehlt; Bild verwaschen oder fehlt; Bildsynchronisation instabil
Videoverstärker Verstärkung des Bildsignals zur Ansteuerung der Bildröhre	keine Helligkeit oder nicht regelbar; Ton vorhanden, kein Bild
Bildröhre Umwandlung der Amplitude des Bildsignals in Bildpunkte	keine Helligkeit; Bild unscharf, verwaschen; Überschläge in der Röhre; Bildrücklauf zu sehen
Taströhre Erzeugung der automatischen Kontrastregelspannung aus der Amplitude der Zeilensynchronisierimpulse	Kontrastregler regelt nicht; Gerät unempfindlich; Übersteuerung bei starkem Sender; zeitweise aussetzender Empfang
ZF-Tonverstärker Verstärkung der Ton-ZF von 5,5 MHz; Umwandlung des ZF-Signals in NF-Spannung	Bild vorhanden; Ton gestört oder fehlt
NF-Verstärker Verstärkung der NF-Spannung; Wiedergabe des Tons über Lautsprecher	Bild vorhanden; Ton gestört oder fehlt; Klirren, Pfeifen, Mikrofoneffekt im Lautsprecher
Amplitudensieb Abtrennung der Synchronisierzeichen vom Bildinhalt	Bild weder in Zeilen- noch in Bildrichtung synchronisiert oder Synchronisation instabil

Tabelle 6.34 (Fortsetzung)

Funktionsgruppe, Funktion	Erscheinungen, deren Ursache im Ausfall der Stufe liegen kann
Begrenzer	
Verstärkung der Synchronisierimpulse und beidseitige Begrenzung	Bild- und Zeilensynchronisation fallen bei der geringsten Störung aus oder fehlen völlig
Bildsynchronisierverstärker	
Abtrennung der Bildsynchronimpulse und Verstärkung	keine Zwischenzeile; Bildsynchronisation instabil oder fehlt
Vertikalgenerator	
Erzeugung der Rasterfrequenz für den Bildwechsel zur Ansteuerung der Vertikalendstufe (Bildkippstufe)	keine Bildablenkung; Bildhöhe zu klein; keine Bildsynchronisation; Geometriefehler
Vertikalendstufe	
Bereitstellung des Ablenkstromes für die Bildablenkspulen (Sägezahnimpuls)	keine Bildablenkung; Bildhöhe zu gering; Geometriefehler; periodische Überschläge im Bildkipptrafo
Horizontalgenerator	
Erzeugung der Rasterfrequenz für die Zeilenablenkung; automatische Frequenzregelung durch die Phasenvergleichsstufe	Bildröhre dunkel; keine oder zu geringe Hochspannung; Bildbreite zu schmal; keine Zeilensynchronisation; keine Boosterspannung
Horizontalendstufe	
Erzeugung des Ablenkstroms für die Zeilenablenkspulen	keine Helligkeit; keine Hochspannung; Bild zu schmal; geringe Hochspannung; schwarze senkrechte Streifen im linken Bildrand; greller senkrechter heller Strich auf dem Bildschirm
Phasenvergleichsstufe	
Erzeugung der Frequenzregelspannung für den Horizontalgenerator durch Vergleich der Phasenlage von Zeilensynchronisierimpuls und Sägezahn des Horizontalgenerators	Zeile synchronisiert nicht oder schlecht; Brummodulation im Bild (senkrechte Wellenlinien); Frequenzfeinregelung arbeitet nicht
Boosterdiode	
Schalterdiode; Erzeugung einer Gleichspannung von 400 V bis 1000 V aus der magnetischen Energie des Zeilentrafos	keine oder zu geringe Hochspannung; keine Boosterspannung
Hochspannungsgleichrichterröhre	
Gleichrichtung der im Zeilentrafo erzeugten Hochspannung (durch Spannungsstöße im Rhythmus der Zeilenfrequenz); während der Zeilendauer Sperrung der Röhre (kein Zurückfließen der Hochspannung möglich); Glättung der Spannung mit einem Kondensator	keine Helligkeit; keine Hochspannung; geringe Helligkeit; Hochspannungsüberschläge; Sprühen, Zischen im Ton; weiße Streifen oder Sternchen im Bild

6.1.3.3. Farbfernsehen

Grundlagen der Farbenlehre

Durch Mischung der 3 Grundfarben Rot, Grün, Blau läßt sich bei verschiedenen Intensitäten jeder Farbton darstellen. Verwendet werden in der Farbfernsehtechnik (begründet in den Leuchtstoffen der Bildröhre) Rot 610 nm, Grün 535 nm, Blau 470 nm (Tabelle 6.35).

Tabelle 6.35: Mischung der 3 Grundfarben und ihre Wahrnehmung (Intensität als Parameter)

Rot	Grün	Blau	Wahrnehmung auf der Leinwand
Keine	keine	keine	schwarz
Maximal	maximal	maximal	weiß
Mittel	mittel	mittel	hellgrau
Schwach	schwach	schwach	dunkelgrau
Maximal	keine	keine	leuchtend rot
Mittel	keine	keine	weinrot
Maximal	maximal	keine	leuchtend gelb
Schwach	schwach	keine	olivgrün
Maximal	mittel	keine	leuchtend orange
Keine	maximal	keine	leuchtend grün
Keine	maximal	maximal	leuchtend blaugrün (Zyan)
Keine	keine	maximal	leuchtend blau
Maximal	keine	maximal	leuchtend purpur (Magenta)
Mittel	schwach	keine	braun
Stark	mittel	mittel	rosa
Mittel	mittel	stark	bläulich

Spektrum des sichtbaren Lichtes:

380 nm ⟵ ⟶ 780 nm

violett – blau – zyan – grün – gelb – orange – rot

Farben sind bestimmt durch

- Helligkeit (Leuchtdichte)
- Farbton } Farbart
- Farbsättigung }

Helligkeit: Stärke der Lichtempfindung, die das Auge wahrnimmt (subjektiv); objektive physikalische Größe ist Leuchtdichte (Einheit cd/m^2);

Farbton: Charakter der Farbe, festgelegt durch die Wellenlänge der Strahlung;

Farbsättigung: Grad des Weißanteils einer Farbe (Pastellcharakter), Spektralfarben (gesättigte Farben) besitzen keinen Weißanteil, Weiß besitzt die Farbsättigung 0 (0%);

Farbart: umfaßt Farbton, Farbsättigung.

Bei gleicher abgestrahlter Energie besitzt das Auge für verschiedene Farben verschiedene Empfindlichkeiten. Am intensivsten erscheint Grün (Bild 6.39).

Farbaufnahmetechnik

Die Farbaufnahme erfolgt mit 3 getrennten Aufnahmeröhren für rot/grün/blau (Bild 6.44). Die Verstärker der Röhren werden so abgeglichen, daß bei einer weißen Fläche alle drei Verstärker die gleiche Ausgangsspannung aufweisen (normiert 1 V). Daraus folgt das Farbbalkentestbild nach Tabelle 6.36. Da aber die Empfindlichkeit des Auges für verschiedene Farben unterschiedlich ist, muß in der Wiedergabeeinrichtung eine Anpassung des Amplitudenganges an die Farbempfindung

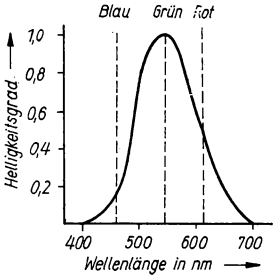


Bild 6.39. Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei verschiedenen Wellenlängen

Tabelle 6.36: Farbbalkentestbild

Farbbalken	Rot	Grün	Blau	Y	$R-Y$	$B-Y$
Weiß	1	1	1	1	0	0
Gelb	1	1	0	0,89	0,11	−0,89
Zyan	0	1	1	0,70	−0,70	0,30
Grün	0	1	0	0,59	−0,59	−0,59
Purpur	1	0	1	0,41	0,59	0,59
Rot	1	0	0	0,30	0,70	−0,30
Blau	0	0	1	0,11	−0,11	0,89
Schwarz	0	0	0	0	0	0

des Auges nach Bild 6.40 erfolgen. Gleichzeitig muß darin die verschiedene Leuchtstärke der Farbstoffe der Bildröhre ausgeglichen werden.

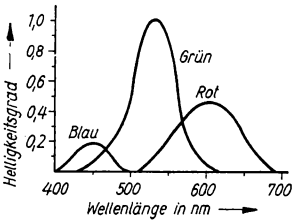


Bild 6.40. Helligkeitsbewertete RGB-Kurven

Übertragung von Farbbildern

Die Übertragung muß aus ökonomischen Gründen so erfolgen, daß Farbsendungen auch mit Schwarz/Weiß-Empfängern (als schwarz/weiß) und Schwarz/Weiß-Sendungen mit Farbempfängern (als schwarz/weiß) empfangen werden können (*Kompatibilität*).

Daraus folgen die Forderungen:

- Bandbreite für die Übertragung 5 MHz,
- Modulations- und Synchronisationsimpulsschema wie bei Schwarz/Weiß-Technik,
- Kanalbreite 7 MHz (VHF), 8 MHz (UHF),
- Übertragung eines Helligkeitssignals im Restseitenbandverfahren (Leuchtdichtesignal Y, Luminanzsignal) und eines Farbartsignals (Chrominanzsignal),
- Farbsignal darf Leuchtdichtesignal nicht beeinflussen und liegt innerhalb des Leuchtdichtefrequenzbandes.

Zur Übertragung des Farbartsignals genügt eine Bandbreite von ≈ 1 MHz, da das Auge auf Fehler in der Farbwiedergabe weniger empfindlich reagiert (Bild 6.41).

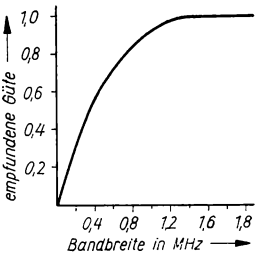


Bild 6.41. Empfundene Güte des Farbsignals als Funktion der Bandbreite der Farbdifferenzsignale

Daraus folgt das Übertragungsprinzip nach Bild 6.42.

Die Übertragung des Luminanzsignals erfolgt wie bei Schwarz/Weiß-Fernsehen. Das Chrominanzsignal wird mit einem gesonderten Farbhilfsträger übertragen. Der Abstand beider Träger beträgt nach europäischer Norm ≈ 4,43 MHz. Das Luminanz- und das Chrominanzspektrum werden ineinander verschachtelt (Bild 6.43).

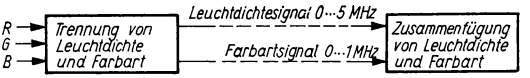


Bild 6.42. Prinzip der konstanten Leuchtdichte

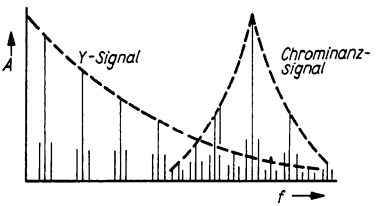


Bild 6.43. Bandverschachtelung des Luminanz- und Chrominanzsignals

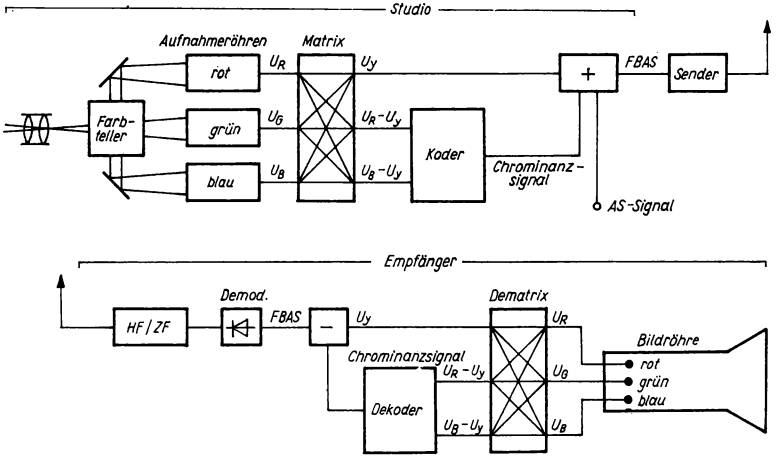


Bild 6.44. Übertragungsprinzip des Farbfernsehens

Die verschiedenen Farbfernsehsysteme unterscheiden sich in der Art der Modulation des Farbhilfsträgers mit dem Farbartsignal. Die 3 Primärfarbsignale R, G, B liefern entsprechend Bild 6.40 (helligkeitsbewertete RGB-Spektralkurve) einen Beitrag zum Leuchtdichtesignal Y. Für Weiß ($Y = 1$) folgt daraus

$$Y = 0{,}3R + 0{,}59G + 0{,}11B.$$

Bei gleichem Verhältnis von RGB, aber $Y < 1$, entstehen die verschiedenen Grautöne. Y-Signal des Farbbalkentestbildes s. Tabelle 6.36.
Von den 3 Farbartsignalen werden nur 2 zur Übertragung benötigt, da das dritte sich aus dem Y-Signal nach vorstehender Gleichung ableiten läßt. Es wurde festgelegt, die Farbdifferenzsignale $(R - Y)$, $(B - Y)$ zu übertragen. Für $(G - Y)$ folgt

$$(G - Y) = -0{,}51(R - Y) - 0{,}19(B - Y).$$

Die beiden Chrominanzsignale werden dem Farbhilfsträger aufmoduliert. Zusammen mit Austast- und Synchronimpulsen (s. 6.1.3.1.) bilden Luminanz- und Chrominanzsignal das FBAS-Signal. Übertragungsprinzip des Farbfernsehens s. Bild 6.44.

Farbfernsehsysteme unterscheiden sich in der Art der Modulation des Farbhilfsträgers mit dem Chrominanzsignal.

NTSC

Zwei um 90° in der Phase gegeneinander versetzte Hilfsträgerschwingungen der gleichen Frequenz 4,43 MHz werden mit den Farbdifferenzsignalen $(R - Y)$, $(B - Y)$ amplitudenmoduliert (Bild 6.45).

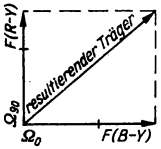


Bild 6.45. Amplitudenmodulation von zwei um 90° versetzten Farbhilfsträgerschwingungen

Beide modulierten Träger werden in einer Addierstufe zu dem nichtreduzierten Farbartsignal zusammengefaßt. Durch Quadraturmodulator erfolgt Unterdrückung der Farbhilfsträger (Bild 6.46). Daraus folgt:

$$F_n = (R - Y)^2 + (B - Y)^2; \quad \tan\alpha = (R - Y)/(B - Y)$$

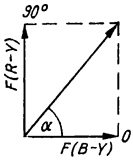


Bild 6.46. Zeigerdarstellung nach Bild 6.45 bei unterdrücktem Hilfsträger

Die Farbart wird bestimmt durch Amplitude und Phasenwinkel zu einer Bezugsphase.
Eine Überlagerung mit dem nichtreduzierten Farbartsignal nach Tabelle 6.36 würde den Trägerpegel überschreiten. Daher Reduzierung $(R - Y)$ mit dem Faktor 0,88 und $(B - Y)$ mit dem Faktor 0,49 (Tabelle 6.37).

Tabelle 6.37: Reduzierte Farbartsignale und Phasenwinkel

Farbbalken	$(R - Y)$ 0,88	$(B - Y)$ 0,49	F	α in °
Weiß	0	0	0	0
Gelb	0,096	−0,44	0,44	167
Zyan	−0,61	0,15	0,63	284
Grün	−0,52	−0,29	0,59	241
Purpur	0,52	0,29	0,59	61
Rot	0,61	−0,15	0,63	104
Blau	−0,096	−0,44	0,44	347
Schwarz	0	0	0	0

Die Amplitude des Farbartsignals entspricht der Farbsättigung, der Phasenwinkel α dem Farbton (Bild 6.47).

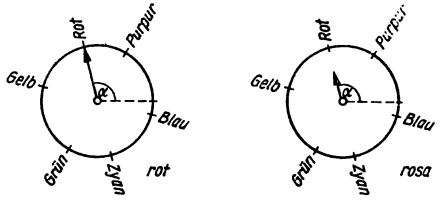


Bild 6.47. Bestimmung der Farbart aus Amplitude und Phasenwinkel zu einer Bezugsphase

Nachteil: Der Phasenwinkel kann auf dem Übertragungsweg verfälscht werden — Änderung des Farbtons.

Vorteil: Der Träger wird unterdrückt. Ein nichtunterdrückter Träger ist im Bild als »Perlenschnur« sichtbar.

PAL (phase alternation line)

Weiterentwicklung des NTSC-Verfahrens.

Ziel: wirksamer Ausgleich der Phasenfehler des NTSC-Verfahrens durch Vorzeichenwechsel des um 90° gedrehten Farbhilfsträgers von Zeile zu Zeile (Bild 6.48).

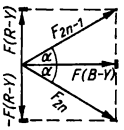


Bild 6.48. Zeigerdarstellung zweier aufeinander folgender Zeilen

Verfälschung des Farbartsignals um β im Bild 6.49.

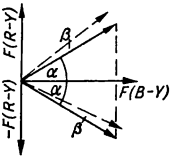


Bild 6.49. Zeigerdarstellung zweier aufeinander folgender Zeilen bei auftretendem Phasenfehler β

Wird das Signal $F_{-\alpha+\beta}$ um 180° gedreht und zu dem Signal $F_{\alpha+\beta}$ geometrisch addiert, kann der Ursprungswinkel α wiederhergestellt werden (Bild 6.50).

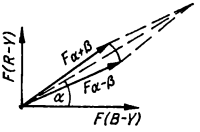


Bild 6.50. Korrektur des Phasenfehlers beim PAL-System

Ähnlich dem Farbhilfsträger des Senders wird im Empfänger ein Referenzträger erzeugt, der synchron zum Farbhilfsträger arbeiten muß. Zur Synchronisation beider Träger wird ein Farbsynchronsignal auf der hinteren Schwarzschulter des Zeilenimpulses übertragen, der *Burst* (Bild 6.51).

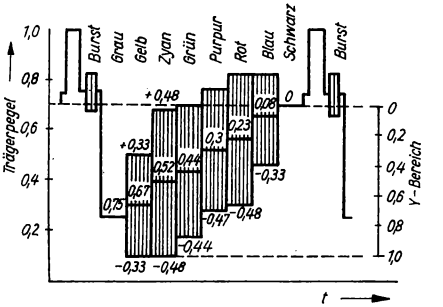


Bild 6.51. Pegel des Farbbalkentestbildes

SECAM

Farbdifferenzsignale werden nicht gleichzeitig (simultan), sondern abwechselnd (sequentiell) je Zeile (64 µs) übertragen. Die Farbart wird daher nur von beiden Farbdifferenzsignalen bestimmt (Bild 6.52). Die Modulationsart kann beliebig gewählt werden (festgelegt FM).

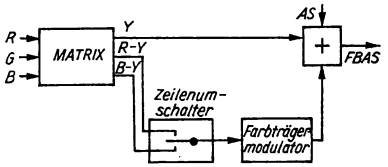


Bild 6.52. Prinzip des SECAM-Koders

Koeffizienten für den Frequenzhub: $D_R = -1{,}9(R - Y)$

$D_B \mp 1{,}5(B - Y)$

Koeffizienten werden auf 75% reduziert (Tabelle 6.38). Farbhilfsträger können nicht in das Leuchtdichtesignal verschachtelt und unterdrückt werden. Optimale Störunterdrückung bei den Ruhefrequenzen:

$F_{r(DB)} = 272 f_Z = 4{,}250\ \text{MHz} \pm 2\ \text{kHz}$

$F_{r(DR)} = 282 f_Z = 4{,}406\,25\ \text{MHz} \pm 2\ \text{kHz}$

Tabelle 6.38: SECAM-Farbdifferenzsignale

Farbbalken	R	G	B	Y	$0{,}75D_R$	$0{,}75D_B$
Weiß	1	1	1	1	0	0
Gelb	0,75	0,75	0	0,66	−0,16	−1,0
Zyan	0	0,75	0,75	0,53	1,0	0,34
Grün	0	0,75	0	0,45	0,84	−0,66
Purpur	0,75	0	0,75	0,30	−0,84	0,66
Rot	0,75	0	0	0,23	−1,0	−0,34
Blau	0	0	0,75	0,09	0,16	1,0
Schwarz	0	0	0	0	0	0

Video-Preemphasis: Zur Verbesserung des Übertragungsverhaltens Anhebung der hohen Frequenzen. Dazu ist Begrenzung des Frequenzhubes erforderlich.

Maximaler Frequenzhub

$f_{DR\,max} \begin{cases} +350\ \text{kHz} \pm 10\% \\ -500\ \text{kHz} \pm 10\% \end{cases}$ $f_{DB\,max} \begin{cases} +500\ \text{kHz} \pm 10\% \\ -350\ \text{kHz} \pm 10\% \end{cases}$

D_R- und D_B-Signale s. Bild 6.53.

Normiertes Farbbalkentestbild s. Tabelle 6.39.

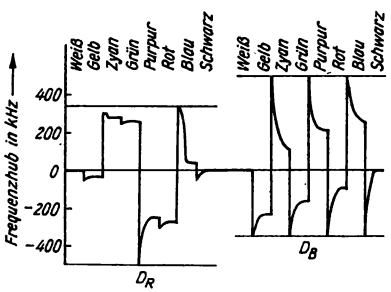


Bild 6.53. D_R- und D_B-Signale für das Farbbalkentestbild mit Video-Preemphasis

Tabelle 6.39: 75%-Farbbalkentestbild

Farbbalken	$F_{(DR)}$		$F_{(DB)}$	
	Hub kHz	Amplitude mV	Hub kHz	Amplitude mV
Weiß	0	206	0	166
Gelb	−45	184	−230	350
Zyan	280	457	78	170
Grün	235	418	−152	270
Purpur	−235	206	152	204
Rot	−280	242	−78	206
Blau	45	245	230	266
Schwarz	0	206	0	166

Kennzeichnung der Zeile durch Kennimpulse im Sendersignal.

Vergleich der Farbfernsehsysteme PAL und SECAM s. Tabelle 6.40 und Bild 6.54.

Tabelle 6.40: Gewinnung des FBAS-Signals (Bild 6.54)

Kenngröße	PAL	SECAM
Leuchtdichtesignal	$Y = 0{,}3R + 0{,}59G + 0{,}11B$	
Farbdifferenzsignale, Hubkoeffizienten	$(R - Y)$, $(B - Y)$	$D_R = -1{,}9(R - Y)$ $D_B = 1{,}5(B - Y)$
Reduktion	$0{,}877(R - Y)$ $0{,}493(B - Y)$	$0{,}75D_R$ $0{,}75D_B$
Farbartsignale	$F = \sqrt{[0{,}877(R-Y)]^2 + [0{,}493(B - Y)]^2}$	$f_R = 0{,}75D_R \cdot 280$ (in kHz)
	$\tan\alpha = \frac{0{,}877(R - Y)}{0{,}493(B - Y)}$	$f_B = 0{,}75D_B \cdot 230$ (in kHz)
FBAS-Signal	Überlagerung von Leuchtdichtesignal, Farbartsignal, Synchronimpulse, Phasen- und Zeilenkennimpulsen	

Farbfernsehempfangstechnik

Vergleich der Übertragungseigenschaften PAL/SECAM s. Tabelle 6.41. Bild 6.55 zeigt das Blockschaltbild eines Farbfernsehempfängers. Schraffierte Baugruppen sind typisch für Farbempfang.

Tabelle 6.41: Vergleich der Farbfernsehsysteme (Bezugspunkt NTSC)

Kenngröße	SECAM	PAL
Farbbildschärfe	horizontal: etwas schlechter vertikal: etwas schlechter	gleich etwas schlechter
Großflächige Farbtreue	gleich	gleich
Sichtbarkeit des Farbträgers	etwas schlechter	gleich
Amplitudengangfehler	viel besser	etwas besser
Gruppenlaufzeitfehler	gleich	gleich
Pegelabhängige Phase	viel besser	viel besser
Rauschen	etwas schlechter	etwas besser
Weitverkehrsverbindungen	besser	besser

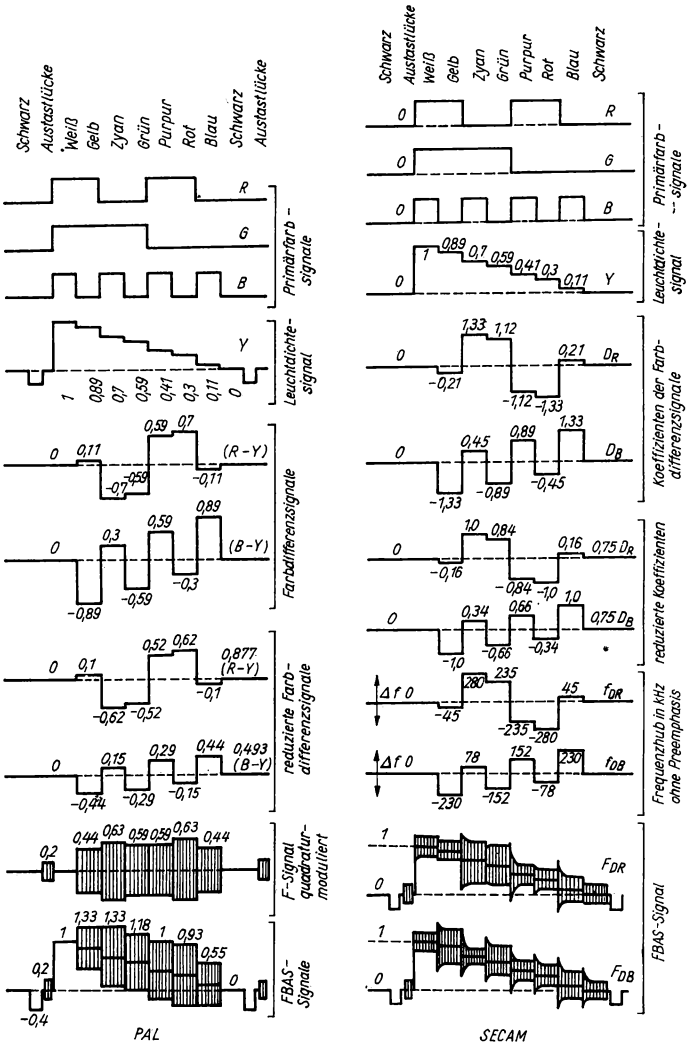


Bild 6.54. Vergleich der Bildung des FBAS-Signals bei PAL- bzw. SECAM-Verfahren

Durch unterschiedliche Übertragung der Farbinformation bei PAL/SECAM unterschiedlicher Aufbau der Dekoder.

Dekoder: Schaltungsanordnung zur Wiedergewinnung des Farbartsignals,

PAL-Dekoder (Bild 6.56)

Burstauftastung: Abtrennung und Verstärkung des Burstsignals,

Farbsynchronisation: Schaltung zur Regelung der Frequenz und Phasenlage des Referenzoszillators durch Auswertung des Burst,

Farbabschaltung: bei fehlendem Burst Sperrung des Farbartverstärkers zur Vermeidung von Störungen,

Addierstufe, Synchrondemodulator: Wiedergewinnung des Farbartsignals durch Summen- bzw. Differenzbildung des *F*-Signals zweier aufeinander folgender Zeilen (1. Zeile wird um 64 µs verzögert)

$F_{2n-1} + F_{2n} = 2(B - Y)$

$F_{2n-1} - F_{2n} = 2j(R - Y)$

$F_{2n} - F_{2n-1} = -2j(R - Y)$

Differenzbildung durch 180°-Phasendrehung. Zur Gewinnung des $(R - Y)$-Signals muß die Phase des Referenzoszillators (Vorzeichen) von Zeile zu Zeile gewechselt werden (PAL-Schalter 0°/180°).

SECAM-Dekoder (Bild 6.57)

Zeilenumschalter: Umschaltung des verzögerten und direkten Signals auf zwei Diskriminatoren von Zeile zu Zeile, dadurch sind stets beide Signale vorhanden; Synchronisation des Zeilenumschalters durch Kennimpulse im Zeilenrücklauf,

Flip-Flop: Schaltungselement zur Zeilenumschaltung.

Farbbildröhren

Bildschirm: streng symmetrische Anordnung von Leuchtstofftripeln (*RGB*), die beim Auftreffen eines Elektronenstrahls zum Leuchten angeregt werden; gleichzeitige Ansteuerung der *RGB*-Komponenten mit gleicher Intensität liefert Schwarz/Weiß-Bild.
Der Elektronenstrahl kann in einem oder drei Systemen erzeugt werden. Der Ansteuerbereich eines Elektronensystems wird durch Loch- oder Schlitzmaske begrenzt (Tabelle 6.42).

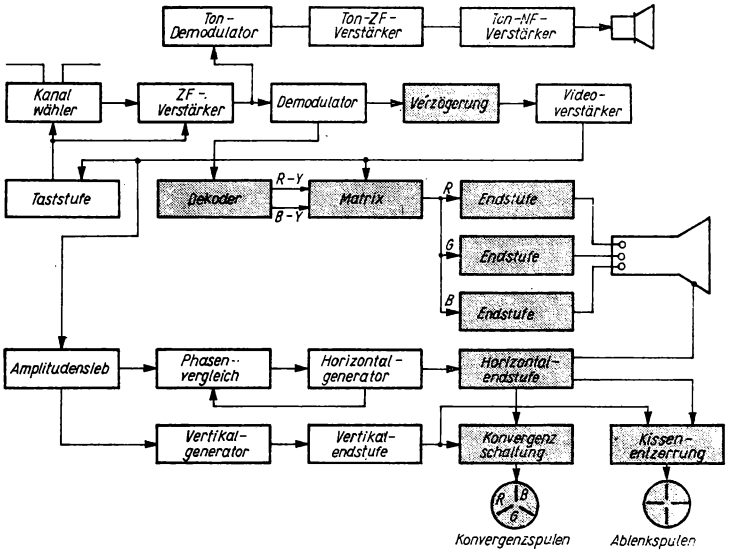


Bild 6.55. Blockschaltbild eines Farbfernsehempfängers

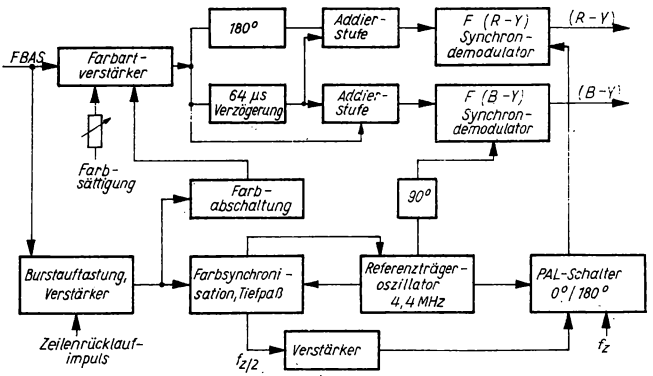


Bild 6.56. PAL-Dekoder (Schaltungsprinzip)

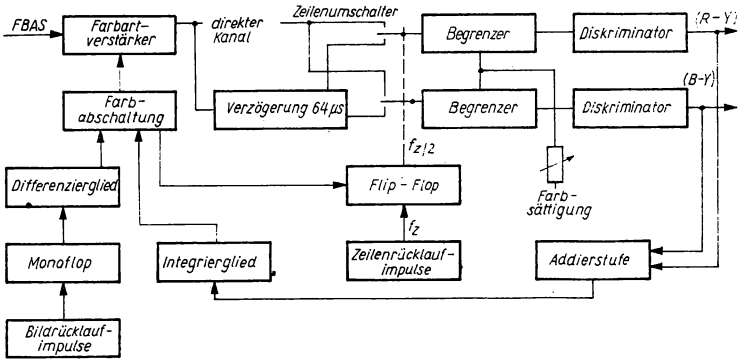


Bild 6.57. SECAM-Dekoder (Schaltungsprinzip)

Tabelle 6.42: Farbbildröhren

	Funktionsprinzip		Vorteile	Nachteile	Kosten[1])
	Farbkonzentration	Farbselektion			
Dreistrahl-maskenröhre	mechanische Ausblendung durch kompakte Lochmaske	statisch projektive System-Schirmzuordnung durch Lochmaske	helle, gesättigte Bilder bei gutem Kontrast, aussteuerungsunabhängige Farbreinheit	geringer Wirkungsgrad, hohe Ablenkleistung, komplizierte Schirm- und Glastechnologie, hohe mechanische Toleranzen, Transmission der Maske 15%	3,5
Dreistrahl-chromatron (Schlitzmaske)	elektronenoptische Ausblendung durch Fokussiergitter	statisch projektive System-Schirmzuordnung durch Fokussiergitter	Gittertransparenz 90% Vergleich mit Maskenröhre: Wirkungsgrad 6fach Leuchtdichte 2fach Steuerspannung $^1/_2$ Ablenkleistung $^1/_3$	Neigung zur Farbentsättigung und Bildverflachung	2,25
Einstrahl-chromatron	elektronenoptische Ausblendung durch Fokussiergitter	dynamisch sequentiell durch farbsignalgesteuerte Mikroablenkung am Fokussiergitter	einfacher Systemaufbau, geringe Ablenkleistung, aussteuerungsunabhängige Farbreinheit	komplizierte Schirmtechnologie, Isolationsprobleme am Schaltgitter, Mikrofonie und Störstrahlung des Gitters, Helligkeit und Kontrast befriedigend	3,5

[1]) Kosten einer Schwarz-Weiß-Röhre ≙ 1

Dreistrahlmaskenröhre: Der Röhrenhals enthält drei getrennt steuerbare Strahlsysteme, um 120° versetzt. Der Farbschirm besteht aus $\approx 10^6$ Leuchtstoffpunkten zu je einem Drittel aus Rot, Blau, Grün. Vor dem aluminiumhinterlegten Leuchtschirm wird die aus dünnem Stahlblech und mit etwa $3 \cdot 10^5$ rhombisch angeordneten Löchern versehene Blende montiert. Je einem Blendenloch ist ein Farbtripel zugeordnet (Bild 6.58).

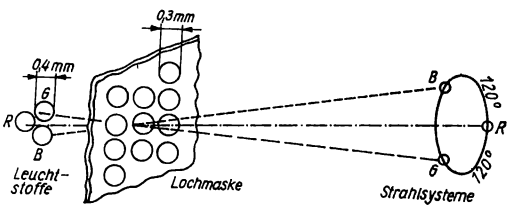


Bild 6.58. Prinzip der Lochmaskenröhre

Dreistrahl-Chromatron: Maskenröhre mit senkrecht verlaufender Streifenstruktur des Farbschirms (Schlitzmaske),

Einstrahl-Chromatron: dynamische Farbzuordnung ohne Maske durch strenge synphase Verkopplung zwischen zyklischen Farbsignalen und Strahlposition auf dem Bildschirm; hochfrequente Mikroablenkung an einem Bipotentialgitter,

Konvergenzschaltung: Symmetrierung der drei Elektronenstrahlsysteme durch unterschiedliche Ablenkung im Magnetfeld zur exakten Wiedergabe der Farbsignale,

Matrix: Gewinnung des *RGB*-Signals aus den Farbdifferenzsignalen $(R - Y)$, $(B - Y)$ und dem Y-Signal,

Kissenentzerrung: Erzeugung von Korrekturströmen zur Modulation der Vertikalablenkströme der drei Strahlsysteme, dadurch Wiedergewinnung eines Rechteckbildes.

6.1.4. Bedienungskomfort für elektronische Heimgeräte

Ultraschallfernbedienung: Verwendung diskreter Frequenzen im Ultraschallbereich zur Auslösung von Schaltvorgängen.

Tabelle 6.43: Frequenzspektrum einer Ultraschallfernbedienung eines Fernseh-Rundfunkempfängers

Schaltfunktion	Befehl	Frequenz kHz
Helligkeit	heller	25,6
Helligkeit	geringer	41,0
Farbkontrast	größer	35,0
Farbkontrast	geringer	26,8
Lautstärke	geringer	36,2
Lautstärke	größer	42,2
Programmwahl	zurückschalten	37,4
Programmwahl	weiterschalten	39,8
Netz	ein/aus	38,6

Die Fernbedienungsanlage besteht aus Ultraschallsender und -empfänger (Bild 6.59). Zur Abstrahlung und Aufnahme werden Ultraschallwandler eingesetzt.

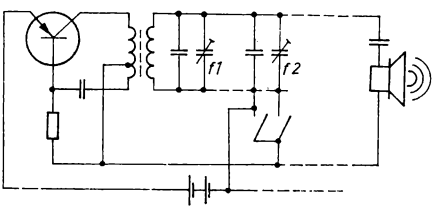


Bild 6.59. Prinzip der Ultraschallfernbedienung

Automatische Scharfabstimmung (AFC) (nach TGL 8836)

Elektrisch wirksame Einrichtung zur selbsttätigen fast genauen Nachstimmung eines Empfängers auf ein ausreichend großes HF-Eingangssignal, wenn seine Empfangsfrequenz — ohne die Nachstimmeinrichtung — von der Frequenz des HF-Eingangssignals innerhalb bestimmter Grenzen abweicht. Die Güte der AFC läßt sich durch den Frequenzfehler, den Fang- und Haltebereich beurteilen.

Frequenzfehler: nach dem Abstimmvorgang verbleibende Differenz zwischen Sende- und Empfangsfrequenz (Bild 6.60).

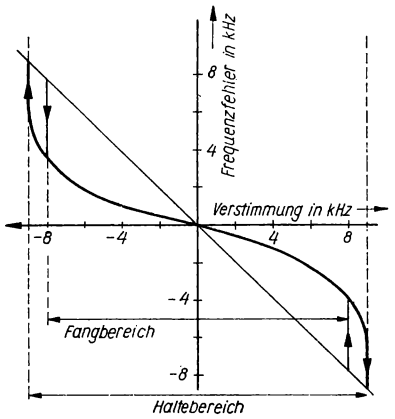


Bild 6.60. Frequenzfehler einer AFC

Berührungsschaltautomatik (Sensortasten)

Durch Berühren zweier leitender Flächen über den Hautwiderstand wird ein Schaltvorgang ausgelöst.

Vorteile: prellfreies Schalten, Wegfall mechanischer Kontakte, praktisch verschleißfrei, vielfältige Schaltungsvarianten möglich, günstigste schaltungstechnische Anordnung wählbar;

Nachteile: Umstellung der Schaltgewohnheiten, Rückmeldung des Schaltvorgangs erforderlich.

Funktionsprinzip (Stern Sensomat 3000) s. Bild 6.61.

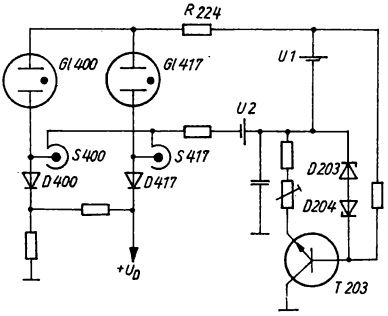


Bild 6.61. Schaltungsvariante von Sensorbedienelementen

Spannung zur Steuerung der Kapazitätsdioden des Tuners an $+U_D$. Bei Zündung von Gl 400 bei $+U_D = 2{,}65$ V, von Gl 417 bei $+U_D = 8{,}43$ V. Damit ist ein Abstimmbereich von 87,5···100 MHz (UKW) erfaßbar. Umschalten von Gl 400 z. B. auf Gl 417 durch Überbrückung des Sensorkontaktes S 417 bewirkt Einspeisung einer zusätzlichen Zündspannung U_z zur sicheren Zündung von Gl 417. Durch D 417 erfolgt Blockierung von Gl 400. Zusätzlicher Strom durch Gl 417 führt zum Spannungsabfall an R_{224}, dadurch Löschung von Gl 400. T 203 zur Spannungsstabilisierung.

6.1.5. Einsatz integrierter Schaltkreise

Die gegenwärtig noch vorherrschenden aktiven Bauelemente in Hör- und Fernsehrundfunkempfängern sind Transistoren, die aber in absehbarer Zeit durch integrierte Schaltkreise mit der Funktion ganzer Baugruppen abgelöst werden. Eine Auswahl bereits jetzt im Einsatz befindlicher Schaltkreise s. Tabelle 6.44.

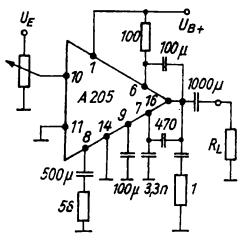


Bild 6.62. Anwendung der IS A 205

Tabelle 6.44: Beispiele zum Einsatz integrierter Schaltkreise

Typ, Einsatzgebiet	Richtwerte
A 205 D, K	
NF-Verstärker für Rundfunk-, Fernseh-. Fonogeräte Ausgangsleistung bei entsprechender Kühlung 5 W (Bild 6.62)	$U_B = 4$···20 V Ruhestrom ($U_B = 9$ V) $I_{BO} = 15$ mA ($U_B = 15$ V) $I_{BO} = 20$ mA Eingangsspannung ($P_a = 2{,}5$ W) $U_e = 70$ mV Klirrfaktor ($P_a = 2{,}5$ W) $k = 2\%$ ($P_a = 4{,}5$ W) $k = 10\%$
A 230 D	
RGB-Matrix für Farb-TV-Geräte, direkte Ansteuerung der Videoendstufe	$U_B = 15$ V $I_{BO} = 150$ mA *Y*-Signalverstärkung 2,2···3
A 240 D	
Bild-ZF-Verstärker für Schwarz/Weiß- und Farbfernsehgeräte (s. Bild 6.63)	$U_B = 15$ V $I_B = 50$ mA Regelumfang $V_{ZF} = 50$ dB Videobandbreite 7 MHz
A 250 D	
Horizontalkombination zur Impulsabtrennung und Zeilensynchronisation in Fernsehempfängern	$I_B = 50$ mA Amplitude des Bildsynchronimpulses = 8 V

Tabelle 6.44 (Fortsetzung)

Typ, Einsatzgebiet	Richtwerte
A 270 D Verstärkerkombination für Video- bzw. Luminanzsignal, Funktionsgruppen zur Strahlstrombegrenzung, Schwarzwerttastung, Helligkeitsklemmschaltung	U_B = 15,5 V I_B = 36 mA $-I_a$ = 20 mA P_{tot} = 700 mW Videobandbreite = 6 MHz
A 281 D AM/FM-ZF-Verstärker (Bild 6.64)	AM: Spannungsverstärkung 90 dB Regelumfang 60 dB Klirrfaktor 6% FM: Spannungsverstärkung 80 dB AM-Unterdrückung 50 dB
A 211 D 1-W-NF-Verstärker (Bild 6.65)	Spannungsverstärkung 50 dB Klirrfaktor (850 mW) 1,3% (50 mW) 1,4% Signal/Rauschabstand (1 W) 50 dB Eingangswiderstand 400 kΩ
A 220 D Fernseh-Ton-ZF-Verstärker	Begrenzung 36 µV Signal/Rauschabstand (200 µV) 60 dB AM-Unterdrückung 60 dB NF-Ausgangsspannung 1,15 V Klirrfaktor 2,8%

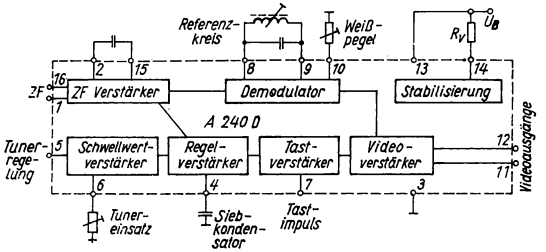


Bild 6.63. Prinzipaufbau der IS A 240

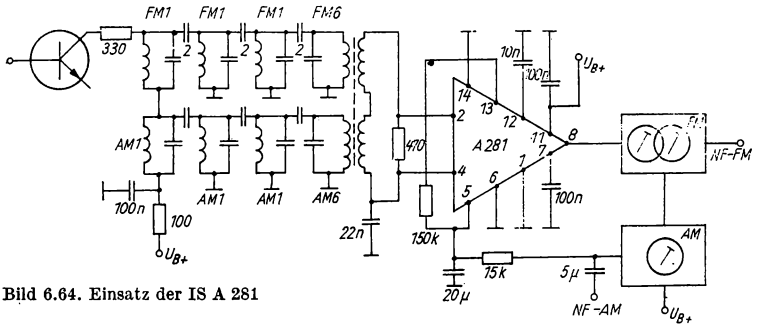


Bild 6.64. Einsatz der IS A 281

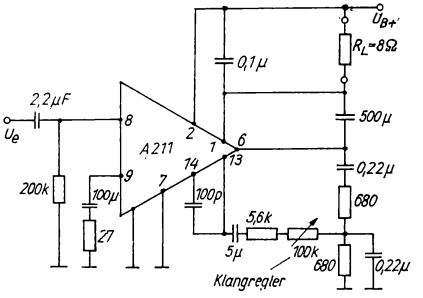


Bild 6.65. Anwendung der IS A 211

6.2. Fernsprechtechnik

6.2.1. Allgemeines

Der Fernsprechverkehr ermöglicht einen unmittelbaren Nachrichtenaustausch in der Regel zwischen zwei Personen durch gesprochene Wörter, auch über größere Entfernungen hinweg. Zur Nachrichtenübermittlung dienen *elektrische oder elektromagnetische Schwingungen.* Die gesprochenen Wörter erzeugen Schallschwingungen, die im Frequenzbereich zwischen 16 und 20000 Hz liegen. Beim Fernsprechen wird für die Hörverständlichkeit der Sprache ein Sprachband von nur 300···3400 Hz übertragen, das ausreicht, um eine gute Silbenverständlichkeit zu erhalten.

Die Übertragung von Gesprächen erfolgt durch elektrotechnische Einrichtungen. Die auftretenden *Schallwellen* werden im Kohlemikrofon in elektrische Strom- oder Spannungsschwankungen umgewandelt. Die Stromschwankungen durchfließen die Primärwicklung einer Induktionsspule und ergeben in der Sekundärseite *Sprechwechselströme,* die entweder auf die Freileitung oder Kabel (drahtgebunden) gegeben oder bei sehr großen Entfernungen drahtlos übertragen werden. Die Rückwandlung der von Mikrofon und Induktionsspule am Sendeort erzeugten Sprechwechselströme in Schallschwingungen erfolgt im Fernhörer am Empfangsort. Die ankommenden Sprechwechselströme durchfließen die auf den Weicheisenpolschuhen des Dauermagneten befindlichen Spulen. Dadurch wird der vorhandene Kraftlinienfluß im Rhythmus der ankommenden Sprechwechselströme verstärkt oder geschwächt. Dabei gerät die bereits durch den Dauermagnetismus vorgespannte Membran in Schwingung. Die *Schwingungen* werden auf die umgebende Luft übertragen und gelangen auf diese Weise zum Ohr.

6.2.2. Grundschaltungen und Betriebsarten

6.2.2.1. Direkte Schaltung

Fernhörer, Mikrofon und Stromquelle sind in Reihe mit der Leitung angeordnet (Bild 6.66).

Nachteile der Schaltung: Der Fernhörer wird unnütz von Gleichstrom durchflossen. Bei Verlängerung der Leitung wird der Leitungswiderstand größer, der Speisestrom kleiner. Entsprechend werden sich die Widerstandsschwankungen des besprochenen Mikrofons durch die übrigen festen Widerstände in ihrer Gesamtwirkung stark abschwächen, die Verständlichkeit leidet.

Die direkte Schaltung wird deshalb nicht mehr beim Fernsprechbetrieb, sondern nur in einfachen Anlagen, z. B. Heimfernsprechern, angewendet.

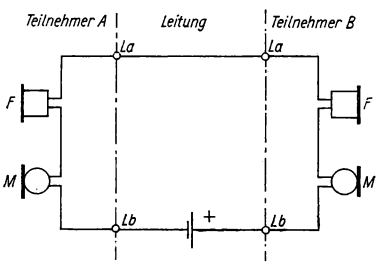


Bild 6.66. Direkte Schaltung von Mikrofon und Fernhörer

6.2.2.2. Indirekte Schaltung

Bei der indirekten Schaltung (Bild 6.67) sind das Mikrofon und der Fernhörer über eine Induktionsspule induktiv gekoppelt. Das Mikrofon liegt mit der Primärwicklung einer Induktionsspule im Stromkreis der Batterie, während der Fernhörer mit der Sekundärwicklung der Induktionsspule hintereinandergeschaltet ist. Die Induktionsspule hat die Aufgabe, die Sprechspannung hochzutransformieren, um die Leitungswiderstände leichter zu überwinden.

Vorteile der Schaltung: Galvanische Trennung von Mikrofon und Fernhörer, volle Aussteuerung des Mikrofons infolge des kleinen Widerstands im Mikrofonkreis, Erzielung einer erheblich größeren Reichweite gegenüber der direkten Schaltung.

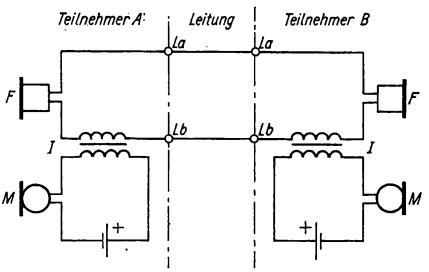


Bild 6.67. Indirekte Schaltung von Mikrofon und Fernhörer

6.2.2.3. Ortsbatterie-System

Beim *Ortsbatterie-Betrieb* (OB) befindet sich die Batterie für die Speisung des Mikrofons am Ort des OB-Fernsprechapparats. Sie ist entweder im Apparat eingebaut oder befindet sich bei ihm. Die Betriebsspannungen liegen zwischen 1,5 und 12 V. Meist werden Trockenelemente oder Kleinakkumulatoren verwendet. Die zur Versorgung von Gleich- und Wechselstrom notwendigen Bauteile sind im OB-Apparat untergebracht.

Vorteile: Die Stromversorgung ist von der Vermittlungsstelle unabhängig.

Nachteile: Die Pflege der Batterie ist sehr aufwendig. Die Lebensdauer der Batterie ist nicht groß.

6.2.2.4. Zentralbatterie-System

Beim *Zentralbatterie-Betrieb* (ZB) befindet sich die Stromversorgung an einer zentralen Stelle. Zur Erzeugung des Wechselstroms werden anstelle der Kurbelinduktoren Polwechsler oder Ruf- und Signalmaschinen (RSM) eingesetzt. Die Betriebsspannungen betragen 24, 48 oder 60 V. Um Korrosionserscheinungen zu vermeiden, wird beim ZB-Betrieb grundsätzlich der Pluspol der Batterie geerdet.

Vorteile: Stromquellen sind leicht zu überwachen und instandzuhalten, da nicht jede Sprechstelle eine besondere Batterie hat.

6.2.2.5. Rückhördämpfungsschaltung

Beim OB-System

Das Rückhören der eigenen Sprache und der Raumgeräusche im Fernhörer macht sich sehr störend bemerkbar und beeinflußt erheblich die Sprechverständigung. Hinzu kommen noch bei sehr empfindlichen Mikrofonen und Fernhörern die akustischen Rückkopplungen. Zur Vermeidung des Rückhörens wird deshalb die Rückhördämpfungsschaltung angewandt (Bild 6.68). Bei dieser Schaltung ist die zum Leitungskreis liegende Induktionsspule unterteilt. Der Fernhörer ist so eingeschaltet, daß er in zwei Stromkreisen liegt (Brückenschaltung). Die Sprechspule (Primärwicklung) wird von moduliertem Gleichstrom durchflossen und induziert Sprechwechselströme auf die beiden Sekundärwicklungen. Die erzeugten Sprechwechselströme wirken bei jeder Halbwelle im Fernhörer einander entgegen, so daß die beiden sich entgegengerichteten Ströme bei entsprechender Bemessung des bifilaren Widerstandes R gleich groß sind und sich aufheben. Das wird aber wegen der verschiedenen Leitungslängen selten der Fall sein. Die Dämpfungsschaltung soll das Rückhören auch nicht vollständig unterdrücken, sondern nur dämpfen.

Beim ZB-System

Wie beim OB-System ist auch beim ZB-System eine Rückhördämpfung vorgesehen. Für den Fernverkehr ist die Rückhördämpfung zur Erzielung einer höheren Übertragungsgüte eine unerläßliche Forderung. Die Induktionsspule beim ZB-System hat ebenfalls drei Wicklungen, davon zwei in Reihe geschaltete Primärwicklungen (im OB-System bilden die beiden Wicklungen die Sekundärseite) und eine Sekundärwicklung (Bild 6.69). Die Schaltung stellt eine Brückenanordnung dar, wobei im Diagonalzweig das Mikrofon liegt. Der beim Besprechen des Mikrofons erzeugte modulierte Gleichstrom verzweigt sich zu fast gleichen Teilen in entgegengesetzter Richtung in die beiden Primärwicklungen der Induktionsspule, so daß der Fernhörer nur einen Teil des eigenen Sprechstroms empfängt. Der Wider-

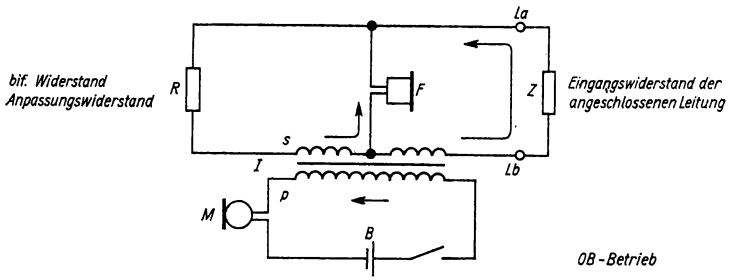


Bild 6.68.
OB-Rückhördämpfungsschaltung

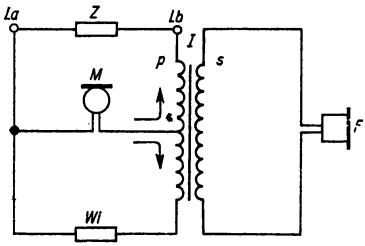


Bild 6.69. ZB-Rückhördämpfungsschaltung

stand Wi hat einen Wert, der dem Durchschnittswert des Eingangswiderstandes Z des angeschlossenen Leitungsteils angeglichen ist.
Die ankommenden Sprechströme durchfließen beide Primärwicklungen in gleicher Richtung, so daß sie voll zur Wirkung kommen.

6.2.3. Fernsprechapparate

6.2.3.1. Ortsbatterie-Fernsprechapparate

zum Anschluß an OB-Ämter mit Handvermittlung. Betriebsspannung 2···4 V, Sprechverständigung bis zu einer Betriebsdämpfung von 3,5 Np.

6.2.3.2. Fernsprechapparate für Wählbetrieb

für den automatischen Fernsprechverkehr. Mit den Apparaten kann der Fernsprechteilnehmer

1. durch Abheben des Handapparats (Gabelumschalters) den Auf- und Abbau der Gesprächsverbindung einleiten,

2. mittels Wahl der betreffenden Rufnummer (Nummernschalter) die für den Verbindungsaufbau nötigen und in der Vermittlungsstelle angeordneten Schaltglieder einstellen,

3. das Gespräch führen,

4. die mit einem Rufsignal (Wecker) angekündigten Anrufe entgegennehmen und

5. bei Verwendung als Nebenstellenapparat durch Drücken der Erdtaste Rückfrage zu einer anderen Nebenstelle halten oder das Amtsgespräch auf eine andere Nebenstelle umlegen.

Die Speisung erfolgt aus einer zentralen Batterie (ZB) der Vermittlungsstelle.
Stromlauf- und Bauschaltpläne verschiedener Fernsprechapparate sind in den Bildern 6.70 und 6.71 wiedergegeben.

6.2.3.3. Hörverstärker

Zur besseren Hörverständigung bei weiten Leitungslängen kann bei den W-Apparaten ein Hörverstärker nachträglich in den Hörstromkreis eingebaut werden. Er setzt die auf längeren Leitungen entstandene Dämpfung wieder herab. Der Verstärker ist mit einem Transistor in Emitterschaltung versehen und als gedruckte Schaltung ausgeführt (Bild 6.72).

6.2.3.4. Münzfernsprecher

Sie werden in Fernsprechwählnetzen vorwiegend zur Durchführung von Ortsgesprächen verwendet. Im Bild 6.73 bedeuten:

a	a-Ader zum Amt	I	Induktionsspule
AK	Alarmkontakt	KM	Kassiermagnet
Al	Alarmleitungen	MF	Münzfühl-Kontakt
b	b-Ader zum Amt	nsr	Kontakte des Nummernschalters
E	Erdanschluß	nsa	
F	Hörkapsel	nsi	
HU	Hakenumschalter	SM	Sprechmikrofon
spm	Kontakte am Sperrmagnet	Dr	Drosselspule
		Ko	Kondensator
Wi	Widerstand	KlM	Klangmikrofon
zk I, zk II	Zusatzkontakte am Nummernschalter (Kulisse I)	SK	Schnarrkontakt
		W	Wechselstromwecker
zk III, zk IV	dito (Kulisse II)		

6.2.3.5. Nummernschalter

Sie gibt es in unterschiedlicher Kontaktbestückung (s. Tabelle 6.45):

Teilnehmernummernschalter mit einem Impulsruhekontakt (nsi-Ruhekontakt),

Amtsnummernschalter mit einem nsi-Arbeitskontakt,

Nummernschalter für Nebenstellen mit mehreren nsi-Kontakten,

Sperrnummernschalter mit einem nsi-Kontakt, Dekaden-, Sperr- und Trägheitskontakten.

Der Nummernschalter gibt beim Ablauf im angeschlossenen Stromkreis Impulse. Das günstigste Impulsverhältnis zwischen Öffnungs- und Schließungszeit liegt bei 1,6:1, die normale Arbeitszeit für den Ablauf der Ziffer Null (10 Impulse) beträgt 1000 ms. Unter Zugrundelegung dieser Sollwerte ergibt sich für einen Impuls (*I*), der 100 ms dauert (1000 ms/10 Impulse), eine Öffnungszeit von ≈ 62 ms und eine Schließungszeit von ≈ 38 ms. Zugelassen werden ein Impulsverhältnis von 1,3:1 bis 1,9:1 und eine Toleranz der Ablaufgeschwindigkeit von ±10% (s. Tabelle 6.46).

Aufgabe der Kontakte (s. Bild 6.74)

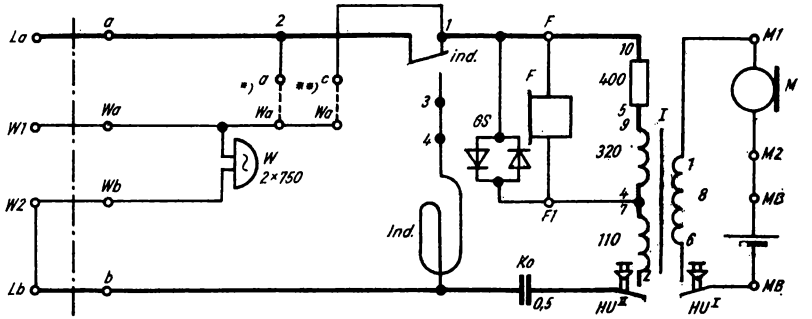
nsi-Kontakt: unterbricht die Leitungsschleife entsprechend der gezogenen Ziffer,

nsr-Kontakt: öffnet vor dem Beginn der Impulsabgabe, schließt vor Beendigung des Ablaufs der Wählscheibe und überbrückt den nsi-Kontakt für die Dauer der Leerlaufzeit,

nsa-Kontakt: schließt während der Stromstoßabgabe den Mikrofon- und Fernhörerstromkreis kurz.

6.2.3.6. Sprech- und Hörkapseln

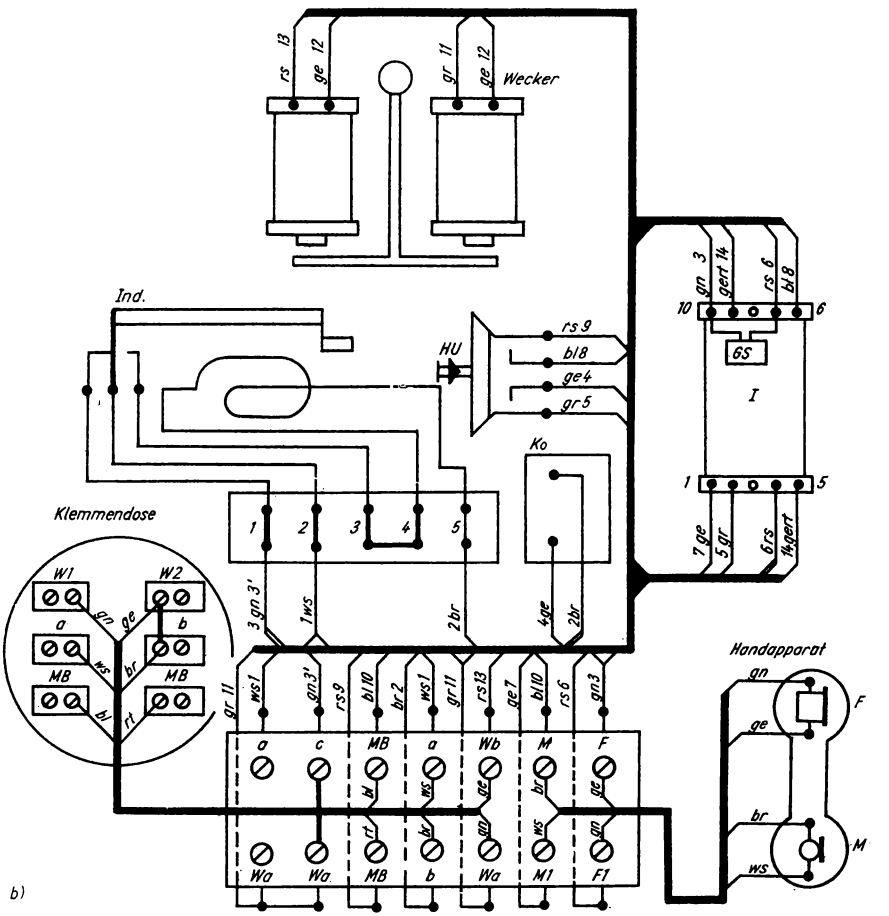
Die *Sprechkapsel* ist meist ein Kohlemikrophon (Membran mit Kohlegrieß-Kammer). Die Sprechkapsel muß lageunabhängig arbeiten, darf keine ausgeprägten Resonanzstellen über dem Frequenzbereich besitzen und soll wenig nichtlineare Verzerrungen verursachen. Der Frequenzgang einer Kohlegrießsprechkapsel ist aus Bild 6.75 ersichtlich.



*)a - Wa verbunden: Wecker läutet beim Rufen (Kurbeln) mit

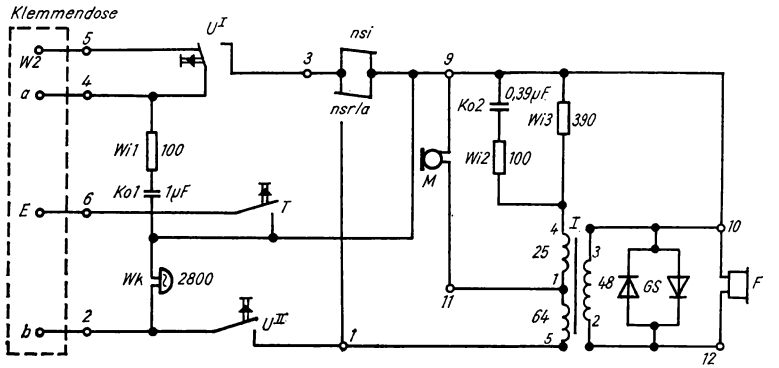
**)c - Wa verbunden: Wecker läutet beim Rufen (Kurbeln) nicht mit

a)

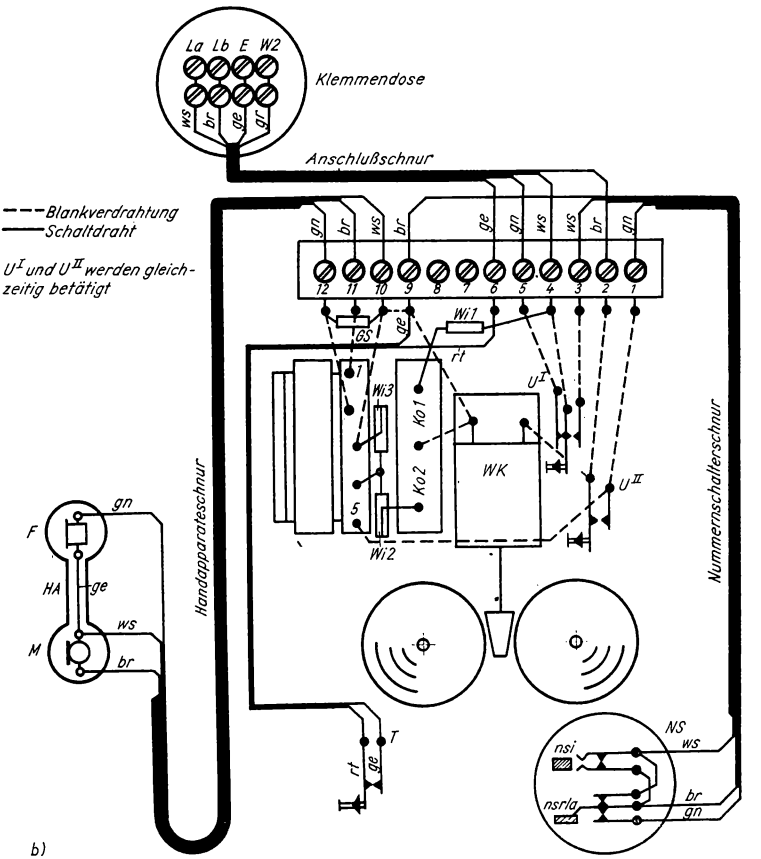


b)

Bild 6.70. Stromlaufplan (a) und Bauschaltplan (b) eines Fernsprechtischapparates Typ OB 53



a)



b)

Bild 6.71. Stromlaufplan (a) und Bauschaltplan (b) eines Fernsprechtischapparates Typ W 63 a

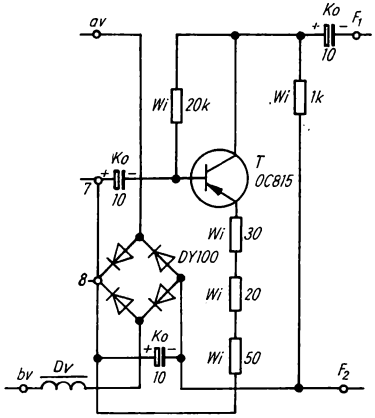


Bild 6.72. Stromlaufplan eines Hörverstärkers für W-Apparate

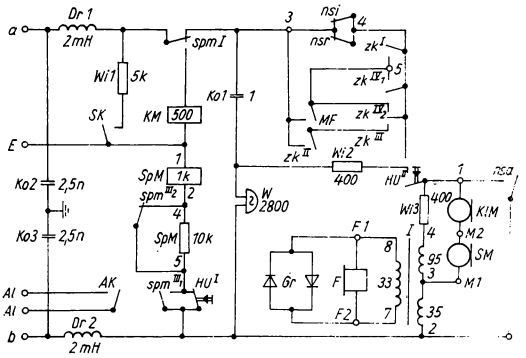


Bild 6.73. Stromlaufplan eines Münzfernsprechers Typ 60

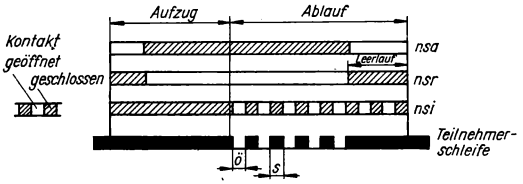


Bild 6.74. Arbeitsweise der Nummernschaltkontakte (nsa, nsr, nsi) eines Drehnummernschalters

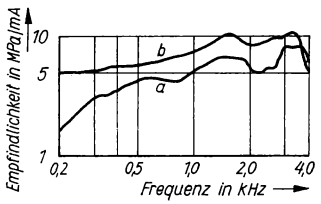
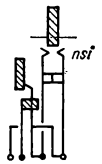
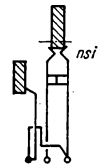
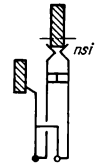
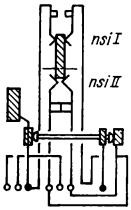
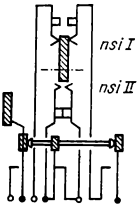


Bild 6.75. Frequenzgang einer Sprechkapsel (a) und einer Hörkapsel (b) eines Fernsprechers

Tabelle 6.45: Kontaktbestückung für Drehnummernschalter (nach TGL 9867)

Typ	Kontakt		Kontakt-federsätze		Stammlänge der Anschluß-schnur cm
A1 A2	2		1		310
B	2	21	21		310
C	2	2	–		180
D	I = 1 II = 2	I = 1 II = 2	211		220
[1] E1 [1] E2 [1] E3 [1] E4	I = 1 II = 2	I = 1 II = 2	1	[2] 	300

[1]) Ablaufzeiten:
E1 = 862···1062 ms, E3 = 862···1062 ms,
E2 = 760··· 800 ms, E4 = 1300···1340 ms.
[2]) nsi-II- und nsi-I-Kontakt schließen nicht gleichzeitig.

Tabelle 6.45 (Fortsetzung)

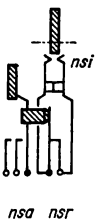
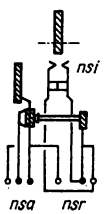
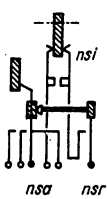
Typ	Kontakt			Kontaktfedersätze	Stammlänge der Anschlußschnur cm
F	2	2	11		300
G	2	2	2–1		300
K	1	1	211		300

Tabelle 6.46: Öffnungs- und Schließungszeit sowie Ablaufzeit bei unterschiedlichen Impulsverhältnissen

Wert	I =	Impulsverhältnis					
	$Ö + S$	1,3:1		1,6:1		1,9:1	
		$Ö$	S	$Ö$	S	$Ö$	S
	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
Oberer Grenzwert	90	51	39	55,5	34,5	59	31
Mittelwert	95	53,7	41,3	58,5	36,5	62,3	32,7
	100	56,5	43,5	61,5	38,5	65,5	34,5
Unterer Grenzwert	110	62,2	47,8	67,7	42,3	72,1	37,9

Wirkungsweise: Der Luftschall der menschlichen Sprache bringt die Membran zum Schwingen. Die Membran übt einen mechanischen Druck auf den Kohlegrieß aus, dieser verursacht im Rhythmus der Sprache eine Veränderung des elektrischen Widerstandes, der wiederum führt bei einer angelegten elektrischen Spannung zu Stromschwankungen.
Die *Hörkapsel* besteht aus einem Elektromagnetsystem, welches im Rhythmus der ankommenden Stromschwankungen die ferromagnetische Membran zu Schwingungen anregt und so die elektrischen Signale in die Sprache zurückverwandelt. Der Frequenzgang einer Hörkapsel ist im Bild 6.75 dargestellt.
Antiparallel zum Fernhörer wird ein *Gehörschutzgleichrichter* (GS) (Germanium-Doppeldiode) eingeschaltet (s. Bilder 6.70 und 6.73). Dieser Gleichrichter wirkt auf Grund seines spannungsabhängigen Widerstands als Amplitudenbegrenzer und damit als Gehörschutz beim Auftreten von Knack- und Knallgeräuschen. Die auftretenden Spannungsspitzen (Amplituden) können durch atmosphärische Störungen, induktive Beeinflussungen von Leitungen oder durch Schaltvorgänge verursacht werden.

6.2.4. Fernsprechvermittlungs-Einrichtungen

6.2.4.1. Fernsprechorts- und -fernverkehr

Im *Ortsverkehr* werden die Gesprächsverbindungen zwischen Sprechstellen eines Ortsnetzes manuell oder automatisch hergestellt. Zum *Ortsnetz* gehören: eine oder mehrere Vermittlungsstellen, die Einrichtungen des Teilnehmers, die öffentlichen Sprechstellen und die Ortsleitungen mit den entsprechenden Verzweigereinrichtungen. Die Vermittlungsstellen sind technische Einrichtungen, in denen die Verbindungen der Fernsprechteilnehmer untereinander abgewickelt werden.

6.2.4.2. Handvermittlungen

Bei der Handvermittlung erfolgt die Verbindung der Teilnehmer untereinander manuell durch die Vermittlungskraft am *Vermittlungsschrank*. Je nach Speisungsart der Sprechstellen unterscheidet man die älteren OB-Schränke und die neueren ZB-Schränke. Beim *OB-Betrieb* ruft der Teilnehmer durch Drehen der Induktorkurbel. Als Anruf- und Schlußzeichen dienen bei den OB-Schränken Fallklappen (Klappenschränke), während bei den *ZB-Schränken* (Glühlampenschränke) an die Stelle der Fallklappen Glühlampen treten.

6.2.4.3. Automatische Wählvermittlungen

Bei automatischem Wählbetrieb werden sämtliche Schaltvorgänge durch *Relais* und *Wähler* ausgeführt. Die Wähler sind elektromagnetische Schrittschaltwerke, die durch die Stromimpulse des Nummernschalters vom Teilnehmer gesteuert werden. Meistens kommen zehnteilige Drehwähler und hundertteilige Hebdrehwähler zur Anwendung.

6.2.4.4. Bauteile der Vermittlungstechnik

Relais

Relais sind elektromagnetisch oder thermisch betätigte Schalter zum Ein-, Aus- und Umschalten von elektrischen Stromkreisen. Man unterscheidet *neutrale* und *gepolte Relais* und nach der Zeitfolge zwischen Relaiserregung und Kontaktgabe *unverzögerte* und *verzögerte Relais*.
Die gebräuchlichen *Spannungen* und ihre Toleranzen:

$60\ \text{V}\ {}^{+\ 6\ \text{V}}_{-\ 4\ \text{V}}$ (56···66 V), $24\ \text{V}\ {}^{+\ 4\ \text{V}}_{-\ 2\ \text{V}}$ (22···28 V) und

$12\ \text{V} \pm 2\ \text{V}$ (10···14 V).

Die gebräuchlichen *Stromwerte:*

Fehlstrom, bei dem das Relais noch nicht anzieht (Anker behält seine Ruhelage bei),

Anzugstrom, bei dem der Anker sicher anzieht,

Haltestrom, bei dem der angezogene Anker noch seine Arbeitslage mit Sicherheit beibehält,

Abfallstrom, bei dem der angezogene Anker wieder seine Ruhelage einnimmt.

Neutrale gleichstromerregte Relais

Am häufigsten wird das neutrale Relais mit Gleichstromerregung in den Schaltungen der Fernsprechtechnik benutzt. Es ist ein *elektromagnetischer Schalter*, der grundsätzlich aus Weicheisenkern, Joch, Weicheisenanker, Erregerspule und Kontaktfedersatz besteht. Fließt durch die Erregerspule des Relais ein elektrischer Strom, wobei seine Richtung beliebig sein kann, so wird der Anker angezogen und schaltet die Kontakte, die andere Stromkreise öffnen oder schließen. Zu diesem Relais gehören u. a. die großen Rundrelais 26 und 51 und das Flachrelais 48 (s. Bilder 6.76···6.78). Tabelle 6.47 enthält Richtwerte des Flachrelais 48.

Neutrale wechselstromerregte Relais

Wird ein neutrales Relais mit Wechselstrom erregt, so schnarrt der Anker im Takt der doppelten Frequenz des Wechselstroms. Um das zu verhindern und ein gleichmäßiges Anziehen des

Ankers zu erreichen, verwendet man *Wechselstromphasenrelais*, bei denen man zwischen Relais mit getrennten Eisenkreisen (Wechselstromphasenrelais 30; Bild 6.79) und Relais mit einer Kurzschlußwicklung (z. B. Wechselstromphasenrelais 32) unterscheidet. Das Relais mit getrennten Eisenkreisen besteht

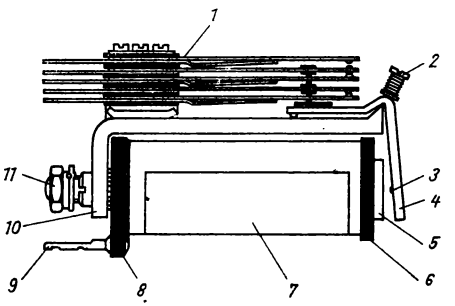


Bild 6.76. Rundrelais 51 mit Schneidenankerlagerung
1 Kontaktfedersatz, 2 Ankerhalteschraube mit Feder, 3 Trennstift, 4 Anker, 5 Polschuh, 6 vordere Spulenscheibe, 7 Relaisspule, 8 hintere Spulenscheibe, 9 Lötstift, 10 Joch, 11 Kern mit Befestigungsmutter

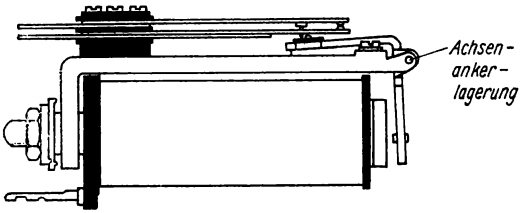


Bild 6.77. Rundrelais 26 mit Achsenankerlagerung

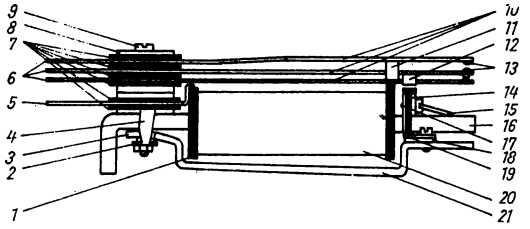


Bild 6.78. Flachrelais 48
1 Spulenscheibe, 2 Feder, 3 Ankerlagerstelle, 4 Haltewinkel, 5 Lötanschluß der Spulenwicklung, 6 Lötanschlüsse der Kontaktfedern, 7 Isolierplatten, 8 Deckplatte, 9 Befestigungsschraube des Kontaktfedersatzes, 10 Kontaktfedern, 11 Stützlasche, 12 Betätigungslasche, 13 Kontaktstelle, 14 Betätigungssteg, 15 Anschlaglasche, Kern, 16 Kern, 17 Druckblech, 18 Trennblech, 19 Betätigungswinkel, 20 Spule, 21 Anker

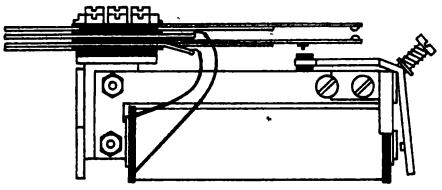


Bild 6.79. Wechselstromrelais 30

Tabelle 6.47: Richtwerte des Flachrelais 48

Größe	Richtwert
Höchste Betriebsspannung für Kontaktfedern und Wicklung	100 V ≃
Höchste Spulendauerbelastung	5 W
Kontaktkraft	≈ 0,2 N
Ansprechstrom × Windungszahl, z. B. bei 3 Umschaltkontakten Ankerhub = 1,1 mm Luftspalt bei angezogenem Anker = 0,1 mm	115 A
Ansprechzeit	8···60 ms
Abfallzeit	8···250 ms
Höchste Kontaktfederanzahl (Federn mit Doppelkontakten)	3 × 5
Anzahl der Lötanschlüsse an der Spule	6
Wickelraum	≈ 16,5 cm³
Wickelquerschnitt	≈ 3,3 cm²
Masse des Relais	≈ 180 g

aus zwei getrennt aufgebauten Jochen, Kernen, Erregerspulen und einem gemeinsamen Anker. Die Erregerströme in den Spulen haben eine Phasenverschiebung von 90°. Während in der einen Wicklung der Strom durch Null geht, erreicht er in der anderen seinen Scheitelwert, so daß ein Schwirren des Ankers vermieden wird. Das gleiche Ergebnis wird auch durch das Wechselstromphasenrelais mit Kurzschlußring erzielt. Wechselstromrelais haben die Aufgabe, Wechselstromzeichen aufzunehmen und verzerrungsfrei in Gleichstromzeichen umzusetzen.

Gepolte Relais

Sie sind *elektromagnetisch gesteuerte Schalter*, wobei die Lage des Ankers von der Stromrichtung und von dem stärkeren Gesamtfluß des Erregerstroms abhängt. Außer dem Elektromagneten enthalten sie noch einen Dauermagneten. Der vom Dauermagneten erzeugte Dauerfluß wird dem von einem Elektromagneten erzeugten Steuerfluß überlagert und durchsetzt den Luftspalt, in dem der Anker drehbar gelagert ist. Trifft ein Stromstoß ein, so wird das eine Magnetfeld verstärkt und das andere geschwächt. Vom verstärkten Magnetfeld (des Elektromagneten) wird der Anker angezogen und verbleibt nach dem Abschalten des Erregerstroms in seiner Lage. Beim nachfolgenden Stromstoß in umgekehrter Richtung wird das andere Magnetfeld verstärkt und der Anker in diese Stellung gebracht (Bild 6.80).
Verwendung findet das gepolte Relais A nach TGL 6625. Durch seinen 16teiligen Messerkontaktsockel ist es steckbar

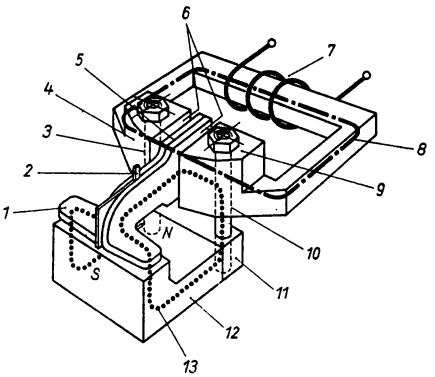


Bild 6.80. Prinzipieller Verlauf der Magnetflußkreise beim gepolten Relais
1 Ankerwinkel, 2 Spannband, 3 Flußbolzen, 4 Polschuh, 5 Ankerhebel, 6 Teilluftspalte des Arbeitsluftspalts, 7 Steuerspule, 8 Steuerfluß, 9 Polschuh, 10 Flußbolzen, 11 Flußausgleichstück, 12 Dauermagnet, 13 Dauerfluß

und leicht auswechselbar. Durch mechanische Einstellung kann das Relais folgende *Ankerruhelagen* einnehmen:

1. Anker hat auf der Trenn- und der Zeichenseite seine Ruhelagen,
2. Anker hat zwischen der Trenn- und der Zeichenseite seine Ruhelage,
3. Anker befindet sich auf der Trennseite in seiner Ruhelage.

Die dadurch möglichen Arbeitsweisen sind im Bild 6.81 aufgezeigt.

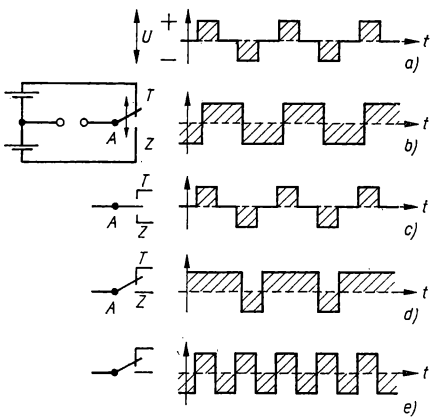


Bild 6.81. Arbeitsweisen der verschiedenen Typen des gepolten Relais A (TGL 6625)
a) Potential am Wicklungsanfang, b) gepolte Relais mit zwei Ruhelagen des Ankers, c) gepolte Relais mit mittiger Ruhelage des Ankers, d) gepolte Relais mit einseitiger Ruhelage des Ankers, e) neutrale Relais (zum Vergleich)

Elektrothermische Relais

Sie sind thermisch betätigte Schalter und werden auch als *Thermorelais* bezeichnet. Sie beruhen auf der Wärmewirkung des elektrischen Stromes. Das Thermorelais besteht aus einer Heizwicklung, die von einem Bimetallstreifen und von einem Kontaktfedersatz umgeben ist (s. Bild 6.82). Bei Erwärmung

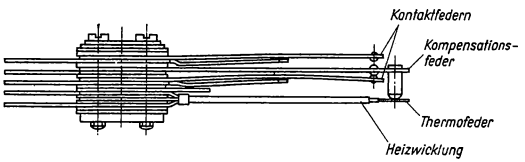


Bild 6.82. Elektrothermische Relais

biegt sich die Bimetallfeder auf Grund der ungleichen Wärmeausdehnung der beiden fest miteinander verbundenen Lagen des Bimetallstreifens nach der Seite, auf der sich die Komponente mit der kleineren Wärmeausdehnung befindet, und betätigt den Kontaktfedersatz. Nach Unterbrechung des Heizstromkreises kühlt das Bimetall ab, und die Kontakte gehen in die Ruhestellung zurück.
Die Tabellen 6.48 und 6.49 enthalten technische Werte und Richtwerte.

Drehwähler

Er besteht aus den drei Hauptgruppen *Antrieb*, *Einstellorgan* und *Kontaktsatz* (Bild 6.83). Das Einstellorgan des Drehwählers führt nur eine Bewegung aus – eine kreisförmige Drehbewegung. Zum Betätigen des Einstellorgans, das aus dem Schaltarmsatz und den Einstellgliedern besteht, wird ein elektromagnetischer Antrieb verwendet. Wird das Magnetsystem erregt, so wird der Anker gegen die Kraft der Ankerrückstellfeder angezogen. Die Stoßklinke greift in eine Zahnflanke des Schaltrads, wobei der Schaltarm auf die nächste Lamelle geschaltet wird. Jedes Betätigen des Antriebs entspricht einer Weiterschaltung des Schaltarms zur nächsten Lamelle (Schritt). Um ein Rückdrehen des Schaltarmsatzes zu verhindern, fällt eine Sperrfeder in die Schaltradverzahnung (s. Bild 6.83).

Tabelle 6.48: Technische Werte elektrothermischer Relais (nach TGL 4989)

Widerstand der Heizwicklung Ω ± 5%	Schließzeit[1][2] s	Öffnungszeit[1][3] s	Betriebsstrom mA
100	20 + 14 / − 7	10 ± 4	95
	30 + 20 / − 10		
170	20 + 14 / − 7		100
	30 + 20 / − 10		
200[4]	6 + 4 / − 2	5 ± 2	120
	10 + 8 / − 4		
	14 + 8 / − 4		
300	10 + 8 / − 4	10 ± 4	75
	20 + 14 / − 7		
	30 + 20 / − 10		
	45 + 26 / − 13		
600	30 + 20 / − 10	20 ± 7	50

[1]) bei Umgebungstemperatur von 0···45 °C
[2]) Zeit vom Erregen des Relais bis zum Schließen der Arbeitsseite des Umschaltkontakts
[3]) Zeit vom Erregen des Relais bis zum Öffnen der Ruheseite des Umschaltkontakts
[4]) nur für Schaltungen, in denen die Abschaltung des Heizstroms spätestens 40 ms nach dem Schließen der Arbeitsseite des Umschaltkontakts erfolgt

Tabelle 6.49: Richtwerte elektrothermischer Relais

Größe	Richtwert
Höchste Schaltleistung für die Kontakte	15 W
Höchster Schaltstrom für die Kontakte	250 mA
Höchste Betriebsspannung für die Kontakte	100 V Gleich- oder Wechselspannung
Masse des Relais	≈ 16 g
Lebensdauer	100000 Schaltungen

Beispiel: Werden dem Antrieb vier Impulse zugeführt, so wird das Einstellorgan viermal betätigt, d. h., die Schaltarme werden um vier Lamellen oder vier Schritte weitergeschaltet.
Die Standardausführungen der Drehwähler (je nach Verwendungszweck) sind in Tabelle 6.50 aufgeführt (Kenndaten in Tabelle 6.51).
Bei automatischen Wählvermittlungen werden Drehwähler als *Vorwähler* (VW) mit einer Nullstellung, 10 Drehschritten für die abgehenden Leitungen und einem 11. Drehschritt als Abschalteschritt eingesetzt. Dieser Drehwähler hat vier Kontaktbahnen (a, b, c, d), die für die Durchschaltung der Sprechadern, den Prüfvorgang und den Rücklaufvorgang bei der Auslösung vorgesehen sind.

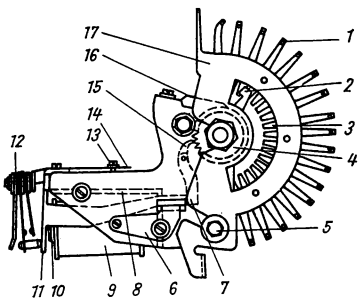


Bild 6.83. Drehwähler 34
1 Stromzuführungsfeder, 2 Schaltarm, 3 Lamelle, 4 Schaltrad, 5 Befestigungsschraube, 6 Ankerbegrenzungswinkel, 7 Stoßklinkenbefestigung, 8 Magnetjoch, 9 Magnetspule, 10 Magnetkern, 11 Anker, 12 d-Kontakt, 13 Einstellschraube, 14 Ankerrückstellfeder, 15 Stoßklinke, 16 Sperrfeder, 17 Kontaktsatz

Tabelle 6.50: Standardausführungen von Drehwählern

Ausführung	Funktionsmöglichkeiten bei einer Umdrehung (Drehschritte)	Schaltarmarten des Drehwählers (s. Bild 6.84)	Anwendung bei ..... Kontaktsatz
Drehwähler 27			
1 × 12teilig	12	Dreifachschaltarm	120°
1 × 17teilig	18	Zweifachschaltarm	180°
2 × 17teilig	36	Einfachschaltarm	180°
Drehwähler 34			
1 × 12teilig	12	Dreifachschaltarm	120°
1 × 17teilig	18	Zweifachschaltarm	180°
2 × 17teilig	36	Einfachschaltarm	180°
1 × 26teilig	26	Zweifachschaltarm	180°
2 × 26teilig	52	Einfachschaltarm	180°

Tabelle 6.51: Kennwerte von Drehwählern

Größe	Kennwert
Betriebsspannung	60 V
Magnetspulenwiderstand	60 Ω
Leistungsaufnahme	60 W
Betätigungsfrequenz	50 s^{-1}
Ankeranzugzeit, Drehwähler 27	6···11 ms
Drehwähler 34	8···12 ms
Ankerabfallzeit, Drehwähler 27	4···6 ms
Drehwähler 34	6···8 ms

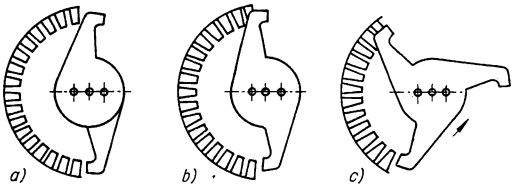


Bild 6.84. Drehwähler-Schaltarme
a) Einfachschaltarm, b) Zweifachschaltarm, c) Dreifachschaltarm

Hebdrehwähler

Er besteht aus einem Gehäuse mit Kontaktsatz, dem Einstellorgan, dem elektromagnetischen Antrieb und den mechanisch betätigten Wählerkontakten. Die grundsätzliche Darstellung der Arbeitsweise ist Bild 6.85 zu entnehmen. Beim Hebdrehwähler führt das Einstellorgan zwei Bewegungen aus — eine geradlinige Hebbewegung und eine kreisförmige Drehbewegung. Der Kontaktsatz hat drei gleichartige Kontaktfelder mit je 100 bzw. 110 Kontaktlamellen, übereinander angeordnet. Bild 6.86 enthält die schematische Anordnung und Zählweise der Lamellen des HDW 27 (Daten in Tabelle 6.52). Bewegungsvorgänge der Schaltarme des Hebdrehwählers 27 sind: Grundstellung — Heben — Drehen — Arbeitsstellung — Weiterdrehen — Fallen — Zurückdrehen — Grundstellung.

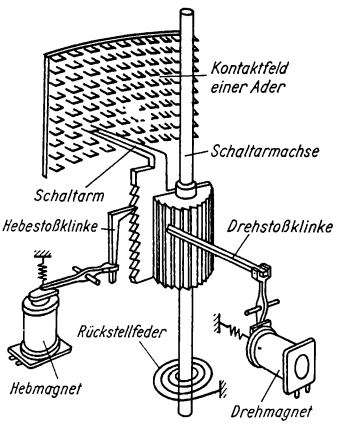


Bild 6.85. Arbeitsweise des Hebdrehwählers

Tabelle 6.52: Kennwerte des Hebdrehwählers

Größe	Kennwert
Betriebsspannung	60 V
Widerstand der Heb- und Drehmagnetspule	60 Ω
Leistungsaufnahme	60 W
Betätigungsfrequenz	50 s^{-1}
Ankeranzugzeit der Antriebe	15···21 ms
Ankerabfallzeit der Antriebe	8···14 ms

An die 3 × 100 Kontakte können 100 dreiadrige Leitungen a-, b- und c-Adern angeschlossen werden. Der Hebdrehwähler wird als *Leitungswähler* (LW) oder als *Gruppenwähler* (GW) verwendet.
Da erfahrungsgemäß nicht alle Teilnehmer gleichzeitig sprechen, werden GW und LW entsprechend dem auftretenden Verkehr vorgesehen. Jedem Teilnehmer wird dagegen ein eigener *Vorwähler* (VW) zugeordnet (Vorwahlstufe). Im Gegensatz zu Vermittlungseinrichtungen mit VW gibt es auch solche mit *Anrufsucher* (AS). Während beim VW die Drehschritt-

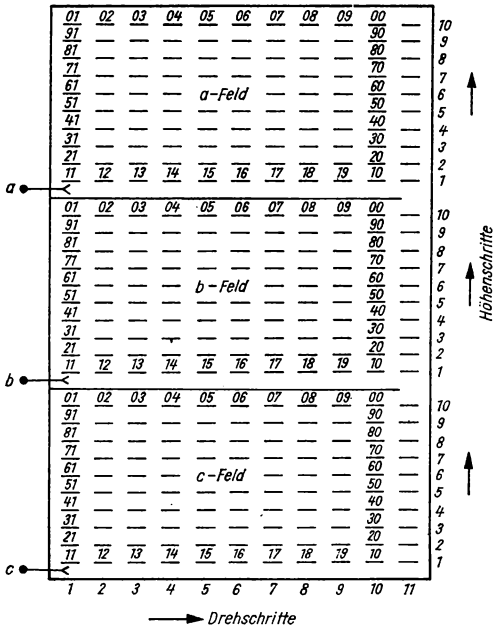


Bild 6.86. Anordnung und Zählweise der Lamellen des 110teiligen Hebdrehwählers Typ 27

ausgänge zum LW oder GW führen, sind beim AS die Drehschrittausgänge mit den Anschlußleitungen der Teilnehmer verbunden. Das bedeutet, daß die Anzahl der VW gleich der Anzahl der Fernsprechteilnehmer ist und die Anzahl der AS der Anzahl der Verbindungswege entspricht.
Bis maximal 100 Teilnehmer benötigt man nur 10 LW und 100 VW oder 10 LW und 10 AS (Rufnummer zweistellig). Von 100 bis maximal 1000 Anrufeinheiten ist eine *Gruppenwahlstufe* (I. GW) notwendig (Rufnummer dreistellig). Bei Vermittlungsstellen mit Wahlbetrieb mit maximal 10000 Teilnehmern sind zwei Gruppenwahlstufen (I., II. GW) (Rufnummer vierstellig), mit maximal 100000 Teilnehmern drei Gruppenwahlstufen (I., II., III. GW) (Rufnummer fünfstellig) und bei solchen mit maximal 1000000 Teilnehmern vier Gruppenwahlstufen (I.···IV. GW) (Rufnummer sechsstellig) erforderlich.
In neuerer Zeit finden Motorwähler Anwendung, die als Anrufsucher, Gruppenwähler, Leitungswähler und Zeitzonenwähler arbeiten. Heute werden anstelle von Schrittschaltwählern auch Koordinatenschalter verwendet.

Koordinatenschalter

Er ist ein elektromagnetisches Bauteil, das durch die Antriebe Kräfte erzeugt und über die Einstellorgane Kontakte zum Schließen oder Öffnen von elektrischen Stromkreisen betätigt. Der Koordinatenschalter (Bild 6.87) besteht aus zwei Hauptgruppen — der *Vertikalgruppe*, auch als *Brücke* bezeichnet, und der *Horizontalgruppe*, auch *Stange* genannt. Mehrere

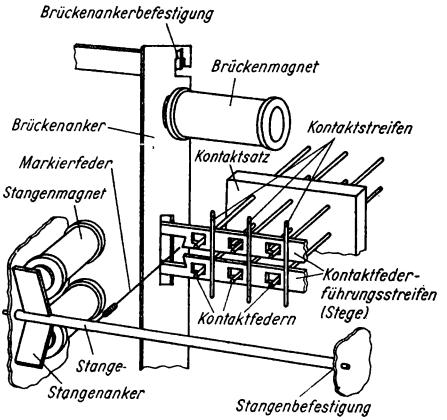


Bild 6.87. Arbeitsweise einer Vertikal- und einer Horizontalgruppe

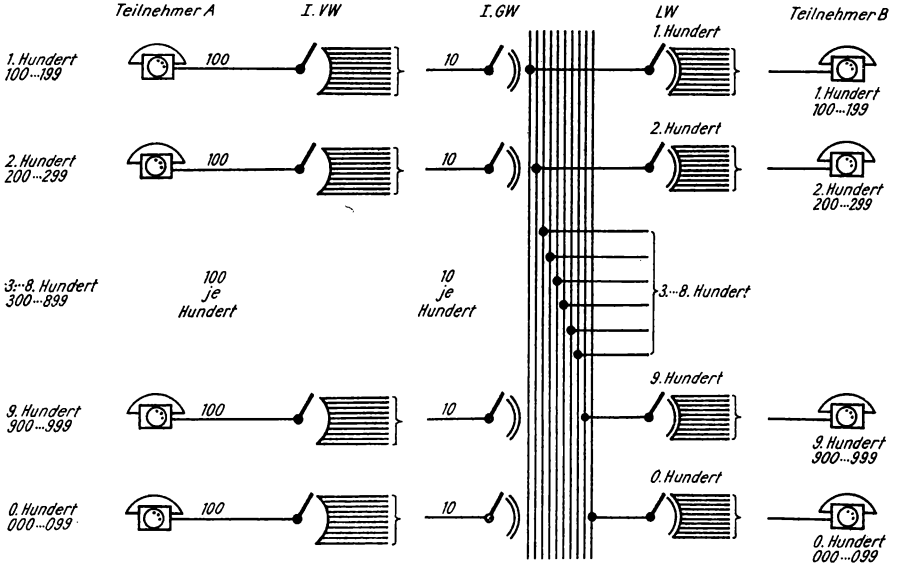


Bild 6.88. Übersichtsschaltplan einer Wählanlage in einem 1000er Amt

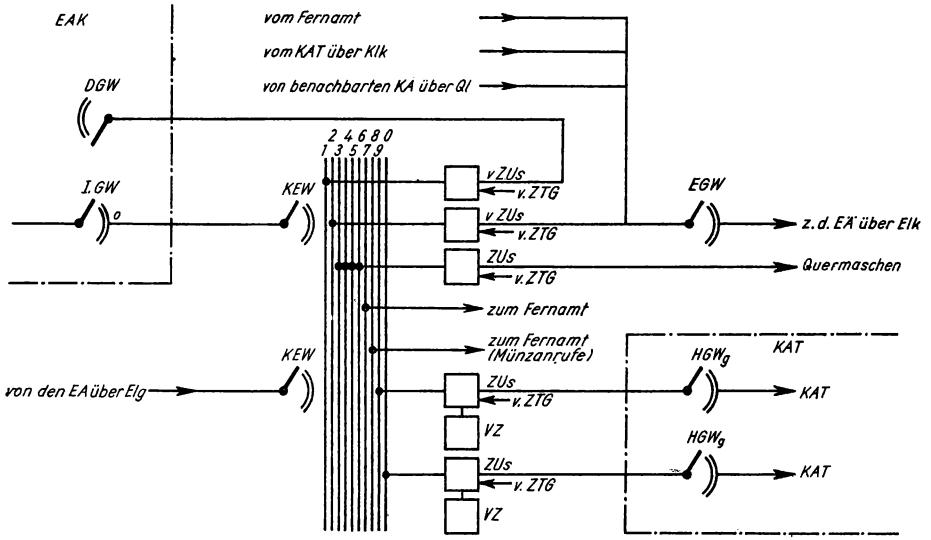


Bild 6.89. Übersichtsschaltplan eines Knotenamtes im Selbstwählfernverkehr
ZTG Zeittaktgeber, DGW Dienstgruppenwähler, I. GW Erster Gruppenwähler, KEW Knotenamtseingangswähler, EGW Endamtsgruppenwähler, HGW Hauptamtsgruppenwähler, EA Endamt, KA Knotenamt, EAK Endamt am Sitz des Knotenamtes, KAT Knotenamt mit Transitfunktion, vZUs vereinfachter Zählumsetzer, ZUs Zählumsetzer, VZ Verzoner, El Endamtsleitungen Kl Knotenamtsleitungen, Ql Querleitungen, ...g gehend, ...k kommend

Vertikal- und Horizontalgruppen sind in einem Koordinatenschalter vereinigt. Die grundsätzliche Darstellung einer Vertikal- und Horizontalgruppe ist Bild 6.87 zu entnehmen. Der Koordinatenschalter wird nach folgenden Angaben bezeichnet: Anzahl der Vertikalgruppen, Anzahl der durchschaltbaren Kreuzungspunkte je Vertikalgruppe und Anzahl der Kontaktstellen je Kreuzungspunkt, z. B. Koordinatenschalter $10 \times 20 \times 6$.
Sollen nun bestimmte Kontaktstellen eines Kreuzungspunkts betätigt werden, wird zuerst der Antrieb der vorbestimmten Horizontalgruppe betätigt, und die Markierfedern werden zwangsläufig in die Aussparungen der Stege gedrückt. Anschließend wird der Antrieb der vorbestimmten Vertikalgruppe erregt, und der Vertikalgruppenanker drückt gegen die eingerasteten Markierfedern und gegen den Steg. Dadurch bewegt sich der Steg, und die Kontaktfedern drücken gegen die Kontaktdrähte, so daß die Kontaktstellen des vorbestimmten Kreuzungspunkts geschlossen sind. Ist der Kreuzungspunkt geschlossen, wird die Horizontalgruppe in die Grundstellung gebracht. Die Markierfeder des durchgeschalteten Kreuzungspunkts bleibt in der Aussparung des Steges eingeklemmt. Soll nun der Kreuzungspunkt geöffnet werden, so muß der Antrieb der Vertikalgruppe abgeschaltet werden. Durch Rückstellfedern gehen Anker und Kontaktfedern in die Grundstellung. Die Markierfeder wird dann ebenfalls frei und schnellt in die Grundstellung.
Gegenüber Wählern besitzt der Koordinatenschalter bessere Kontakteigenschaften, höhere Übertragungsgüte, größere Funktionssicherheit und geringeren Wartungsaufwand.

Beispiel: Verbindungsaufbau von Teilnehmer A zu Teilnehmer B im 1000er Amt (Rufnummer dreistellig, z. B. 865). Hebt der Teilnehmer A seinen Handapparat ab, so läuft sein I. VW an und belegt einen I. GW. Der Teilnehmer erhält das Amtszeichen, so daß er mit der Wahl beginnen kann. Die Einstellung des I. GW erfolgt durch die Nummernwahl, wobei beim I. GW die erste Ziffer (in unserem Beispiel die 8) notwendig ist. Mit dieser Ziffer wird der Schaltarmsatz des I. GW auf den 8. Höhenschritt (HS) gehoben. Nach dem letzten Impuls durch den Nummernschalter dreht der Wähler automatisch ein (Freiwahl) und sucht sich eine freie Leitung zum LW aus. Die letzten beiden Ziffern der Rufnummer (in unserem Beispiel die 65) vermittelt der LW in erzwungener Wahl. Bei Wahl der Nummer 6 wird der Schaltarmsatz in die 6. Kontaktreihe gebracht und bei Wahl der Nummer 5 dann auf den 5. Kontakt eingedreht. Ist der Teilnehmer frei, so erhält der Teilnehmer A das Freizeichen, und der B-Teilnehmer wird gerufen. Teilnehmer B nimmt seinen Handapparat ab, und die Gesprächsverbindung ist hergestellt. Nach Beendigung des Gesprächs legen beide Teilnehmer ihren Handapparat auf, und sämtliche für den Verbindungsaufbau benutzten Wähler und Relais lösen aus. Das Gespräch wird durch den jedem Teilnehmer zugeordneten Gesprächszähler gezählt. — Befindet sich dagegen der B-Teilnehmer in einem ankommenden oder abgehenden Gespräch, so erhält der A-Teilnehmer das Besetztzeichen. Die Hörzeichen (Amts-, Frei- und Besetztzeichen) werden durch eine Ruf- und Signalmaschine (RSM) erzeugt.
Bild 6.88 zeigt den Schaltplan einer Wählanlage, Bild 6.89 den Schaltplan eines Knotenamtes im Selbstwählverkehr.

6.3. Fernschreibanlagen

6.3.1. Grundlagen

6.3.1.1. Telegrafie

Als Telegrafie bezeichnet man die Übertragung von Nachrichten auf Drahtleitungen oder auf drahtlosem Wege unter Benutzung von Telegrafiezeichen (Telegrafenalphabet), die in elektrische Impulse umgesetzt und in der Empfangsstation automatisch in Signalschrift oder gewöhnlicher Schrift aufgeschrieben oder in Form von Tonsignalen abgehört werden können.

6.3.1.2. Telegrafenalphabet

Im Telegrafenalphabet ist die Bedeutung der Telegrafiezeichen festgelegt. Die Übermittlung der Telegrafiezeichen (Buchstaben, Zahlen, Zeichen) erfolgt durch Änderung zwischen 2 elektrischen Zuständen, z. B. Stromfluß—Strompause oder positives Potential—negatives Potential. Die Dauer und die zeitliche Änderung zwischen zwei elektrischen Zuständen sind den Telegrafiezeichen im Telegrafenalphabet zugeordnet. Die kürzeste Zeitdauer einer erwünschten Zustandsänderung wird als *Schritt* bezeichnet. Sie wurde international auf 20 ms festgelegt. Mit 5 Schritten (Fünferalphabet, Telegrafenalphabet Nr. 2 nach CCITT[1]), Bild 6.90) und zwei Zuständen dieses all-

[1]) CCITT: Comité Consultatif International Telegraphique et Telephonique (Internationaler beratender Ausschuß für Telegrafie und Telefonie).

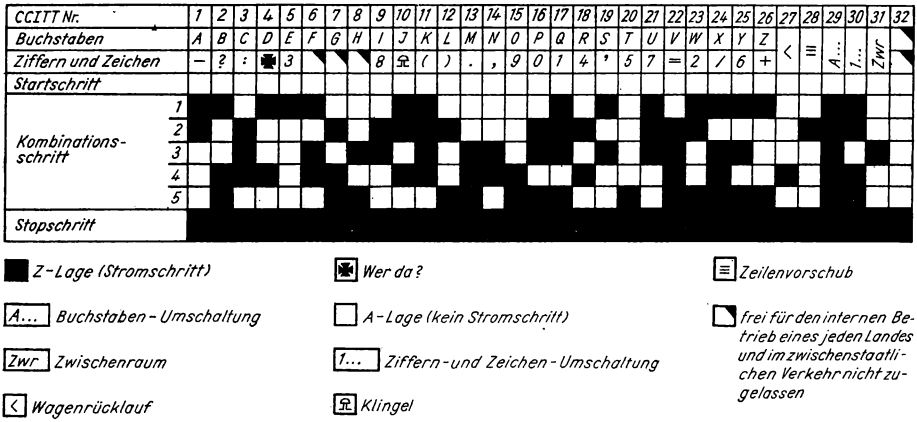


Bild 6.90. Internationales Telegrafenalphabet Nr. 2

gemein verwendeten Alphabets lassen sich $2^5 = 32$ *Schritt- oder Impulskombinationen* bilden. Die doppelte Belegung ist durch Anwendung von zwei Kombinationen zur Umschaltung zwischen Ziffern und Buchstaben möglich. Nach Übermittlung der Schrittkombinationen für den Wechsel wird die Schreibwalze des Fernschreibers hochgestellt. Alle folgenden Kombinationen führen deshalb zum Abdruck von Buchstaben. Die Kombinationen aus 5 Schritten werden vervollständigt durch einen *Start-* und *Stopschritt*. Das sind Schritte gegeneinander gerichteter, aber stets gleichbleibender Polarität. Zur Übertragung von Fernschreiben im überseeischen Funkverkehr ist man zu sieben Stromschritten übergegangen. Von den 128 möglichen Kombinationen werden 35 verwendet, die jeweils aus 3 Plus- und Minusschritten bestehen. Abweichungen davon können selbsttätig festgestellt und durch Rückfrage sofort berichtigt werden.

6.3.1.3. Begriffe

Schrittgeschwindigkeit, Telegrafiergeschwindigkeit

Die *Schrittgeschwindigkeit* v_s ist der reziproke Wert der in Sekunden ausgedrückten theoretischen Dauer a_s eines Schrittes.

$$v_s = \frac{1}{a_s} \quad \text{in} \quad \frac{1}{\text{s}} \quad \text{oder Baud (Bd)}$$

Mit 20 ms für den kürzesten Schritt wird die Schrittgeschwindigkeit 50 Bd. Möglich sind (z. B. in Sondernetzen) auch höhere Telegrafiergeschwindigkeiten. In Tabelle 6.53 sind die Telegrafiergeschwindigkeiten zusammengestellt.

Tabelle 6.53: Telegrafiergeschwindigkeiten

Benennung	Einheit	Schrittgeschwindigkeit in Bd 50	75	100
Dauer eines Schrittes (und Startschritt) a_s	ms	20	$13^1/_3$	10
Dauer eines Stopschrittes des Senders	ms	30	20	15
Zeichengeschwindigkeit	$\frac{\text{Zeichen}}{\text{min}}$	400	600	800

6.3.1.4. Start-Stop-Prinzip

Jeder einem Schriftzeichen oder einem Funktionszeichen des Telegrafenalphabets entsprechenden Gruppe von Zeichenelementen geht ein Startschritt voran. Dieser dient dazu, die Empfangseinrichtung für die Aufnahme und die Aufzeichnung eines Schriftzeichens oder die Durchführung einer Steuerfunktion durch Auslösen der Empfängernockenwelle vorzubereiten.
Der der übertragenen Gruppe folgende Stopschritt setzt die Empfangseinrichtung still und bereitet diese somit auf den Empfang des nächsten Schrift- oder Funktionszeichens vor.

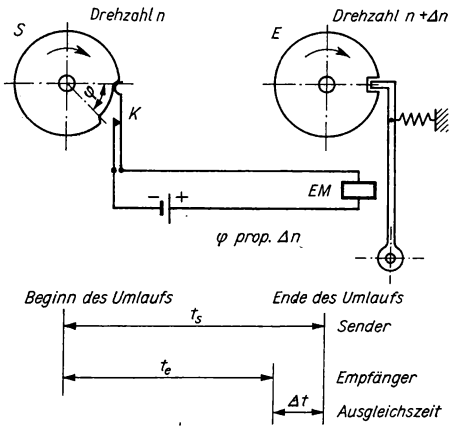


Bild 6.91. Start-Stop-Gleichlaufprinzip
S Sender, E Empfänger, K Kontakt, EM Empfangsmagnet

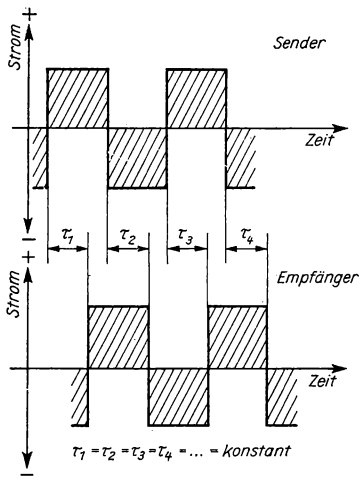


Bild 6.92. Wiedergabeverzögerung

Die durch den Startschritt ausgelöste Empfängerwelle läuft schneller als die Senderwelle. Die unterschiedliche Umlaufgeschwindigkeit wird während der Sperrzeit ausgeglichen (Bild 6.91). Der nächste Startschritt tritt also bei richtiger Ausgangsstellung der Empfängernockenwelle ein. Kleinere Abweichungen während mehrerer Umdrehungen können sich somit nicht addieren, eine besondere Einregelung ist nicht notwendig. Fernschreiber und Empfänger besitzen geregelte Antriebsmotoren und sind sofort betriebsbereit. Fernschreibgeräte arbeiten mit Netzbetrieb.
Der *Start-Stop-Verzerrungsgrad* dient der Qualitätsbeurteilung von Endgeräten und Übertragungssystemen, speziell der Beurteilung von Fernschreibern und Fernschreibverbindungen. Dabei wird die Empfangsschrittfolge mit dem genormten Schrittmaß verglichen. Der Verzerrungsgrad bei einer Schrittgeschwindigkeit von 50 Bd ist mit $\leqq 5\%$ festgelegt (Bild 6.92).

6.3.2. Fernschreibgeräte

6.3.2.1. Blattschreiber

Blattschreiber sind Fernschreiber, die alle Schriftzeichen, zeichenweise zu Zeilen geordnet, in kleinen Buchstaben auf eine Papierbahn drucken.

6.3.2.2. Streifenschreiber

Streifenschreiber sind Fernschreiber, die alle Schriftzeichen, zeichenweise fortlaufend, in großen Buchstaben auf gummierte Papierstreifen drucken. Diese werden geschnitten und aufgeklebt (Telegramm).
Blatt- und Streifenschreiber können wahlweise mit *Voll-* oder *Schmaltastatur* ausgerüstet werden. Die Volltastatur stimmt weitgehend mit der Tastatur einer Büroschreibmaschine überein. Bei der Schmaltastatur sind die Zeichen den Buchstaben zugeordnet, die nach dem Telegrafenalphabet Nr. 2 die gleiche Schrittkombination besitzen.

6.3.2.3. Lochstreifengeräte

Die Lochstreifentechnik bietet den Vorteil einer maximalen Ausnutzung der zugelassenen Zeichengeschwindigkeit (z. B. 400 Zeichen min^{-1} im Telex-Netz). Mit Hilfe des Lochstreifens (Bild 6.93) kann die Nachricht gespeichert und ohne großen manuellen Aufwand wiederverwendet oder vervielfältigt werden. Es gibt Handlocher und Lochstreifensender als selbständige Geräte sowie Empfangslocher als Anbaugeräte für Fernschreiber. Die Lochung geschieht durch fortlaufendes Stanzen von Löchern in den 17,5 mm breiten Papierstreifen. Die 5 für ein Zeichen typischen Löcher liegen quer zur Papierbahn.

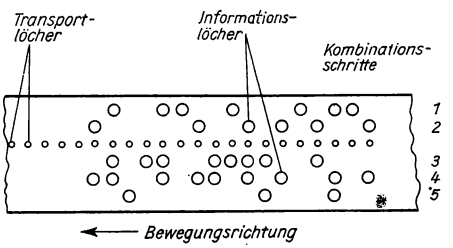


Bild 6.93. Lochstreifen

6.3.2.4. Sendevorgang

Beim Niederdrücken eines Tastenhebels der schreibmaschinenähnlichen Tastatur werden 5 querliegende sägeverzahnte Schienen entweder nach rechts oder nach links verschoben. Dadurch befinden sich die dazugehörigen 5 Sendekontakthebel vorbereitend in unterschiedlichen Lagen. Damit entsprechen sie der Schrittkombination des betätigten Tastenhebels und des ihm zugeordneten Zeichens. Nach Anlauf der Sendernockenwelle, ausgelöst am Ende des Tastenhebelweges, wird durch versetzte Nocken eine reihenfolgerichtige Abfrage der Einstellung vorgenommen. Die Sendekontakthebel lassen dabei durch ihre Voreinstellung das Schließen des betreffenden Sendekontaktes durch den Sendernocken zu oder nicht. Ein 6. Kontakt, in Ruhestellung geschlossen, öffnet den Stromkreis zur Bildung des Startschrittes und während der Abtastung der Sendekontakte.

6.3.2.5. Empfangsvorgang

Auf der Empfängerseite wird die Impulsserie von einem Empfangsmagneten mit 5 nebeneinander liegenden Ankern aufgenommen. In der Ruhelage ist der Magnet durch den in der Leitung fließenden Ruhestrom erregt, und seine fünf Anker sind angezogen. Bei Stromunterbrechung durch den Startschritt eines Zeichens fallen die Anker gleichzeitig ab, und die ebenfalls mit versetzten Nocken versehene Empfängerwelle läuft synchron mit der empfangenen Impulsserie an. Dabei stellen die Anker durch die eintreffenden Impulse und die zugehörigen Nocken nacheinander 5 Wählhebel ein. Die 5 Wählschienen werden am Ende dieses Vorgangs zusammen entsprechend der Stellung der Wählhebel verschoben. Der zu dieser Einstellung der Empfängerschienen gehörende Typenhebel wird durch Einfallen einer Zugstange in die Verzahnung der Wählschienen freigegeben. Danach erfolgt der Ausdruck des auf dem Typenhebel befindlichen Zeichens.
Fernschreibsender und -empfänger bilden eine Einheit, so daß mit dem gleichen Gerät Nachrichten gesendet und empfangen werden können.

6.3.2.6. Elektronisches Senden und Empfangen von Fernschreibzeichen

Elektronisch arbeitende Geräte setzen sich aus Bausteinen zusammen, von denen jeder ganz bestimmte Grundfunktionen erfüllt. Einige in digitalen elektronischen Schaltungen häufig anzutreffende Bausteine sind die *logischen Verknüpfungen* sowie *Zeit-* und *Speicherglieder*.

Elektronische Grundgeräte der Fernschreibtechnik

Für das automatische Senden fester Texte, z. B. für die in modernen Fernschreibanlagen üblichen geschriebenen Dienstsignale (DER = Störung, OCC = Anschluß besetzt usw.) ist ein Fernschreibzeichengenerator erforderlich, der fortlaufend die notwendigen Fernschreibzeichen zur Verfügung stellt.
Der Taktgenerator G gibt eine Rechteckspannung an den Eingang eines dreistufigen Binärzählers (Bild 6.94).
Zur Vereinfachung der Schaltung werden die Fernschreibzeichen nicht mit 1,5fachem, sondern mit doppeltem Stopschritt erzeugt. Jedes Fernschreibzeichen besteht aus 8 Schritten (Startschritt, fünf Schritte der Kode-Kombination, doppelter Stopschritt). Einer Zählstellung des Binärzählers entspricht ein Schritt des Fernschreibzeichens. Ein Kodierer hat die Aufgabe, die acht Zählstellungen des Binärzählers in die 32 möglichen Fernschreibzeichen umzuwandeln und sie an die Ausgänge A 1 bis A 32 anzuschalten. In Tabelle 6.54 sind die Forderungen für die Ausgänge A 1 bis A 3 eingetragen worden. Die Zählstellung 1 bildet für alle Fernschreibzeichen den Startschritt, und die Zählstellungen 7 und 8 bilden die Stopschritte. In den Zählstellungen 2 bis 6 müssen die jeweiligen Kodekombinationen des CCITT-Kodes Nr. 2 realisiert werden. So wird z. B. am Ausgang A 1 fortlaufend die Folge 01100011 gesendet, die der Kodekombination 1 des CCITT-Kodes entspricht.

Tabelle 6.54: Auszug aus der Signaltabelle eines elektronischen Zeichengenerators

Zählstellung	Binärzähler a_1	a_2	a_3	Ausgang A_1	Ausgang A_2	Ausgang A_3
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	1	1	0
3	1	1	0	1	0	1
4	0	0	1	0	0	1
5	1	0	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0
7	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	1	1	1

Fernschreibzeichen-Empfänger

Der im Fernschreiber elektromechanisch gelöste Empfang der Fernschreibzeichen läßt sich auch mit elektronischen Schaltungen ausführen. Diese Empfänger bestehen aus einem

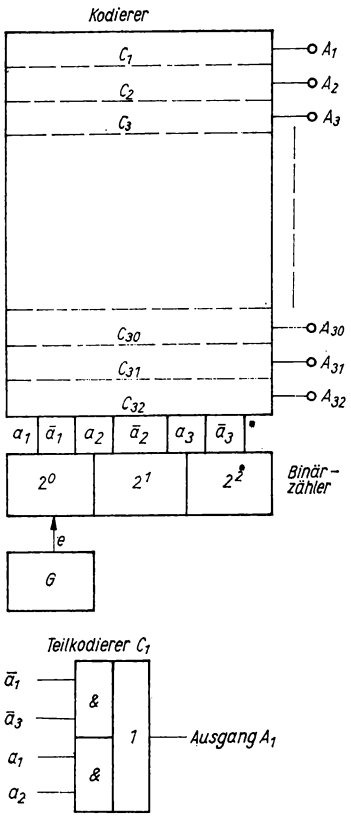


Bild 6.94. Fernschreibzeichengenerator
& ≙ UND-Glied, 1 ≙ ODER-Glied (nach TGL 16056)

Schieberegister und einer *Abtastschaltung*. Der Spielraum dieser Schaltung hängt hauptsächlich von der Taktgenauigkeit des Taktgenerators in der Abtastschaltung ab und beträgt meist ≧ 45%.
Der *Textgenerator* hat die Aufgabe, die vom Fernschreibzeichengenerator gelieferten Fernschreibzeichen zu festen Texten zusammenzusetzen.
Der *Kodesignal-Empfänger* wird an Fernschreibleitungen angeschaltet. Das Gerät soll feststellen, ob eine bestimmte Zeichenfolge (Kodesignal) gesendet wird.

Elektronische Fernschreibgeräte

Einen Generationswechsel stellt die Weiterentwicklung des komplizierten und aufwendigen elektromechanischen Fernschreibers zum elektronischen Fernschreiber dar. Hochintegrierte MOS-Schaltungen übernehmen z. B. die internen Zeichenverarbeitungsschritte, wie Kodieren, Speichern oder Serialisieren. Verschiedene Baugruppen, wie Tastatur, Drucker oder Lochstreifengeräte, müssen auch weiterhin mechanische Funktionen haben, sie werden allerdings von elektronischen Schaltungen gesteuert. Da hochintegrierte MOS-Schaltungen keine Leistungen abgeben, die ausreichen, um elektromechanische Wandler, wie Elektromagnete oder Schrittmotoren, anzusteuern, sind auch die notwendigen mechanischen Baugruppen neu konzipiert worden. So wird z. B. eine opto-elektronische Tastatur verwendet. Diese ist aus Kodierelementen zusammengesetzt und jeweils einer Taste zugeordnet. Jedes Kodierelement besitzt eine Anzahl von Löchern, die beim Aneinanderreihen Lichtkanäle durch die gesamte Breite der Tastatur bilden. Als Geber dienen Leuchtdioden, als Lichtempfänger fototransistoren. Beim Drücken einer Taste wird im zugehörigen Kodierelement durch einen Verschluß der Lichtstrahl kurzzeitig unterbrochen. Dieses Signal wird von den Fototransistoren an die Senderelektronik weitergegeben. Der Vorgang dauert nur wenige Millisekunden, so daß über die Tastatur eine wesentlich größere Eingabegeschwindigkeit möglich ist, als sie manuell erreichbar ist. Ein elektronischer Speicher macht den manuellen Eingabetakt vom Sendetakt des Fernschreibers unabhängig. Durch die Elektronik ist es möglich geworden, Bedienfehler, z. B. das gleichzeitige Drücken zweier Tasten, zu erkennen und unmöglich zu machen. Weiterhin kann der Nummernschalter (Wählscheibe) des herkömmlichen Fernschaltgerätes eingespart werden. Die Wählinformation wird über die Zifferntasten der Tastatur eingegeben und durch die Elektronik in die genormten Nummernschalter-Impulse umgesetzt. Das zu diesem elektronischen Fernschreiber gehörende Druckwerk besteht aus einer Kunststoffscheibe mit radialen Schlitzen, in denen die beweglichen Typen sitzen. Diese werden elektromagnetisch betätigt und schlagen fast geräuschlos an. Die Typenscheibe läuft in Zeilenrichtung auf einem Wagen mit und kann um ihre Achse rotieren. Dadurch wird die zu schreibende Type in die erforderliche Schreibposition gebracht.

Anmerkung

Eingriffe in technische Anlagen und Geräte der Fernschreibtechnik dürfen nur von Fachkräften der dafür zuständigen Institutionen vorgenommen werden.

6.3.3. Fernschreib-Vermittlungstechnik

Für den Teilnehmer-Fernschreibverkehr (*Telex*) wird ein Telexnetz mit Vermittlungseinrichtungen (Telexämter), Telexanschlüssen und -leitungen benötigt. Telexvermittlungseinrichtungen können handbedient oder über Wählvermittlungen betrieben werden. Der überwiegende Teil des Fernschreibverkehrs wird heute über Wählvermittlungen abgewickelt. Dabei werden die von der Fernsprech-Vermittlungstechnik her bekannten elektromechanischen Schaltglieder (Drehwähler, Hebdrehwähler, Motorwähler, Koordinatenschalter usw.), aber auch moderne elektronische Schaltglieder verwendet. Die Steuerungsprinzipien der Schaltglieder sind daher vergleichbar. Wesentliche Unterschiede ergeben sich aber in den Schaltkennzeichen, die der Nachrichtenübermittlungsart in der Telegrafie angepaßt sind. Beim Fernsprechen werden den Teilnehmern diese Kennzeichen als Hörzeichen übermittelt. In der Fernschreibtechnik verwendet man dazu den Betriebszustand des Fernschreibers oder die Signale eines besonderen Signalisierungsgerätes (Tabelle 6.55). Die Fernschreibstelle besitzt deshalb auch ein Fernschaltgerät. Es ermöglicht außerdem die Fernein- und -ausschaltung der Fernschreibmaschine.

Tabelle 6.55: Schaltkennzeichen in der Fernschreib- und Fernsprechtechnik

Kennzeichen	Fernschreibtechnik	Fernsprechtechnik
Anfangszeichen	Anruftaste drücken	Hörer abnehmen
Wählzeichen	weiße Felder erscheinen am Schauzeichen bzw. weiße Lampe brennt	Hörzeichen Morse »a«
Anrufzeichen	Fernschreiber des angerufenen Anschlusses läuft an	Wecker beim angerufenen Anschluß ertönt
Freizeichen	Fernschreiber des rufenden Anschlusses läuft an	Hörzeichen Morse »t«
Besetztzeichen	Fernschreiber läuft an und wird sofort wieder stillgesetzt	Hörzeichen Morse »e«
Schlußzeichen	Schlußtaste drücken	Hörer auflegen

6.3.3.1. Fernschaltgerät

Das *Fernschaltgerät* dient zum Aussenden der einzelnen Kennzeichen (Befehle) für einen Verbindungsaufbau und für den Empfang der Antworten (Meldungen). Für jeden Fernschreibanschluß ist ein Fernschaltgerät notwendig. Alle Fernschaltgeräte sind für Zweidraht-Einfachstrom (Wechselschreiben) oder Vierdraht-Einfachstrom (Gegenschreiben) ausgelegt. Sie enthalten den Nummernschalter, eine Anfangstaste, eine

Schlußtaste, ein Schauzeichen oder Lampen (rot – weiß) und eine Belegtlampe. Der Anschluß an die Vermittlungsstelle erfolgt zweiadrig. Im Betriebsruhezustand, also bei nicht bestehender Verbindung, fließt ein Strom von etwa 5 mA. Mit Drücken der Anfangstaste erhöht er sich auf 40 mA. In der Vermittlung wird daraufhin ein freies Schaltglied belegt. Die Rückmeldung der Belegung erfolgt durch eine kurze Unterbrechung (25 ms) der Anschlußleitung. Zur Anzeige am Fernschaltgerät erscheinen die weißen Felder des Schauzeichens (Wahlaufforderung). Die Wahl des gewünschten Fernschreibanschlusses mit dem Nummernschalter führt zu Unterbrechungsserien im Wählimpulstakt. Der Fernschreiber des angerufenen Anschlusses wird durch Stromerhöhung auf 40 mA in seinem Anschlußkreis und durch Stromrichtungsumkehr ferneingeschaltet. Als Kennzeichen für einen betriebsbereiten angerufenen Anschluß wird diese Richtungsumkehr zum Anrufenden übertragen und hier wirksam. Das Fernschaltgerät schaltet mit deren Eintreffen auch hier den Motor des Fernschreibers an das Netz. Die Nachrichtenübermittlung erfolgt durch Aussenden der bekannten Schrittkombinationen als Impulsserien durch kurzzeitige Unterbrechungen des Stromkreises. Das Drücken der Schlußtaste bewirkt dagegen eine längere Unterbrechung. Dadurch löst sich die Verbindung, die Stromrichtungsumkehr wird rückgängig gemacht, der Motor des Fernschreibers abgeschaltet. Ist die Schlußtaste in Ruhelage, so fließt wieder nur ein Strom von 5 mA (notwendig zur Kontrolle auf Leitungsunterbrechung). Die Auslösung kann sowohl vom angerufenen als auch vom rufenden Anschluß aus vorgenommen werden.

Bei Standverbindungen ist ein Ferneinschaltgerät notwendig, weil sonst die Motoren immer laufen würden, unabhängig davon, ob Nachrichten übermittelt werden oder nicht. Das Ferneinschaltgerät schaltet darüber hinaus während der Schreibpausen den Motor ab, wenn ≈ 30 s lang kein Zeichen übertragen wird.

6.3.3.2. Anschlußschaltung

Sie dient zur Aufnahme und Ausgabe der Schaltkennzeichen in Richtung Vermittlung und Teilnehmer sowie zur Umformung der *Einfachstromtastung* (Stromfluß – Strompause) der Anschlußleitung in *Doppelstromtastung* (positives Potential △ Trennstrom, negatives Potential △ Zeichenstrom). Die *Doppelstromtastung* ist aus Symmetriegründen zur Übertragung besser geeignet. Die Umformung wird mit *polarisierten Relais* durchgeführt. Diese besitzen eine zweiseitige Ruhelage

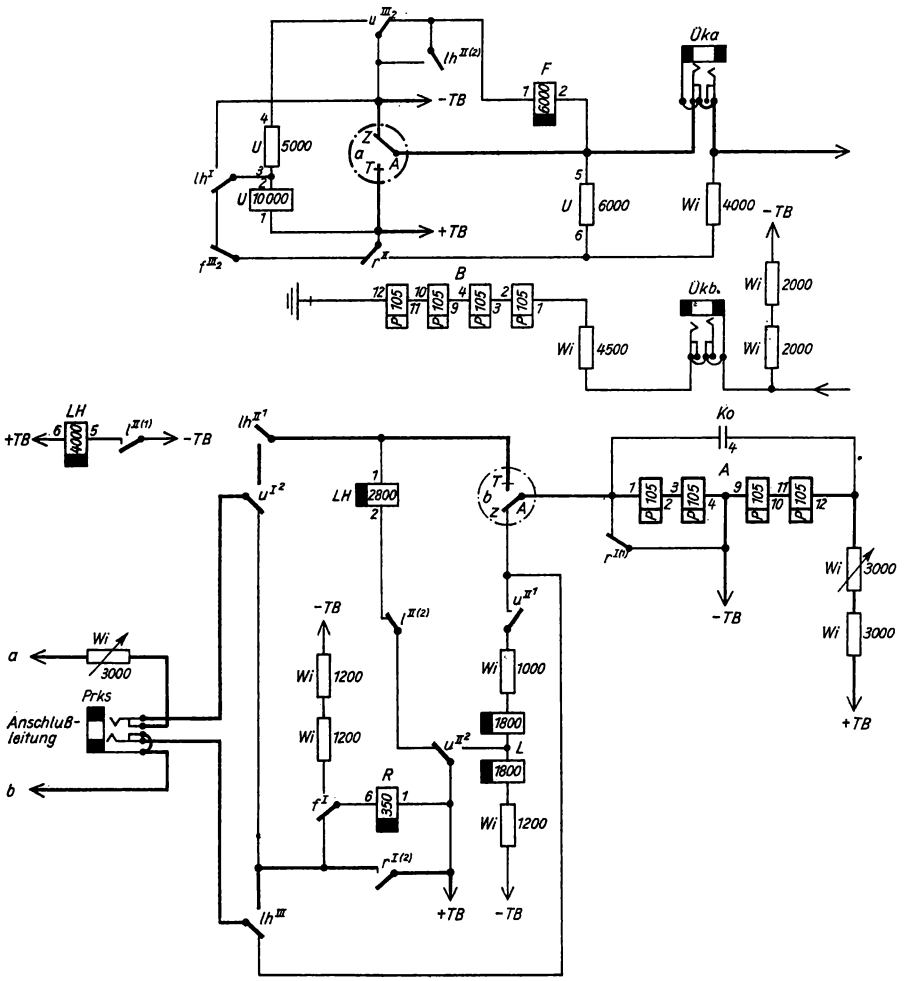


Bild 6.95. Anschlußschaltung des Vorwählers für Ortsteilnehmer
TB Telegrafenbatterie (±60 V), Prks Prüfklinke »senden«, Üka Klinke »Übertragungsleitung a«, Ükb »Übertragungsleitung b«, stark ausgezogene Stromkreise kennzeichnen die Schaltung zur Umformung von Einfachstrom- in Doppelstromtastung

der Kontakte und werden durch Stromrichtungsänderungen gesteuert. Die polarisierten Relais ermöglichen ein prell- und verzögerungsarmes Schalten der 20-ms-Schaltfolgen bei geringem Ansprechstrom. In den Schreibkreisen der Fernschreibtechnik werden deshalb nur diese Relais eingesetzt.
Die Umformungsschaltung (Bild 6.95) arbeitet mit einem polarisierten Relais, dessen Wicklungen symmetrisch in einen Rückzugskreis (20 mA) und in die Leitung (40 mA) geschaltet sind. Im Schreibruhezustand ist der Leitungsstromkreis geschlossen. Die beiden Ströme wirken entgegengesetzt auf das Relais, der Leitungsstrom überwiegt. Der Kontakt des Relais liegt auf positivem Potential. Bei Leitungsunterbrechungen, z. B. durch den Sendekontakt des Fernschreibers, ist nur die Rückzugswicklung wirksam. Der Kontakt des Relais schaltet auf negatives Potential. Anschlußschaltung und Vorwählerschaltung bilden eine Einheit.

Ortsteilnehmer (etwa bis 30 km Anschlußlänge) werden direkt über Zweidrahtleitungen an die Vermittlung angeschlossen.

Fernteilnehmer (beliebige Anschlußlänge) werden an eine vorgezogene Anschlußschaltung zweidrahtmäßig angeschlossen. Dort erfolgt die Umformung auf Vierdraht-Doppelstrom zur Übertragung über Wechselstromtelegrafie-Kanäle bis zur Vermittlung.

6.3.4. Fernschreib-Übertragungstechnik

Gleichstromtelegrafie- und Wechselstromtelegrafie-Verfahren

Die Aufgabe der Fernschreib-Übertragungstechnik ist es, zwei Endstellen fest miteinander zu verbinden (*Standverbindungen*) oder eine Verbindung zwischen zwei Vermittlungen zu schaffen (*Amtsverbindung*) oder ferne Teilnehmer (*Fernteilnehmer*) an die Vermittlung anzuschließen. Dazu wird in überwiegendem Maße das *Wechselstromtelegrafie-Verfahren* angewendet, u. a. bedingt durch den hierbei möglichen Einsatz von Verstärkern und die Mehrfachausnutzung von Leitungen.
Wechselstromtelegrafie-Einrichtungen haben die Aufgabe, die von Fernschreibvermittlungen bzw. Anschlußschaltungen kommenden Gleichstromzeichen in Wechselstromzeichen umzuwandeln. Auf der Sendeseite befinden sich Generatoren, die entsprechend den ankommenden Gleichstromzeichen an die Übertragungsleitung angeschaltet oder nicht angeschaltet werden. Es ergeben sich frequenzbenachbarte Impulsfolgen, die auf der Empfangsseite durch Siebschaltungen wieder in einzelne Kanäle aufgeteilt und dann gleichgerichtet werden können (amplitudenmodulierte Wechselstromtelegrafie) (Bild 6.96). Eine Tastung mit 2 unterschiedlichen Frequenzen je Kanal ist ebenfalls möglich (frequenzmodulierte bzw. frequenzumgetastete Wechselstromtelegrafie).
Frühere Schaltungen verwendeten zur Tastung polarisierte Relais, heute werden *Modler* eingesetzt. Das sind Schaltungen

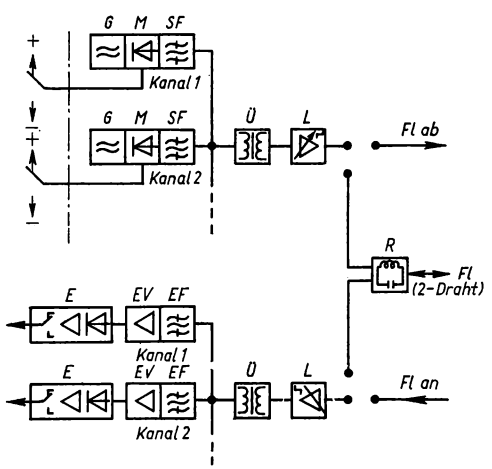


Bild 6.96. Blockschaltbild einer amplitudenmodulierten Wechselstromtelegrafie-Einrichtung
G Generator, M Modler, SF, EF Sende- und Empfangsfilter, Ü Übertrager, L Leitungsverstärker, R Richtungsweiche, EV Empfangs-Verstärker, E Empfänger, Fl Fernleitung

mit Gleichrichtern, die, abhängig vom anliegenden Potential, einen hohen oder niedrigen Widerstand besitzen. Frequenzen zur Übertragung liegen im Tonfrequenzbereich (1. Kanal 420 Hz, letzter Kanal 3180 Hz bei 120 Hz Frequenzabstand). Die Bandbreite für Schrittgeschwindigkeiten von 50 Bd beträgt 80 Hz. Zur Übertragung von 24 Kanälen ist eine Leitung mit einem Frequenzband von 300···3400 Hz notwendig, und zwar sowohl für die Senderichtung als auch für die Empfangsrichtung (*Vierdraht-Betrieb*). Beim *Zweidraht-Betrieb* genügt eine derartige Leitung (10 Kanäle des unteren Frequenzbereiches in Senderichtung, 10 Kanäle des oberen Frequenzbereiches in Empfangsrichtung). In neueren Wechselstromtelegrafie-Einrichtungen sind Sende- und Empfangsschaltungen für 24 Kanäle einschließlich Stromversorgung in einem Gestell untergebracht. Diese Einrichtungen sind volltransistorisiert.

6.3.5. Fernschreibnetze

Eigene Fernschreibnetze werden von verschiedenen Institutionen eingerichtet. Allgemeine Bedeutung besitzen das Telex- und das TGX-Netz der Deutschen Post.

6.3.5.1. Telex-Netz

Es dient dem schriftlichen Nachrichtenaustausch zwischen Fernschreibteilnehmern. Verbindungen innerhalb des Landes werden von den Teilnehmern selbst hergestellt. Auch internationale Verbindungen sind überwiegend automatisch, interkontinentale Verbindungen dagegen über handbediente Vermittlungsplätze möglich.
Die oberste Netzebene bilden voll miteinander vermaschte *Zentralämter*. An diese sind sternförmig *Hauptämter* angeschlossen. *Teilämter* werden dort eingerichtet, wo eine Konzentration von Fernteilnehmern auftritt (Bild 6.97).

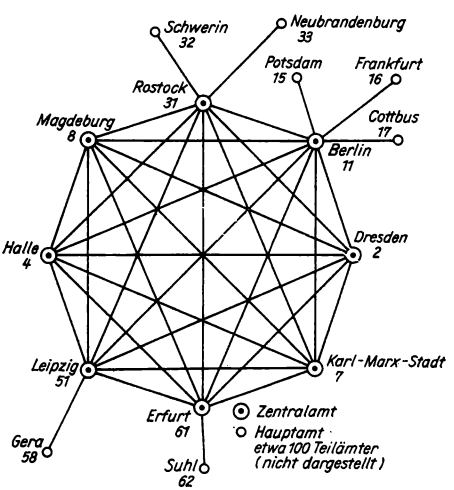


Bild 6.97. Telex-Netz der DDR ab 1966
Die geometrische Darstellung entspricht nicht den geografischen Verhältnissen

6.3.5.2. TGX-Netz

Es wurde zur Übermittlung der aufgelieferten Telegramme eingerichtet. Alle Verbindungen innerhalb des Landes werden direkt über Wählvermittlungen hergestellt.
An die Hauptämter sind Endtelegrafenstellen angeschlossen (Bild 6.98). Neben den Endtelegrafenstellen gibt es noch eine wesentlich größere Anzahl von Telegrafenstellen ohne Fernschreiber. Von dort werden aufgelieferte Telegramme über Fernsprecher zur nächsten Endtelegrafenstelle zugesprochen.
Telegramme in das Ausland werden zum Teil über Verbindungen des *Gentex-Netzes* übermittelt. Dieses Netz verbindet *Gentex-Endstellen* in allen europäischen Ländern über Wähl-Vermittlungseinrichtungen miteinander. In einigen Ländern ist das TGX-Netz mit dem Gentex-Netz verefnigt.

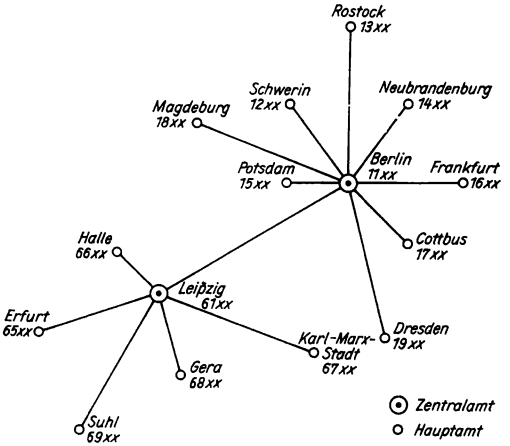


Bild 6.98. TGX-Netz
Die geometrische Darstellung entspricht nicht den geografischen Verhältnissen

6.3.5.3. Datenübertragung in Fernschreibnetzen

Fernschreib- und Datensignale unterscheiden sich nicht prinzipiell voneinander. Deshalb eignen sich die vorhandenen Fernschreibeinrichtungen auch für die Datenübertragung. Durch die niedrige Schrittgeschwindigkeit von 50 Bd lassen sich aber nur relativ kleine Datenmengen über Fernschreibnetze übertragen. Man strebt daher höhere Schrittgeschwindigkeiten für die Datenübertragung in Fernschreibnetzen an (TGL 26081). Es existieren bereits mehrere Vermittlungs- und Übertragungssysteme, die außer der für den Fernschreibverkehr (Telex, Gentex) vorgesehenen Schrittgeschwindigkeit, von 50 Bd höhere Schrittgeschwindigkeiten zulassen. Allerdings ist dann ein zusätzlicher Aufwand gegenüber einer Datenübertragung nach den Regeln des Telex-Dienstes (Start–Stop–Betrieb mit CCITT-Kode Nr. 2 und einer Schrittgeschwindigkeit von 50 Bd) notwendig.
Vom CCITT sind in der Empfehlung V. 10 Regeln für die Datenübertragung im Telexnetz festgelegt worden. Danach soll die Verbindung zwischen einem rufenden und einem gerufenen Anschluß nach dem vom CCITT empfohlenen Verfahren für den Aufbau einer Telexverbindung hergestellt und ihr Zustandekommen durch das vom Namengeber ausgetauschte Signal kontrolliert werden. Will einer der miteinander verbundenen Teilnehmer Geräte zur Datenübertragung anschalten, so soll er die Zeichenfolge »SSSS« (4mal die Kombination 19 des CCITT-Kodes Nr. 2) als Signal des Übergangs zur Datenübertragung senden. Beim Empfang dieser Zeichen wird die Datensende- oder -Empfangseinrichtung mit dem Übertragungsweg verbunden.

6.3.5.4. Fehlerkorrekturgerät

Für eine sichere Datenübertragung in Fernschreibnetzen steht in der DDR ein Fehlerkorrekturgerät zur Verfügung. Mit diesem Gerät können Lochstreifen durch ein Blocksicherungsverfahren in 50-Bd-Fernschreibnetzen sicher übermittelt werden.
International sind erste Schritte in Richtung eines eigenen Netzes zur Datenübertragung getan worden. Durch eine direkte Anschaltung von Datensender und Datenempfänger unter Wegfall der Fernschreiber ist eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger geringer Fehlerquote möglich.

6.4. Elektrische Uhrenanlagen

6.4.1. Allgemeines

Elektrische Synchronuhren enthalten als Antriebselement einen elektrischen Synchronmotor und werden aus dem Wechselstromnetz (220 V, 50 Hz) gespeist (Bild 6.99). Sie haben den *Nachteil*, bei Netzfrequenzschwankungen vor- bzw. nachzugehen (z. B. bei 2 Hz Frequenzabweichung um rund eine Stunde je Tag), so daß sie häufig von Hand nachgestellt werden müssen.

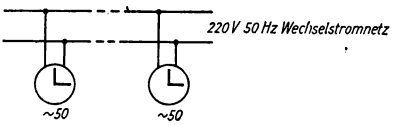


Bild 6.99. Schaltung von synchronmotorgetriebenen elektrischen Uhren

Deshalb verwendet man heute allgemein elektrische Uhrenanlagen, die aus einer *Hauptuhr* bzw. *Uhrenzentrale* mit Stromversorgungseinrichtung, mehreren *Nebenuhren* und einem *Leitungsnetz* bestehen. Die Nebenuhren können nicht selbständig und unabhängig von der Hauptuhr arbeiten. Sie werden vielmehr gleichzeitig nach jeder Minute von der Hauptuhr durch elektrische Gleichstromimpulse wechselnder Polarität weitergeschaltet. Dieses Prinzip erfordert die Anwendung von Nebenuhrwerken mit einem Elektromagnetsystem, das auf elektrische Impulse wechselnder Stromrichtung reagiert (*gepoltes System*). Es hat gegenüber nichtgepolten Systemen den Vorteil des geringen elektrischen Leistungsbedarfs. Die Nebenuhren schaltet man entweder parallel an die Steuerleitung der Hauptuhr (*Uhrenlinie*; Bild 6.100) oder hintereinander in eine Leitungsschleife (*Uhrenschleife*; Bild 6.101). Uhrenschleifen bieten Vorteile, wenn das Uhrenleitungsnetz einen großen Umfang besitzt, weil sie ständig auf *Drahtbruch* überwacht werden können. Überwiegend finden jedoch Uhrenanlagen mit Uhrenlinien Anwendung.

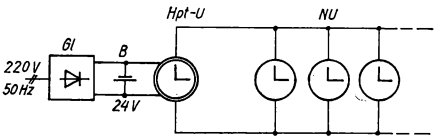


Bild 6.100. Uhrenlinie
Hpt-U Hauptuhr, NU Nebenuhren, B Batterie, Gl Gleichrichter

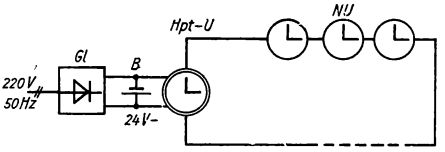


Bild 6.101. Uhrenschleife

6.4.2. Hauptuhr

Die Hauptuhr bestimmt die Genauigkeit, mit der die angeschlossenen Nebenuhren die Uhrzeit anzeigen. Als Hauptuhren verwendet man besonders genau gehende *Pendeluhren* mit Gewichtsantrieb und Kontakteinrichtung, die eine Zeitabweichung von maximal einer Sekunde je Tag verursachen. Das Pendel ist temperaturkompensiert und wird durch den Zug des Antriebsgewichts über den sog. Grahamgang (Hemmwerk) dauernd in Schwingung gehalten. Bei den allgemein üblichen Hauptuhren führt das Pendel eine Halbschwingung vom größten Ausschlag nach links bis zum größten Ausschlag nach rechts in einer Sekunde aus (Sekundenpendel). Die Schwingungsdauer läßt sich mit Hilfe einer Kordelmutter am unteren Ende des Pendels regulieren, wobei eine volle Umdrehung der Mutter einer Gangänderung von einer Minute je Tag entspricht. Das Antriebsgewicht wird durch einen Aufzugsmagneten M in jeder Minute wieder so weit angehoben, wie es in der vorangegangenen Minute gesunken ist (Bild 6.102). Der Aufzugsmagnet M liegt in einem Stromkreis mit dem Pendelkontakt Pk und dem Vorkontakt Vk in Reihe. Während Pk nach jeder Vollschwingung des Pendels schließt, d. h. alle zwei Sekunden, hält ein Hebel des mechanischen Hauptuhrwerkes den Vorkontakt Vk bis zur 58. Sekunde jeder Minute geöffnet. Erst dann schließt auch Vk, und M kann bei der folgenden Pendelschwingung das Antriebsgewicht aufziehen. Außerdem wird

durch den Aufzugsmagneten M die Impulsgabe für die an die Kontakteinrichtung angeschlossenen Nebenuhren bewirkt. Zu diesem Zweck verdreht M den Schaltstern Sch-St in zwei Schritten, und dessen Nocke N 1 schaltet die Nebenuhrenleitung b mit Hilfe des Polwendekontakts W I für etwa 1,5···2 s von Plus nach Minus. Über die Nebenuhren fließt ein Strom in der Richtung von Uhrenleitung a nach Uhrenleitung b. Die Nebenuhren springen um eine Minute weiter. Danach öffnet Vk wieder, und der Stromkreis des Aufzugsmagneten M bleibt bis zur 58. Sekunde der nächsten Minute unterbrochen. Die folgenden Pendelschwingungen können sich nicht mehr auf die Kontaktgabe des Polwendekontaktes auswirken. Erst in der nächsten 58. Sekunde beginnt das Kontaktspiel von neuem. Diesmal jedoch schaltet der Schaltstern mit seiner Nocke N 2 den Polwendekontakt W II. Über die Uhrenlinie fließt jetzt ein Strom in entgegengesetzter Richtung, d. h. von Uhrenleitung b nach Uhrenleitung a. Die Nebenuhren springen wieder um eine Minute weiter. Dieses Wechselspiel setzt sich fort.

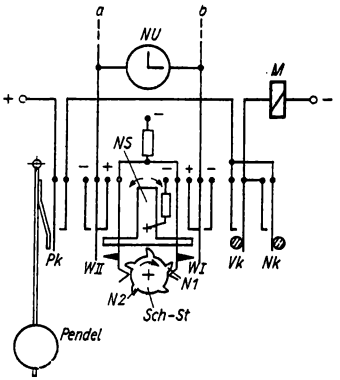


Bild 6.102. Schaltung einer Hauptuhr
Pk Pendelkontakt, Vk Vorkontakt, Nk Nachstellkontakt, WI + WII Polwendekontakte, Sch-St Schaltstern, N 1 + N 2 Nocken, NS Nachstellschalter, M Aufzugsmagnet, NU Nebenuhr

Elektrische Uhrenanlagen werden mit Gleichstrom aus einem Netzspeisegerät oder einer Akkumulatorenbatterie betrieben (meist mit einer Spannung von 24 oder 60 V). Setzt die Stromversorgung aus, bleiben die Nebenuhren stehen. Die Hauptuhr, die eine mechanische *Gangreserve* von etwa 10···12 h besitzt, läuft weiter. Kehrt die Spannung innerhalb der 10···12 h wieder, stellt die Hauptuhr die Nebenuhren automatisch auf elektrischem Wege nach (Nk *Nachstellkontakt*). Wird diese Zeit überschritten, kann die Nachstellung nur von Hand mit dem mechanischen Nachstellschalter NS erfolgen. Außer den beschriebenen Hauptuhren finden Hauptuhren Anwendung, die die angeschlossenen Nebenuhren in jeder halben Minute bzw. in jeder Sekunde fortschalten. In Uhrenanlagen für Schulen und Betriebe versieht man die Hauptuhr oft mit einer *Signaleinrichtung*, die es gestattet, mit Hilfe eines Signalkontakts in Abständen von 5 zu 5 min elektrische Läutewerke, Hupen oder andere Signalgeräte zur Pausensignalgabe einzuschalten. Die Polwendekontakte vertragen eine Strombelastung von 500 mA. Da der Stromverbrauch der Nebenuhren bei 24 V Betriebsspannung nicht mehr als 10 mA beträgt, lassen sich etwa 50 Nebenuhren an eine Hauptuhr anschließen.

6.4.3. Impulsverstärker

Sollen mehr als 50 Nebenuhren von einer Hauptuhr aus betrieben werden, benötigt man Impulsverstärker. Darüber hinaus sind Impulsverstärker erforderlich, wenn lange Uhrenleitungen einen so hohen Spannungsabfall verursachen, daß die angeschlossenen Nebenuhren nicht mehr sicher fortschalten. Aus wirtschaftlichen Gründen sieht man davon ab, den Querschnitt der Uhrenleitungen zu vergrößern. Ein *Minutenimpulsverstärker* besteht im wesentlichen aus einer Relaisanordnung, die wie eine Nebenuhr an eine Uhrenlinie (Steuerleitung) anzuschließen ist und im Rhythmus der elektrischen Impulse der Hauptuhr anspricht. Die Kontakte dieser Relaisanordnung steuern meist 2 von der Stromversorgungseinrichtung der Hauptuhr unabhängige Nebenuhrenlinien, die ihren Speisestrom einer besonderen Batterie oder einem Netzspeisegerät entnehmen. Auf diese Weise können zusätzlich etwa 2 × 50 Nebenuhren an eine Hauptuhr angeschlossen werden.

6.4.4. Uhrenzentralen

Umfangreiche und verzweigte Uhrennetze mit einer großen Anzahl von Nebenuhren verursachen wegen ihrer unübersichtlichen Leitungsführung erhebliche Schwierigkeiten für das Wartungspersonal. Störungen in der Hauptuhr wirken sich auf das gesamte Uhrennetz aus. Fehler im Leitungsnetz sind schwer zu finden. Um diese Nachteile zu vermeiden, wendet man in großen Uhrennetzen als Steuereinrichtungen sog. *Uhrenzentralen* an (Bild 6.103). Uhrenzentralen besitzen neben der *Betriebshauptuhr* eine 2. Hauptuhr (*Reservehauptuhr*) und einen besonderen *Steuerteil*. Beide Hauptuhren sind in Betrieb, jedoch nur die Betriebshauptuhr gibt Impulse an die Nebenuhrenlinien des Steuerteils weiter. Tritt in der Betriebshauptuhr eine Störung auf, sorgt eine elektrische Umschalteinrichtung dafür, daß die Reservehauptuhr automatisch die Impulsgabe übernimmt. Das setzt voraus, daß die beiden Hauptuhren synchron laufen, d. h. ihre Impulse immer gleichzeitig an den Steuerteil abgeben. Um *Synchronlauf* zu erreichen, sind beide Hauptuhren durch eine *Synchronisationseinrichtung* miteinander verbunden (Bild 6.104). Die Nebenuhren, die von der

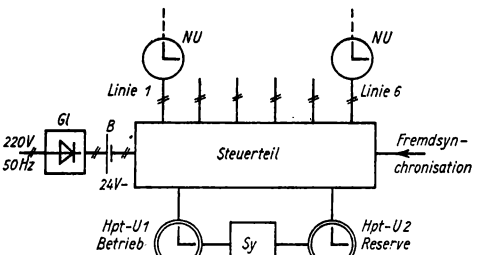


Bild 6.103. Blockschaltung einer Uhrenzentrale
Hpt-U Hauptuhr, NU Nebenuhr, Gl Gleichrichter, B Batterie, Sy Synchronisationseinrichtung

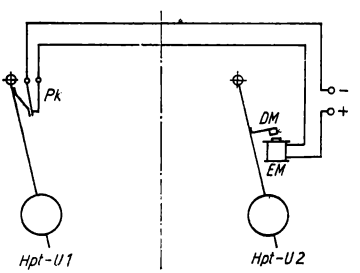


Bild 6.104. Synchronisationseinrichtung von Hauptuhren
Pk Pendelkontakt, DM Dauermagnet, EM Elektromagnet

Uhrenzentrale fortgeschaltet werden sollen, teilt man auf mehrere Linien oder Schleifen auf, meist in Gruppen zu 6 Linien. Die Linien können zur Störungsbeseitigung unabhängig voneinander außer Betrieb genommen werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, jede Linie einzeln von Hand mit Hilfe einer *Nachstelleinrichtung* nachzustellen. Störungen werden optisch und akustisch angezeigt. Sämtliche Steuerrelais, Umschalte-, Überwachungs- und Sicherungseinrichtungen sowie Kontrolluhren (je Linie eine *Kontrolluhr*) sind im Steuerteil untergebracht. Wie erwähnt, weisen Hauptuhren nach genauer Regulierung nur geringe Gangabweichungen auf. Dennoch kann es über längere Zeit zu wesentlichen Abweichungen kommen. Deshalb besitzen Uhrenzentralen vielfach Einrichtungen zur *Fremdsynchronisierung*, die sog. *Sternwartensynchronisierung*.

6.4.5. Nebenuhren

Nebenuhren setzen die von der Hauptuhr oder der Uhrenzentrale ausgesandten elektrischen Impulse in Zeigerbewegungen um.
Die Hauptbestandteile von Nebenuhren sind: Uhrwerk, Zifferblatt, Zeiger, Gehäuse, zum Teil Beleuchtungseinrichtung und Schutzscheibe aus Glas. Das Uhrwerk besitzt ein gepoltes System, d. h. einen Elektromagneten, dem ein mit dem Anker verbundener Dauermagnet gegenübersteht. Man unterscheidet *Drehankersysteme* für kleine Nebenuhren mit leichten Zeigern und *Schwingankersysteme* für große Uhren mit schweren Zeigern.
Das Funktionsprinzip eines Schwingankeruhrwerks ist aus Bild 6.105 zu ersehen. In der gezeigten Stellung des Uhrwerks bewirkt der über die Uhrenleitung zum Uhrwerk gelangende Stromimpuls eine Magnetisierung des hufeisenförmigen Elektromagneten M in der Weise, daß der Polschuh auf der linken Seite S-Polarität und der Polschuh auf der rechten Seite N-Polarität annimmt. Den Polschuhen steht der mit einem Permanentmagneten versehene Schwinganker SA gegenüber, und zwar mit dem S-Pol. Der S-Pol des Permanentmagneten wird vom linken Polschuh des Elektromagneten M (S-Polarität) abgestoßen und vom rechten Polschuh des Elektromagneten M (N-Polarität) angezogen. Der Schwinganker führt um die Drehachse D eine Drehbewegung entgegen dem Uhrzeigersinn aus. Am Permanentmagneten des Schwingankers SA befestigte, besonders geformte Polbleche tragen zur Verstärkung der magnetischen Kräfte bei. Der nächste Uhrenimpuls mit umgekehrter Polarität bewirkt eine Schwingung des Schwingankers SA in umgekehrter Richtung, d. h. im Uhrzeigersinn.

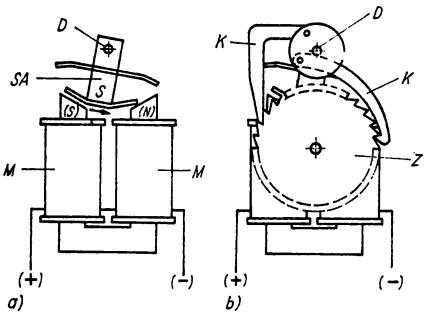


Bild 6.105. Nebenuhrwerk (Schwingankersystem)
a) ohne, b) mit Klinkenhebel und Zahnrad
M Elektromagnet, SA Schwinganker, D Drehachse, K Klinkenhebel, Z Zahnrad

Mit der Drehachse D ist ein Klinkenhebelwerk verbunden, das die Schwingbewegungen in eine Drehbewegung umwandelt und auf das Zahnradgetriebe des Uhrwerks überträgt, so daß die Uhrzeiger entsprechend der Impulsfolge schrittweise fortschalten.
Nebenuhrwerke sprechen noch bei etwa 75% der Nennspannung einwandfrei an (Kennwerte s. Tabelle 6.56).
Bei der Auswahl, Anordnung und Montage von elektrischen Nebenuhren (NU) sind folgende *Regeln* zu beachten:

1. Der Zifferblattdurchmesser von NU ist nach der notwendigen Sichtweite auszuwählen.

2. NU sind so anzuordnen, daß der Sichtbereich nicht durch Hindernisse (Stützen, Unterzüge, Beleuchtungskörper usw.) eingeengt wird.

3. In Innenräumen soll die Montagehöhe für NU mindestens 2,5 m über OFF (Oberfläche Fußboden) betragen, um das absichtliche Verstellen der Zeiger zu erschweren (z. B. bei offenen Skelett- und Schmuckuhren). Um die Montage und Wartung nicht zu erschweren, soll die Montagehöhe i. allg. 5 m über OFF nicht überschreiten.

4. Bei unzureichenden Lichtverhältnissen, z. B. in Fluren, sind NU mit beleuchteten Zifferblättern einzusetzen (zusätzlicher Starkstromanschluß notwendig!).

5. Werden NU mit Glas-Schutzscheiben eingesetzt und von außen beleuchtet, ist darauf zu achten, Spiegelungen und Blendwirkungen zu vermeiden. Die Beleuchtungskörper sollen möglichst schräg (45°) unter oder neben den NU angeordnet werden.

6.4.6. Uhrenleitungsnetz

Als Installationsmaterialien für Uhrenleitungsnetze werden überwiegend Plastmantelleitungen NIYYfl $2 \times 2{,}5$ mm² Al und Plastaderleitungen NYA 2,5 mm² Al (unter Putz in Rohren) sowie Abzweig- und Klemmdosen verwendet, wie sie in der Starkstromtechnik üblich sind. Der Spannungsabfall längs der Uhrenleitungen bis zur letzten angeschlossenen Nebenuhr darf bis zu 25% der Betriebsspannung (Nennspannung) betragen. Das ist bei der Netzberechnung zu berücksichtigen.

Anmerkung

Elektrische Uhrenanlagen stellen komplizierte elektromechanische Einrichtungen dar, die nur von Fachkräften ordnungsgemäß aufgebaut und gewartet werden können.

Tabelle 6.56: Kennwerte von Nebenuhren

Zifferblattdurchmesser der Nebenuhr	Sichtweiten[1]) Marken für Minuten	Stunden	Nebenuhrwerk mit Drehanker[2])	Schwinganker[3])	Uhrwerk für Linienbetrieb Stromaufnahme in mA für 24 V− NUW	NU	für 60 V− NUW	NU	Uhrwerk für Schleifenbetrieb Spulenwiderstand[4]) Ω NUW	NU
	erkennbar in Entfernung von									
mm	m				20	7; (3)	20	7; (3)	20	7; (3)
60	3	6	×		5	–	2,5	–	0,8	–
250	15	35	×		5	17,2	2.5	8,5	0,8	1,4
320	23	55	×		5	17,2	2,5	8,5	0,8	1,4
400	32	75	×		5	17,2	2,5	8,5	0,8	1,4
630	55	135		×	–	(33,5)	–	(8,5)	–	(2)
1000	95	235	Sonderuhrwerke bzw.							
2000	200	500	Motorantrieb							

[1]) Mittelwerte, ermittelt bei normalen Tageslichtverhältnissen durch normalsichtige Personen; keine Blendwirkung
[2]) maximale Zeigermasse: 50 g; maximale Zifferblattdurchmesser: 400 mm
[3]) maximale Zeigermasse: 100 g; maximale Zifferblattdurchmesser: 630 mm
[4]) Schleifenstrom: 300 mA

7. Elektronische Datenverarbeitung

7.1. Bedeutung der elektronischen Datenverarbeitung

Die *elektronische Datenverarbeitung* (EDV) ist die Gesamtheit der organisatorischen, mathematischen, programm- und gerätetechnischen *Verfahren zum Erfassen, Verknüpfen und Darstellen von Datenfolgen* mit vorwiegend elektronischen Mitteln.
Das Hauptziel der Anwendung der EDV ist es, die gesellschaftliche Arbeit insgesamt und die geistigen Tätigkeiten im besonderen zu rationalisieren, die Qualität der Leitung und Planung gesellschaftlicher Prozesse zu erhöhen und damit das Nationaleinkommen maximal steigern zu helfen.
Der Prozeß der komplexen sozialistischen Automatisierung erstreckt sich sowohl auf die unmittelbaren Bearbeitungsprozesse als auch auf die Vorbereitung, Leitung und Steuerung des Ablaufs der Produktionsprozesse. Die Automatisierung der Informationsverarbeitung ist unmittelbarer Bestandteil der komplexen sozialistischen Automatisierung.
Als *Systeme* der *automatisierten Informationsverarbeitung* bezeichnet man Datenverarbeitungssysteme, die alle Phasen eines betrieblichen Reproduktionsprozesses umfassen, die gegenseitige Verflechtung berücksichtigen und die Informationsverarbeitung vorwiegend automatisch durchführen.

Teilbereiche derartiger Datenverarbeitungssysteme sind u. a.:

Forschung und Entwicklung,
Konstruktion,
Projektierung und Technologie,
Information und Dokumentation,
automatisierte Produktionssteuerung.

Zur Realisierung dienen Datenverarbeitungsanlagen, die sich in Größe, Gerätezusammenstellung und Arbeitsweise unterscheiden. Für die »*Automatisierte Produktionssteuerung*« wird dazu der *Prozeßrechner* benutzt.

7.2. Grundlagen der Datenverarbeitung

7.2.1. Informationsdarstellung

Informationen sind Mitteilungen über Gegenstände, Erscheinungen und Prozesse der objektiven Realität bzw. Darstellungen von ihnen. *Daten* sind durch allgemeingültige und vereinbarte Zeichen (Symbole) erfaßte Darstellungen von Gegenständen, Prozessen und Erscheinungen, die in Zeichenfolgen sinnvoll zusammengefaßt sind.

Das *Zeichen* ist das kleinste, nicht weiter teilbare Datenelement eines gegebenen Zeichenvorrats. Es gibt *numerische Zeichen* (z. B. Ziffern) und *Alpha-Zeichen* (z. B. Buchstaben). Der Zeichenvorrat ist die Gesamtheit aller unterschiedlichen Zeichen eines bestimmten Systems zur Informationsdarstellung.

Beispiel: Zahlenangaben im Dezimalsystem

Zahlzeichen: Ziffern 0, ..., 9,
Datenelement »Zeichen«: Ziffer,
Zeichenvorrat: Gesamtheit aller Darstellungselemente (10 unterschiedliche Ziffern);

Datenarten:

numerische Daten (Zahlangaben),
alphamerische Daten (Textangaben),
alphanumerische Daten (gemischte Angaben).

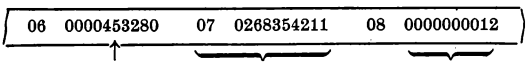
Dateneinheiten:

Zeichen,
Wort: Folge von Zeichen mit einer bestimmten Länge,
Datensatz: Folge von Wörtern,
Datengruppe: Folge von Datensätzen,
Datenblock: Folge von Datengruppen.

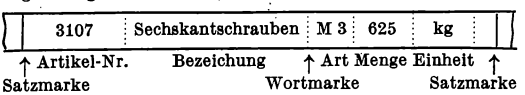
Kleinste *Einheit zur Darstellung von Zeichen* ist das *Bit*. Es kann die zwei Informationen O und L darstellen. Damit ist das Bit die einzelne Stelle der binären Darstellung. Mehrere Bits werden zu einem Wort zusammengefaßt.

Beispiele von Datenstrukturen (schematisch):

Zahlwörter (konstante Wortlänge von 10 Zeichen)



Datensatz (Satz aus numerischen, alphanumerischen und alphamerischen Wörtern mit variabler Wortlänge; Wort- bzw. Satzbegrenzung durch Marken)



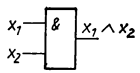
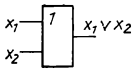
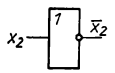
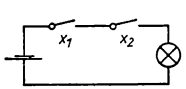
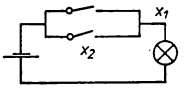
7.2.2. Arithmetische Operationen

Alle arithmetischen Operationen lassen sich in Folgen von *Grundoperationen* auflösen. Die wichtigsten Grundoperationen sind Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division, auf denen die Arbeitsweise jedes Rechenwerks einer EDV-Anlage, kurz EDVA, beruht.

Tabelle 7.1: Grundregeln der binären Grundoperationen

Operation	Grundregel		Beispiel		
Addition	0 + 0 = 0 0 + L = L L + 0 = L L + L = 0	Übertrag L	23 +11 34	LOLLL +OLOLL LLLLL LOOOLO $= 2^5 + 2^1 = 34$	Übertrag
Subtraktion	0 − 0 = 0 L − 0 = L 0 − L = L L − L = 0	Mangel L	34 −11 23	LOOOLO −OOLOLL LLLLLL OLOLLL $= 2^4 + 2^3 + 2^1 + 2^0 = 23$	Mangelübertrag
Multiplikation	0 · 0 = 0 0 · L = 0 L · 0 = 0 L · L = L		13 · 5 65	LLOL · LOL LLOL OOOO LLOL LOOOOOL $= 2^6 + 2^0 = 65$	

Tabelle 7.2: Logische Operationen

Bezeichnung		Konjunktion »und«	Disjunktion »oder«	Negation »nicht«
Eingangsvariable		Ausgangsvariable		
x_1	x_2	$y = f(x_1, x_2)$	$y = f(x_1, x_2)$	$y = f(x_2)$
O	O	O	O	L
O	L	O	L	O
L	O	O	L	L
L	L	L	L	O
		Ausgangsgröße hat nur dann den Wert L, wenn *alle* Eingangsgrößen den Wert L haben	Ausgangsgröße hat den Wert L, wenn *wenigstens eine* der Eingangsgrößen den Wert L hat	Ausgangsgröße entspricht *immer dem* Gegenteil der Eingangsgröße
symbolische Schreibweise		$y = x_1 \wedge x_2$	$y = x_1 \vee x_2$	$y = \overline{x}_2$
Schaltungskurzzeichen				
Schaltermodell »O« offen »L« geschlossen		 Reihenschaltung	 Parallelschaltung	

In der Regel können alle Grundoperationen auf Addition, Komplementbildung (Ergänzung bis zu einer vorgegebenen Größe) und Stellenverschiebung zurückgeführt werden. Die Grundoperationen werden im Dualsystem nach den gleichen Methoden wie im Dezimalsystem ausgeführt (Tabelle 7.1).

7.2.3. Logische Operationen

Das theoretische Fundament für die digitalen Rechenanlagen bildet die *Algebra einer zweiwertigen Logik*, in der nur zwei Elemente, »wahr« oder »nicht wahr«, »ja« oder »nein«, »L« oder »O«, unterschieden werden. Die wichtigsten *logischen Operationen* sind (am Beispiel von zwei Variablen) in Tabelle 7.2 erläutert. Zur Realisierung der Rechenoperationen und zur Steuerung des Arbeitsablaufes in Rechenanlagen werden sog. *logische Bauelemente* benutzt. Diese Bauelemente verwirklichen logische Grundoperationen.
Als Beispiel für eine zusammengesetzte logische Schaltung zur Addition von zwei Dualzahlen gleichen Stellenwertes ohne Berücksichtigung des Übertrages, genannt *Halbadder*, dient Bild 7.1.

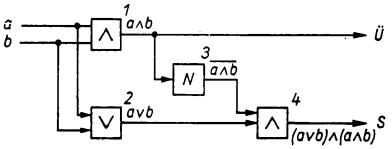


Bild 7.1. Halbadder mit tabellarischer Zuordnung der Zustände

Zustände am Eingang		Zustände am Ausgang der einzelnen logischen Elemente			
a	*b*	1	2	3	4
O	O	O	O	L	O
L	O	O	L	L	L
O	L	O	L	L	L
L	L	L	L	O	O
		↓			↓
		Übertrag			Summe

7.3. Datenerfassung und Datenaufbereitung

7.3.1. Datenbereitstellung

Die Verarbeitung von Daten in einer EDV-Anlage setzt die Bereitstellung der Eingangsdaten voraus. Unter der *Datenbereitstellung* versteht man die Entnahme der für die Verarbeitung benötigten Daten aus den zugrunde liegenden technischen oder ökonomischen Vorgängen und Erscheinungen und deren verarbeitungsgerechte Bereitstellung in der EDVA (Tabelle 7.3).

Tabelle 7.3: Elemente der Datenbereitstellung

Element	Beispiel
Aufzeichnung der Daten	Beschriften eines Belegs
Erfassen der Daten	Lochen einer Lochkarte
Übermitteln der Daten	manueller Transport oder Datenfernübertragung
Eingabe der Daten in die Anlage	

Von der *Qualität der Eingangsdaten* hängt das Ergebnis der Datenverarbeitungsprozesse wesentlich ab. Diese Qualität wird bestimmt durch Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität und Beständigkeit der Daten. Daraus resultiert die hohe Verantwortung aller Werktätigen, die an der Bereitstellung der Daten in irgendeiner Form, insbesondere im Leitungs- und Planungsprozeß, beteiligt sind.

7.3.2. Datenerfassung

Die *Datenerfassung* ist die Umwandlung von Daten oder von anderen Informationen in eine maschinenlesbare und auswertbare Form mit Hilfe von *Datenerfassungsgeräten* (Tabelle 7.4).

Tabelle 7.4: Verfahren der Datenerfassung (DE)

Datenerfassung			
direkte Datenerfassung		*indirekte Datenerfassung*	
direkte Kopplung zwischen DE-Geräten und der EDVA		zeitliche und örtliche Trennung der DE-Geräte und der EDVA	
Zuführung der Daten ohne maschinenlesbaren Datenträger		Zuführung der Daten über einen maschinenlesbaren Datenträger	
mechanisiert	automatisiert	mechanisiert	automatisiert
manuelle Eingabe direkt in EDVA, unmittelbare Korrespondenz mit Anlage	automatische Abnahme der Daten vom Prozeß (Echtzeitverarbeitung)	manuelles Übertragen der Daten von den Belegen in die DE-Geräte; Speicherung in Datenträgern	automatische Aufnahme der Daten aus dem Prozeß und Eingabe in die DE-Geräte; Bereitstellung der Datenträger
Tastatur, Bildschirmgeräte mit Lichtstift, Mikrophon		maschinelles Einlesen in die EDVA	maschinelles Einlesen der Daten in die EDVA
mittlerer manueller Aufwand	geringer manueller Aufwand; geringe Fehlerwahrscheinlichkeit	hoher manueller Aufwand; erhebliche Fehlermöglichkeit	begrenzter manueller Aufwand; Kontrollfunktion des Menschen
Platzbuchungssysteme u. ä.	Prozeßsteuerungssystem zur unmittelbaren Steuerung und Regelung des Prozesses	gegenwärtig am häufigsten benutztes Verfahren für 80···90% aller erfaßten Daten	Datenverarbeitungssysteme mit Stapelverarbeitung

7.3.3. Datenträger

Datenträger sind Mittel zum Festhalten von alphanumerischen Daten. Sie dienen als *Datenspeicher* für eine spätere Auswertung und als Organisationsmittel für die Leitung und Planung betrieblicher Abläufe (Bild 7.2).

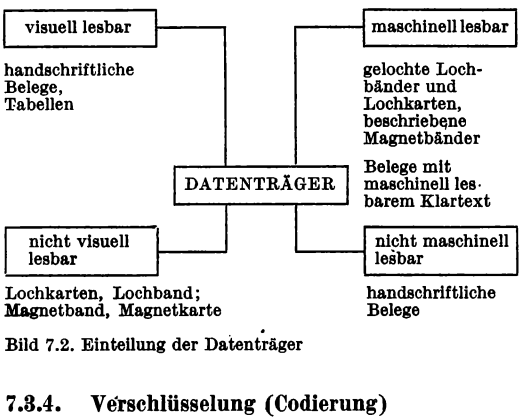


Bild 7.2. Einteilung der Datenträger

7.3.4. Verschlüsselung (Codierung)

Für die Eingabe von Informationen in eine EDVA sind Datenträger erforderlich, die die einzugebenden Informationen in einer maschinenlesbaren verschlüsselten (codierten) Form enthalten. Beim *Codieren* erfolgt die Verschlüsselung von Informationen nach einem bestimmten *Code*, der die Gesamtheit an Regeln erfaßt, nach denen der Informationsinhalt einem bestimmten Zeichenvorrat zugeordnet wird.
Beim *Bindrcode* müssen alle Daten mit Hilfe der beiden Zeichen O und L codiert werden.
Eine EDVA ist auf ein spezielles, vom Hersteller der Anlage festgelegtes *Codierungssystem* (Maschinencode) abgestimmt und kann i. allg. nur dieses verarbeiten.
Der Code für die EDVA ROBOTRON 300 enthält 64 Zeichen, und zwar die zehn Ziffern 0, ..., 9, die 26 Buchstaben des Alphabets und weitere festgelegte Symbole.
Alle im ESER standardisierten Codes verwenden einen einheitlichen Zeichensatz. Der *internationale Zeichensatz* des ESER besteht aus 32 Steuerzeichen und 95 grafischen Zeichen (52 lateinische Groß- und Kleinbuchstaben, 10 Ziffern und 33 Sonderzeichen). Der *vollständige Zeichensatz* des ESER ist eine Erweiterung des internationalen Zeichensatzes und enthält zusätzlich 32 weitere Steuerzeichen und 64 kyrillische Groß- und Kleinbuchstaben.
Als Datenträger sind *Lochkarte* und *Lochstreifen* gegenwärtig am meisten verbreitet. Die Codierung umfaßt hier die Zuordnung von Zeichen zu Lochkombinationen. Entsprechend der internen Darstellung eines Zeichens in der EDVA R 300 wird für die Verschlüsselung auf dem Lochstreifen ein 8-Kanal-Codierungssystem verwendet. Ein Zeichen wird jeweils quer zur Längsrichtung des Streifens dargestellt.
Im Rahmen des EDV-Systems der EDVA R 300 wird die 80spaltige Lochkarte mit 12 Zeilen benutzt. Den zu verschlüsselnden Zeichen werden bestimmte Lochungen (rechteckige Ausstanzungen) in einer Spalte zugeordnet (Bild 7.3).
Kenngrößen von Datenträgern sind in Tabelle 7.5 dargestellt.

Tabelle 7.5: Datenträger

Kenngröße	Lochkarte	Lochstreifen	Magnetband	Magnetkarte
Darstellung der Daten	Folge zweiwertiger Zustände in Form von Lochkombinationen	Lochkombinationen quer zum Streifen (»gelocht« ≙ L, »nicht gelocht« ≙ O)	lokale Magnetisierung in Form von zwei entgegengesetzten Zuständen	lokale Magnetisierung (≙ Lochung auf Lochkarte)
Prinzip des maschinellen Lesens vom Datenträger	a) elektromechanisch b) elektromagnetisch c) fotoelektrisch	a) elektromagnetisch b) fotoelektrisch	elektromagnetisch	elektromagnetisch
Eingabegeschwindigkeit (maximal)	a) 5000···20000 Karten/h b) 500 Karten/h c) 1000 Zeichen/s	a) 100···300 Zeichen/s b) 1000 Zeichen/s	20000···300000 Zeichen/s	100000 bis 150000 Zeichen/s
Datenaufnahme	einmalig	einmalig	beliebig oft	beliebig oft
Speicherkapazität (maximal)	80 Zeichen	4 Zeichen/cm Streifen	300 Zeichen/cm Band	21700 Zeichen/Karte

Tabelle 7.5 (Fortsetzung)

Kenngröße	Lochkarte	Lochstreifen	Magnetband	Magnetkarte
Transporteignung	schlecht	sehr gut	gut	gut
Material	Spezialkarton	pergamentartiges Papier bzw. Kunststoff	Kunststoffband mit ferromagnetischer Schicht	Kunststoff mit ferromagnetischer Schicht
Dicke		0,085 mm	Band: 0,045 mm Schicht: 0,011 mm	
Breite	82,5 mm	17,5···25,4 mm	$^1/_2$ Zoll	8 cm
Länge	187,5 mm	300 m/Spule	750 m/Spule Bandgeschwindigkeit: 1,52···1,90 m/s	35 cm Übertragungsgeschwindigkeit: 100000 Zeichen/s
			Informationsdichte: 22 bzw. 33 bit/mm	Informationsdichte: 10 bit/mm
Besondere Anwendung	häufig verwendeter Datenträger; zentrale Datenerfassung (am Ort der Eingabe in die EDVA)	dezentrale Datenerfassung (am Ort der Entnahme der Daten aus dem Prozeß)	externes Speichermedium für Ein- und Ausgabe umfangreicher Datenmengen	externes Speichermedium

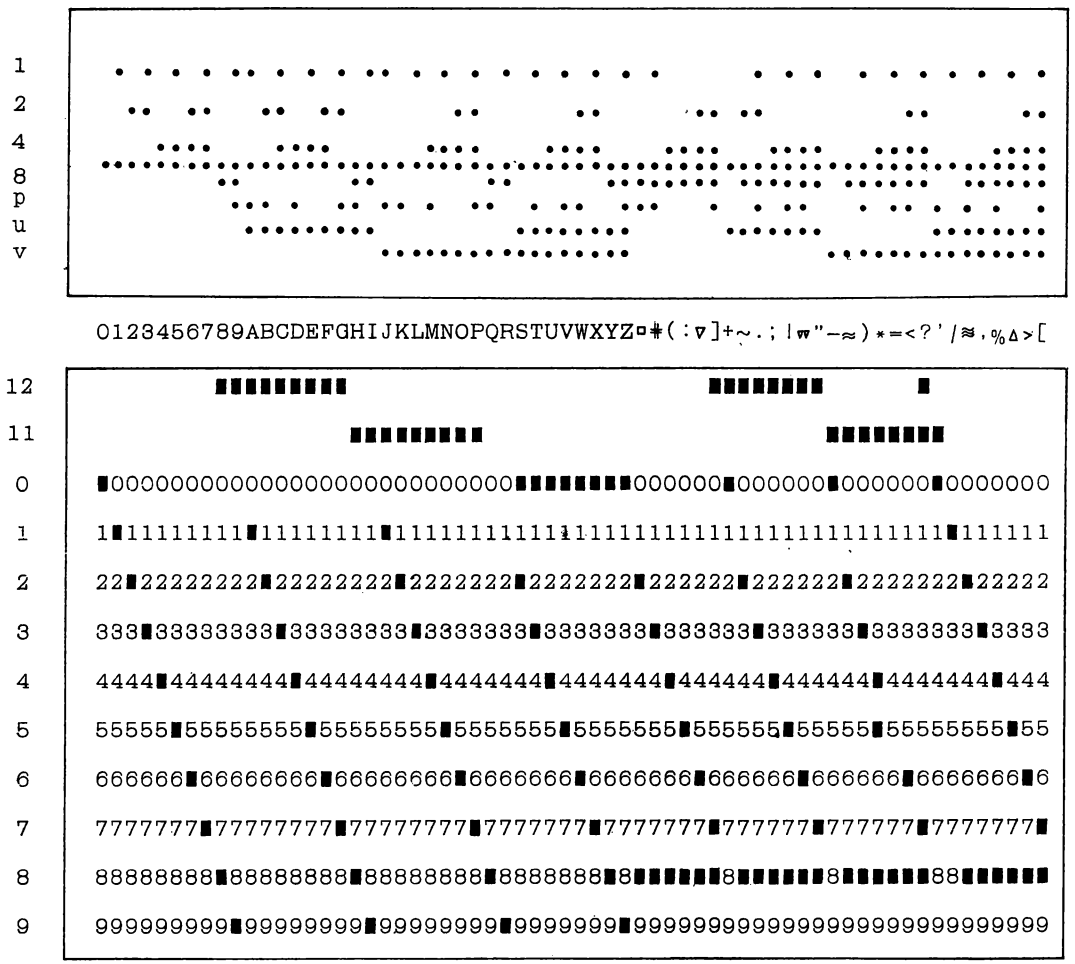


Bild 7.3. Code für Lochband und Lochkarte der EDVA ROBOTRON 300 (beim Magnetband erfolgt die Codierung im Prinzip wie beim Lochband)

7.4. Aufbau und Arbeitsweise von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen

7.4.1. Anforderungen und Grundfunktionen

Forderungen an EDVA sind in Tabelle 7.6 zusammengestellt.

Typische Anforderungen an eine EDVA

Anlagen, die eine solche Systemstruktur haben, daß sie außer Zahlen auch nichtnumerische Informationen verarbeiten können, bezeichnet man als *elektronische Datenverarbeitungsanlagen*. Dabei steht bei den meisten Aufgaben nicht die arithmetische Rechnung im Vordergrund, sondern die Verarbeitung (d. h. Aufnahme, Speicherung, Sortieren und Ausgabe) einer großen Anzahl von Daten. Folgende *Anforderungen* müssen gewährleistet sein:

hohe Geschwindigkeit der Eingabegeräte,
große Speichermöglichkeiten mit kurzer Zugriffszeit,
große Rechengeschwindigkeiten,
schnelle Ausgabegeräte,
weitgehende Programmierhilfen,
Ein- und Ausgabekanäle für Datenfernübertragung.

Die Grundfunktionen der maschinellen und elektronischen Datenverarbeitung sind in Tabelle 7.7 dargestellt. Die Bilder 7.4 und 7.5 zeigen Datenflußpläne.

Die Arbeitsweise einer EDVA beruht auf dem Prinzip der *Programmsteuerung*. Den Ablauf der Rechenoperationen innerhalb der Anlage steuert ein vorgegebenes Programm, das vor der Bearbeitung der Aufgabe in die Rechenanlage eingegeben und dort gespeichert wird. Das *Programm* ist die zur Lösung einer Aufgabe notwendige Folge von Anweisungen, die jeweils einer von der EDVA ausführbaren Grundoperation entspricht.

Tabelle 7.6: Allgemeine Anforderungen an EDVA

Wissenschaftlich-technische Berechnungen	Ökonomische Berechnungen
geringe Menge von Eingangswerten	große Menge von Eingangswerten
umfangreiche Rechengänge	relativ einfache, kurze Rechenoperationen und logische Entscheidungen
geringe Menge von Ausgangsdaten	große Menge von Ausgangsdaten
leistungsfähiges Rechenwerk	relativ einfaches, schnelles Rechenwerk
Ein- und Ausgabeeinrichtungen ohne besondere Anforderungen	hohe Anforderungen an die Ein- und Ausgabeeinrichtungen und die Speicher

Die einzelnen Verarbeitungsschritte (Einzelanweisungen) für die Rechenanlage sind die Befehle. Jeder *Befehl* ist eine eindeutige Anweisung für eine Rechenoperation. Er wird durch ein Befehlswort dargestellt.
Die *Befehlsliste* ist die Gesamtheit aller Befehle, über die eine EDVA verfügt.
Durch den Aufbau des Befehlswortes, die Abarbeitung der Befehle in der Reihenfolge ihrer Speicherung und die Möglichkeit der Unterbrechung dieser Reihenfolge durch Sprünge zu jedem beliebigen Befehl ist gesichert, daß die logisch notwendige *Reihenfolge der Arbeitsschritte* zur Lösung der Aufgabe eingehalten wird.

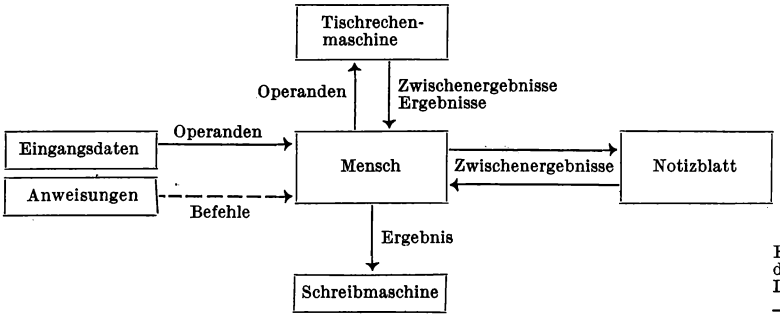


Bild 7.4. Schematische Darstellung des manuellen bzw. maschinellen IV-Prozesses
——— Daten, – – – Anweisungen

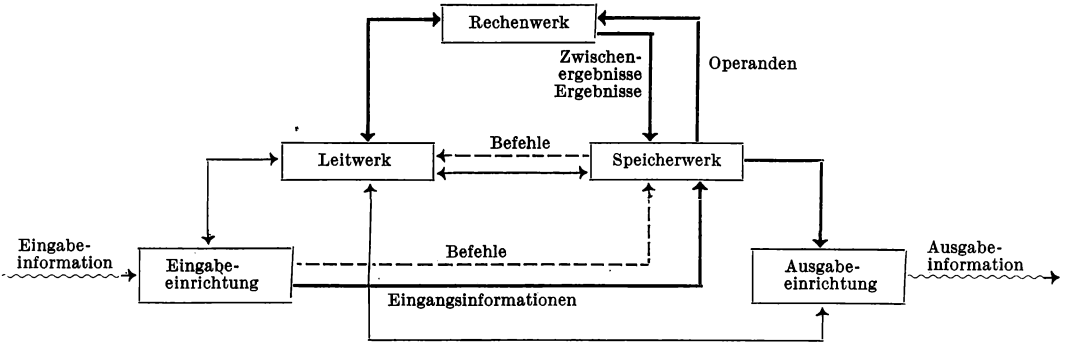


Bild 7.5. Blockschaltbild einer EDVA und des Informationsflusses (Arbeitsschema des automatisierten IV-Prozesses)
——— Daten, – – – – Anweisungen (Befehle), ——— Steuer- und Meldesignale

Tabelle 7.7: Grundfunktionen der maschinellen und elektronischen Datenverarbeitung

Manuelle bzw. maschinelle Informationsverarbeitung			Struktur einer programmgesteuerten Rechenanlage		
Aufgabe	Einrichtung	Grundfunktion	Baueinheit	Aufgabe	Einrichtung
Eingabe der Zahlenwerte in die Rechenmaschine	Tastatur der Rechenmaschine	Eingabe	Eingabewerk	Verbindung von der Außenwelt zur Maschine, Aufnahme von Anweisungen und Zahlenwerten	elektrische Schreibmaschine, Lochkartenleser, Lochstreifenleser, Magnetbandgerät
Aufbewahren von Anfangsdaten, Zwischenergebnissen und Endergebnissen	Notizblatt, kurzzeitig auch Rechenmaschine	Speichern	Speicherwerk	Aufnahme und Aufbewahren von Zahlen und Befehlen bis auf Abruf	interne (Haupt-)Speicher: Kernspeicher, Halbleiterspeicher
Durchführung der Rechenoperationen	Rechenmaschine	Rechnen	Rechenwerk	Durchführung der vom Programm vorgeschriebenen arithmetischen und logischen Operationen	Netzwerk aus logischen Schaltungen und Registern
Anzeige oder Ausgabe von Zwischen- und Endergebnissen	Rechenmaschine, Schreibmaschine	Ausgabe	Ausgabewerk	ausgangsseitige Verbindung zur Außenwelt, Ausgabe in maschinenlesbarer Form bzw. Klarschrift	Lochkartenstanzer, Lochstreifenstanzer, Schreibmaschine, Schnelldrucker
Auslösung von Rechenoperationen entsprechend vorgegebener Anweisung	Anweisung und durch den Menschen	Steuern	Steuer-(Leit-)Werk	automatische Steuerung des gesamten Verarbeitungsprozesses entsprechend dem Programm innerhalb der Rechenanlage und der peripheren Geräte	Netzwerk aus logischen Schaltungen
Übertragung von Informationen (Daten)	durch den Menschen	Übertragen			

Tabelle 7.8: Befehlsarten und Operationsarten

Befehlsart	Beispiel	Operationsart
Transportbefehl	Eingabebefehle, Ausgabebefehle, interne Transportbefehle	Übertragung von Informationen
Verarbeitungsbefehl	Rechenbefehle, logische Befehle, Verschiebungsbefehle, Rundungsbefehle	Verknüpfung von Informationen
Steuerbefehl	Sprungbefehle, Startbefehle, Stoppbefehle	Arbeitsablaufsteuerung

7.4.2. Aufbau einer EDVA

Das Gerätesystem einer EDVA wird in die Zentraleinheit und in die Geräte der Peripherie (Umgebung) unterteilt.
Der *Zentraleinheit* (ZE) obliegt die Verarbeitung der Daten. Sie führt arithmetische und logische Operationen aus und steuert den Zeitablauf für den internen und externen Datentransport nach vorgegebenen Programmen.
Die *peripheren Geräte* dienen der Erfassung, Übertragung, Speicherung, Ein- und Ausgabe von Daten und Programmen. Sie wandeln die unterschiedlichen Signale der äußeren Systeme bzw. Prozesse in die interne Signalstruktur der Zentraleinheit um.
Die Geräte der Peripherie lassen sich nach ihrer Stellung im Datenfluß unterteilen (Tabelle 7.9).

7.4.3. EDVA ES 1040

Das EDV-System ES 1040 ist ein universelles Datenverarbeitungssystem für den kommerziellen und wissenschaftlich-technischen Anwendungsbereich. Es umfaßt die EDVA ES 1040, die zum Einsatz notwendigen Betriebssysteme und eine Vielfalt von vorgefertigten problemorientierten Systemunterlagen.
Die EDVA ES 1040 besteht aus der Zentraleinheit ES 2640 und einer Reihe von peripheren Geräten (s. Tabelle 7.10 und Bild 7.7). Sie wird im Rahmen der internationalen Arbeitsteilung als EDVA im »Einheitlichen System der elektronischen Rechentechnik« (ESER) der sozialistischen Länder in der DDR produziert.

7.4.4. Einheitliches System der elektronischen Rechentechnik (ESER)

Zum Komplex der technischen Mittel des ESER gehören sieben Modelle, die in sozialistischer Gemeinschaftsarbeit durch die Länder des ESER-Abkommens arbeitsteilig entwickelt wurden und produziert werden. Das Gerätesystem der ESER-Familie besteht aus einer nach Größe und Leistungsfähigkeit abgestuften Reihe von Zentraleinheiten und einem abgestimmten Sortiment peripherer Geräte. In Tabelle 7.11 wird eine Übersicht über die ESER-Modelle gegeben. Charakteristische Merkmale des Einheitssystems sind

einheitliche konstruktive und technologische Grundkonzeption, Verwendung von integrierten Schaltkreisen,

unterschiedliche, abgestufte Leistungsparameter der Zentraleinheit und Peripherie,

Tabelle 7.9: Unterteilung der peripheren Geräte

Geräteart	Kennzeichen	Aufgabe
Geräte der 1. Peripherie	über Datenkanäle direkt mit der Zentraleinheit verbunden und von dieser gesteuert	Daten-Ein- und -Ausgabe, externe Speicherung
Geräte der 2. Peripherie	nur über maschinell auswertbare, transportable Datenträger mit der Zentraleinheit verbunden	Datenerfassung, Datenaufbereitung

Der Aufbau von Digitalrechnern ist im Bild 7.6 beschrieben.

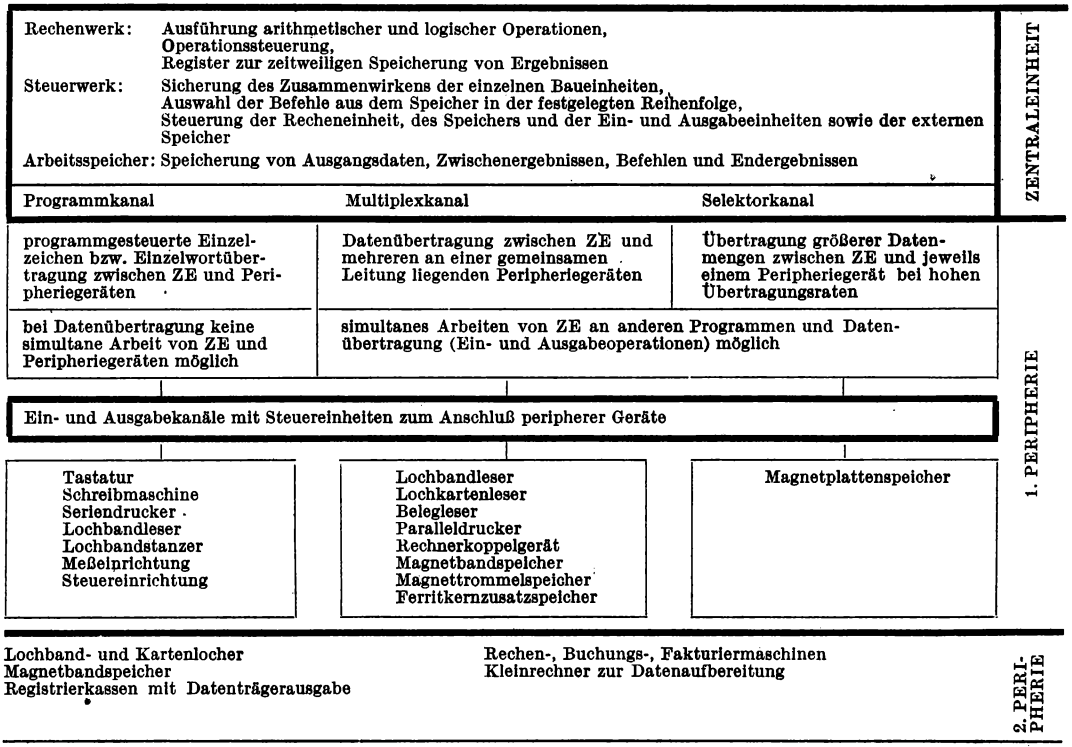


Bild 7.6. Aufbau moderner Digitalrechner

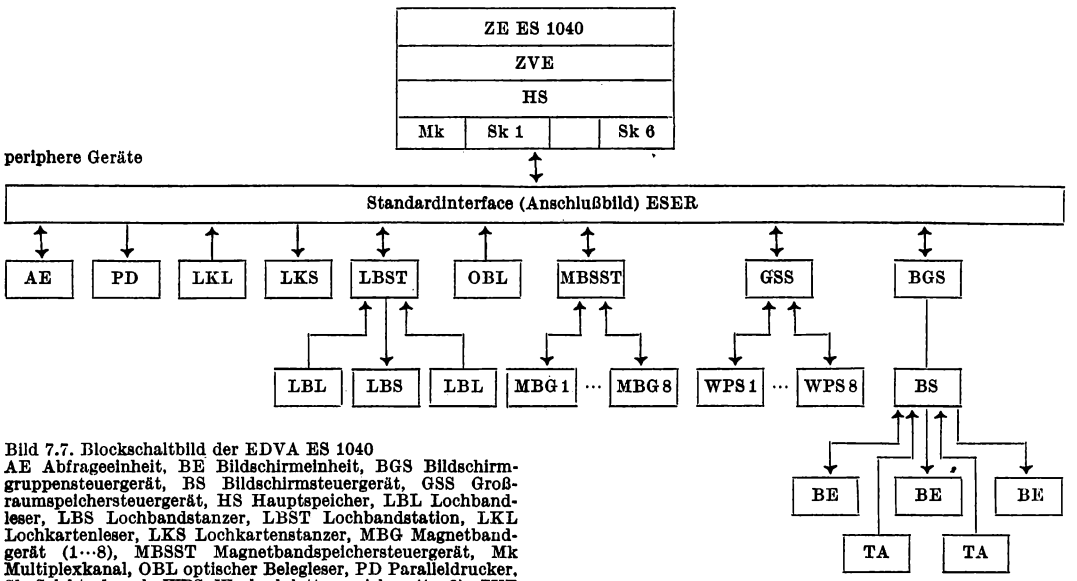


Bild 7.7. Blockschaltbild der EDVA ES 1040
AE Abfrageeinheit, BE Bildschirmeinheit, BGS Bildschirmgruppensteuergerät, BS Bildschirmsteuergerät, GSS Großraumspeichersteuergerät, HS Hauptspeicher, LBL Lochbandleser, LBS Lochbandstanzer, LBST Lochbandstation, LKL Lochkartenleser, LKS Lochkartenstanzer, MBG Magnetbandgerät (1···8), MBSST Magnetbandspeichersteuergerät, Mk Multiplexkanal, OBL optischer Belegleser, PD Paralleldrucker, Sk Selektorkanal, WPS Wechselplattenspeicher (1···8), ZVE zentrale Verarbeitungseinheit

Tabelle 7.10: Technische Daten der EDVA ES 1040 (Auswahl)[1])

Zentraleinheit	
Taktzyklus	450 ns
Operationsgeschwindigkeit	380000 Op/s
Hauptspeicher	Ferritkern
Kapazität	256, 512, 1024 K Byte
Zykluszeit	1350 ns
Zugriffszeit	450 ns
Befehlszeiten	Fest- Gleit-
	komma in µs
Addition	1,4 2,5
Multiplikation	8,2 13,1
Division	13,8 18,1
Befehlssystem	143 Befehle
Steuerung	Folge- und Mikroprogrammsteuerung
Kanaleinrichtungen	
Selektorkanäle	6 St.
Geschwindigkeit	300···1200 k Byte/s
anschließbare Gerätesteuereinheiten/ Selektorkanal	max. 10
Multiplexkanäle	1 St.
Geschwindigkeit (Multiplexbetrieb)	20···25 k Byte/s
Geschwindigkeit (Stoßbetrieb)	180···720 k Byte/s
anschließbare Gerätesteuereinheiten	max. 10

Ein- und Ausgabegeräte	
Abfrageeinheit (Schreibmaschine)	
Geschwindigkeit	10 Zeichen/s
Lochbandstation	
Lesegeschwindigkeit	1000 bzw. 2000 Zeichen/s
Stanzgeschwindigkeit	110 Zeichen/s
Paralleldrucker	
Druckleistung (normal)	600, 900 Zeilen/min
Druckleistung (nur numerisch)	1200, 1800 Zeilen/min
Magnetbandspeicher	
Bandgeschwindigkeit	2 m/s
Bandlänge	750 m
Bandbreite	1/2"
Aufzeichnungsdichte	32 bit/mm
Übertragungsgeschwindigkeit	64 k Byte/s
Wechselplattenspeicher	
Plattenstapel/WPS	1 St.
Drehzahl	2400 min^{-1}
Positionierzeit	20···80 ms
mittlere Zugriffszeit	62,5 ms
maximale Übertragungsgeschwindigkeit	312 k Byte/s
Platten/Stapel	11 St.
Speicherkapazität/Stapel	29 M Byte
Plattendurchmesser	380 mm

[1]) K = 2^{10} = 1024; k = 10^3 = 1000; M = 10^6; 1 Byte = 8 Informationsbit + 1 Prüfbit (ermöglicht die Darstellung eines Zeichens oder zweier Ziffern)

Tabelle 7.11: Übersicht über die wichtigsten ESER-Modelle und die EDVA ROBOTRON 21[1])

Größe	ES 1010	ES 1022	ES 1030	ES 1040	ES 1050	ROBOTRON 21
Operationsgeschwindigkeit in Op/s	10000	90000	100000	380000	500000	20000
*Hauptspeicher*kapazität in K Byte	8, 16, 32, 64	128, 256, 512	128, 256, 512	256, 512, 1024	256, 512, 1024	64
Zykluszeit in µs	0,8	2	2	1,35	1,25	0,87
Zugriffszeit in µs	0,44	1	0,80	0,45	0,95	0,52
Selektorkanäle						
Anzahl	1	2	3	6	6	1
Übertragungsgeschwindigkeit in k Byte/s	50···250	500	700	300···1200	1300	400
Multiplexkanal						
Anzahl der Subkanäle	4	48···128	128, 256	128···256	192 + 4	128
Übertragungsgeschwindigkeit (Multiplexbetrieb) in k Byte/s	40···100	80	40	20···25	30···110	13···20
Übertragungsgeschwindigkeit (Stoßbetrieb) in k Byte/s	40···300	400	200···300	180···720	100···180	250···400

[1]) Das ESER enthält außerdem die EDVA ES 1021 und ES 1060. Die EDVA ROBOTRON 21 gehört nicht zur Reihe der ESER-Modelle, ist jedoch zum ESER kompatibel.

unterschiedlicher Ausrüstungsgrad der EDVA je nach Leistung der Zentraleinheit und Anwendungsgebiet,

Anschlußmöglichkeit der gleichen peripheren Geräte an alle Zentraleinheiten auf Grundlage eines Standard-Interface (-Anschlußbild) und Einsatz selbständig arbeitender Kanaleinrichtungen,

Programmkompatibilität für alle Modelle (außer ES 1010),

Standardbefehlsliste für

einheitliches Betriebssystem zur kompatiblen Anwendung für die verschiedenen Modelle,

problemorientierte Programmsysteme.

7.5. Vorbereitung von Datenverarbeitungsaufgaben

Da ein Rechenautomat an arithmetischen Operationen nur die vier Grundrechenarten ausführen kann, muß jede Aufgabe auf solche einfachen Operationen zurückgeführt werden. Die *Arbeitsstufen der Vorbereitung von Aufgaben* für die EDVA lassen sich, wie in Tabelle 7.12 angegeben, darstellen.

Die *Problemstellung* umfaßt die textliche Darstellung der zu lösenden Aufgabe. Bei der *mathematischen Modellierung* erfolgt die Abbildung des verbal formulierten Problems durch eine mathematische Struktur (Formel, Gleichungssystem, Netzplan-

darstellung u. a.). Unter einem *Algorithmus* versteht man ein eindeutig bestimmtes Verfahren zur schrittweisen Lösung einer Klasse von Aufgaben.

Tabelle 7.12: Arbeitsstufen bei der Vorbereitung von Datenverarbeitungsaufgaben

Hauptarbeitsstufe	Problemanalyse	Programmierung	Nutzrechnung
Arbeitsstufe	Formulierung der Problemstellung	Programmablaufplanung	Vorbereitung der Eingangsdaten
	mathematische Modellierung	Programmaufstellung	Lösung der Aufgaben mit der EDVA
	Ausarbeiten von Algorithmen	Programmtestung	Auswertung der Ergebnisse

7.5.1. Flußtechnik

Der *Datenflußplan* ist eine grafische Darstellung der beim Ablauf einer Datenverarbeitungsaufgabe auftretenden wesentlichen Elemente (Datenträger, Arbeitsgänge, Datenflüsse u. a.) zur Veranschaulichung der vielfältigen Zusammenhänge. Die Ablaufelemente werden durch Sinnbilder mit vereinbarter Bedeutung vertreten. Es werden keine Einzelheiten des Ablaufs in den Arbeitsgängen angegeben. Jedem Arbeitsgang entspricht in der Regel ein in sich abgeschlossenes Programm. Der *Programmablaufplan* veranschaulicht den inneren Ablauf der Operationen in einem Arbeitsgang (*Programm*). Er enthält im wesentlichen Sinnbilder für Operationen und Programmlinien (Tabelle 7.13). Der Programmablaufplan stellt eine *Verbindung zwischen dem mathematischen Verfahren und dem Maschinenprogramm* dar. Anschließend erfolgt die Umwandlung der in ihm enthaltenen Anweisungen in *Maschinenbefehle* (*Programmierung*).

Tabelle 7.13: Sinnbilder für Datenflußpläne und Programmablaufpläne (nach TGL 22451)

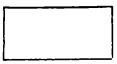
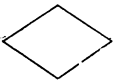
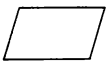
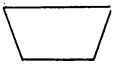
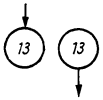
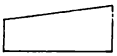
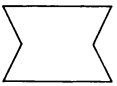
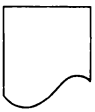
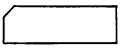
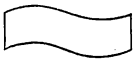
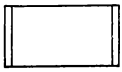
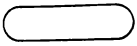
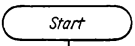
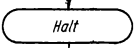
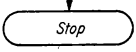
Symbol	Bedeutung
Allgemeine Sinnbilder	
	Bearbeiten/Operation
	Verzweigen/Verzweigung
	Eingabe oder Ausgabe/Datenträger
	manuelles Eingreifen/manuelle Operation
	Konnektor (für Unterbrechung und Fortsetzung von Flußlinien)
	Flußlinie

Tabelle 7.13 (Fortsetzung)

Symbol	Bedeutung
Ergänzende Sinnbilder für Datenflußpläne	
	manuelles Eingeben
	manuelles Beschriften eines Beleges
	Tabelle, Druckliste (maschinell beschriftet)
	Lochkarte
	Lochband
	Magnetband
	Magnettrommel
	Magnetplatte
	Kernspeicher
	Anzeige (Display)
Ergänzende Sinnbilder für Programmablaufpläne	
	Unterprogramm
	Grenzstelle
	Beginn
	Zwischenaufenthalt
	Ende

7.5.2. Elemente der Programmierung

Eine elektronische Datenverarbeitungsanlage nimmt nur Befehle in der *Sprache der binären Logik* in Empfang. Deshalb ist die *Übersetzung von der Umgangssprache in die Maschinensprache* erforderlich.

Ein *Programm* für eine programmgesteuerte Rechenanlage ist die Arbeitsvorschrift, die die eindeutige und geordnete Zusammenstellung aller Befehle für die Lösung einer Aufgabe enthält. Unter *Programmierung* versteht man das Übertragen einer Problemlösung, dargestellt als *Programmablaufplan*, in die *Maschinensprache* oder in eine maschinell verarbeitbare *Programmiersprache*.
Die direkte Programmierung in die Maschinensprache erfordert einen hohen Aufwand und ist verbunden mit einer großen Fehlerwahrscheinlichkeit. Zur Vereinfachung und Rationalisierung der Programmierung sind die folgenden *Stufen* entwickelt worden:

universelle Nutzung von *Unterprogrammen* in Form von sog. Programmbibliotheken für spezielle Anlagentypen,
Einführung von *symbolischen Programmiersprachen* (maschinenorientiert),
Entwicklung von *problemorientierten Programmiersprachen* (maschinenunabhängig).

Die Maschinensprache enthält die Mannigfaltigkeit der verfügbaren Befehle einer EDVA (Maschinenbefehle). Sie ist also maschinenabhängig.
Eine Programmiersprache ist eine künstliche Sprache, die einen definierten Satz von Symbolen und Regeln enthält und zur Formulierung von Programmen dient. Außer der Maschinensprache muß jede andere Sprache vor der Verarbeitung in der EDVA übersetzt werden.

Übersetzungsprogramme dienen zur Übertragung der symbolisch codierten Informationen in die Maschinensprache.

Assembler sind Übersetzer einer maschinenorientierten Sprache in die Maschinensprache,

Compiler sind Übersetzer einer problemorientierten Sprache in die Maschinensprache.

7.5.3. Systemunterlagen

Die grundlegenden Bestandteile eines Datenverarbeitungssystems sind

1. Gerätetechnik
2. Systemunterlagen

Angaben über Systemunterlagen sind in Tabelle 7.14 enthalten.

Tabelle 7.14: Systemunterlagen

Systemunterlagen	Anwendung
Maschinenorientierte Systemunterlagen	
(Programme für die Bedienung und Nutzung der EDVA und die Realisierung komplexer Arbeitsabläufe in der Anlage, Betriebssystem)	
Zentrale Steuerprogramme u. a.	automatische Steuerung des Übergangs zu nacheinander auszuführenden Verarbeitungsprogrammen, automatische Steuerung zwischen simultan abzuarbeitenden Programmen, Verwalten und Bearbeiten der Datenbänke, Teilnehmerrechnersystem
Systemprogramme	nur in Verbindung mit dem zentralen Steuerprogramm, Programme zur Informationsübertragung zwischen den Ein- bzw. Ausgabegeräten, Standardprogramme für das Arbeiten mit den externen Speichern, Wartungsprogramme für Fehlerdiagnostik
Sprachumwandler	Assembler Compiler

Tabelle 7.14 (Fortsetzung)

Systemunterlagen	Anwendung
Problemorientierte Systemunterlagen (anwendungsbezogen)	
Mathematische Programme	für elementare Funktionen, für die Lösung von Gleichungssystemen, für das Lösen von Differentialgleichungen
Ökonomische Programme	lineare Optimierung, Netzwerktechnik, Transportoptimierung
Bausteine für EDV-Systeme	Losgrößenbestimmung, Kapazitätsbestimmung, Nettolohnberechnung
Typenprojekte für integrierte Datenverarbeitungssysteme	vollständige organisatorische und programmtechnische Unterlagen

7.6. Aufgaben, Eigenschaften und Merkmale von Prozeßrechenanlagen

7.6.1. Merkmale und Aufgaben

Prozeßrechenanlagen sind Systeme zur Überwachung und Führung von Prozessen in industriellen und nichtindustriellen Bereichen. Ein *Prozeß* ist dabei jeder Vorgang zur Erzeugung, Wandlung und Verteilung von Stoffen, Energie und Informationen (Tabelle 7.15).

Tabelle 7.15: Grundaufgaben eines Prozeßrechners

Aufgabe	Erläuterung
Meßwerterfassung	automatisch programmierte Übernahme von Meßwerten in analoger und digitaler Form oder als Impulsfolgen
Meßwertverarbeitung	Meßwertaufbereitung Meßwertkorrektur, Filterung, Linearisierung, Mittelwertbildung, Integration Meßwertüberwachung Grenz- und Tendenzwertüberwachung, Ausgabe von Störungsprotokollen Bilanzierung und Kenngrößenberechnung, Ausgabe von Betriebsprotokollen Datenausgabe für Weiterverarbeitung auf anderen Rechnern
Prozeßsteuerung	Berechnung und Ausgabe von Steuerwerten für Ablauf- und Zeitplansteuerung, An- und Abfahrsteuerungen von Teil- und Gesamtprozessen, optimale Prozeßführung, Sollwertführung konventioneller Regeleinrichtungen, direkte digitale Steuerung (DDC)

Die wesentlichen *Merkmale von Prozeßrechenanlagen* sind:
Überwachung, Optimierung und Steuerung von Prozessen mit hoher Qualität und Effektivität,
schritthaltende Aufnahme und Verarbeitung der Informationen vom Prozeß und unmittelbare Ableitung von Steuerinformationen (sog. *Echtzeitverarbeitung*),
Gewährleistung eines umfassenden Überblicks über den ablaufenden Prozeß,
direkte Rückwirkung auf den Prozeß,
Wegfall von Primärdatenträgern.

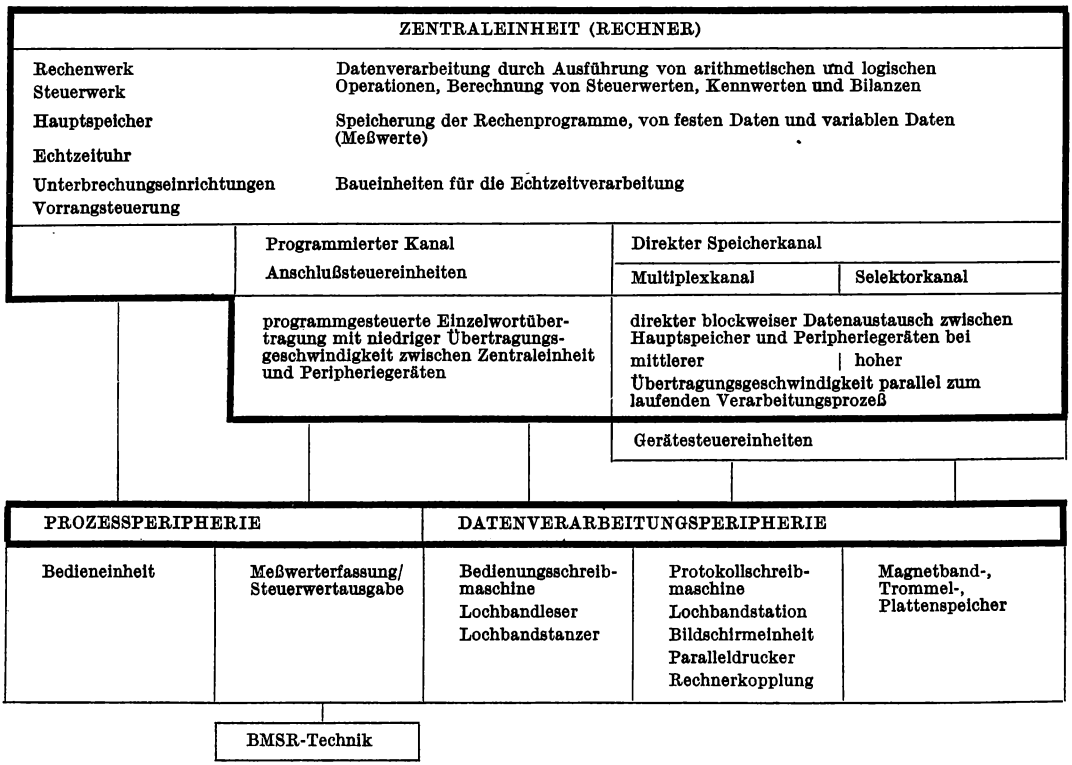


Bild 7.8. Aufbau moderner Prozeßrechner

Moderne Prozeßrechenanlagen müssen folgenden *Anforderungen* genügen:

freie Programmierbarkeit,
leistungsstarkes Programmunterbrechungssystem für Echtzeitbetrieb,
hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit,
Wortlänge 12···24 bit,
Hauptspeicherkapazität 4···64 K Worte (1 K = 1024),
Rechengeschwindigkeit 10^4···10^6 Op/s,
umfangreiche Prozeßperipherie (300···1000 analoge und digitale Eingänge),
aufrüstbares, modulares Baukastensystem,
Widerstandsfähigkeit gegenüber rauheren Umweltbedingungen,
Arbeitsfähigkeit in einem größeren Temperatur- und Feuchtigkeitsbereich.

7.6.2. Aufbau und Arbeitsweise von Prozeßrechnern

Der prinzipielle *Aufbau* moderner Prozeßrechner ist im Bild 7.8 dargestellt. Den Grundbaustein der Anlage stellt die Zentraleinheit dar. Sie arbeitet nach den allgemeinen bei Digitalrechnern bekannten Funktionsprinzipien. Im Gegensatz zur EDVA ist ein Prozeßrechner neben einem reichlichen Sortiment von Geräten zur Datenverarbeitung (DV-Peripherie) mit einer leistungsstarken *Prozeßperipherie* ausgestattet.
Prozeßrechner arbeiten in der Regel im *Echtzeitbetrieb*, d. h., die für die Führung des Prozesses erforderlichen Informationen werden zur Zeit ihrer Entstehung erfaßt und schritthaltend verarbeitet. Die freie Programmierbarkeit ermöglicht jede beliebige Verknüpfung der Meßgrößen. Die Koordinierung und der Ablauf der einzelnen Teilprogramme werden durch ein programmtechnisches Operationssystem (*Betriebssystem*) gesteuert, dessen Kernstück das *Programmunterbrechungssystem* bildet.

Die unmittelbare Ankopplung eines Prozeßrechners an den jeweiligen Prozeß (Meßwertüberwachung, automatische Prozeßsteuerung) bedingt eine spezifische Programmgestaltung (Tabelle 7.16). Im Normalbetrieb erfolgt die Abarbeitung der unterschiedlichen Programmteile zu fest vorgegebenen Zeitpunkten (Echtzeituhr) und die Bereitstellung von Meßwerten mit Zeitangaben.

Tabelle 7.16: Systemunterlagen für Prozeßrechner

Systemunterlagen	Anwendung
Maschinenorientierte Systemunterlagen (MOS)/Betriebssysteme	
Steuerprogrammsysteme	Echtzeitsteuerprogrammsysteme (kernspeicherorientiert bzw. plattenspeicherorientiert)
	Programmroutinen für Aufgabenplanung und Steuerung, Speicherzuweisung, Ein- und Ausgabeorganisation einschl. Rechnerkopplung, Fehlererkennung und -behandlung
Systemprogramme	Übersetzungsprogramme für maschinen- und problemorientierte Sprachen
	Dienstprogramme zum Laden, zum Testen, zur Lochbandaufbereitung, zum Inbetriebnehmen
Standardprogramme	Konvertierungsprogramme Arithmetikprogramme Standardfunktionen mathematische Standardprogramme

Tabelle 7.16 (Fortsetzung)

Systemunterlagen	Anwendung
Problemorientierte Systemunterlagen (POS)	
Standard-programme	mathematische Standardprogramme Prozeßsteuerung ökonomische Berechnungen
Übersetzungs-programme	für problemorientierte Echtzeit-programmiersprachen
Bibliothek der Teilsysteme	zentrale Prozeduren Primärdatenverarbeitung direkte digitale Regelung statische Prozeßanalyse und Optimierung Simulation numerische Steuerung Fertigungsüberwachung wissenschaftliche und ökonomische Berechnungen

Für die Beseitigung von kritischen Prozeßzuständen (Störungen, Überschreitung von Grenzwerten, Havarien) sind *Unterbrechungseinrichtungen*, verbunden mit einem *System der Vorrangsteuerung* (für den Fall des Auftretens mehrerer Unterbrechungsursachen), vorgesehen, die die Abarbeitung eines entsprechenden Programmes veranlassen, um die Beherrschung des Prozesses zu sichern.
Typischer Vertreter einer universellen Prozeßrechenanlage ist das unter der Bezeichnung PRS 4000 im Kombinat VEB Robotron gefertigte Prozeßrechensystem (Bild 7.9), das neben dem Kleinrechnersystem KRS 4200 aus den Komponenten der Rechnerfamilie 4000 (Tabelle 7.17) gebildet wird.

7.6.3. Prozeßein- und -ausgabe

Die Kommunikation mit den äußeren Prozessen erfolgt über die Prozeßperipherie, deren Hauptteil die *Prozeßein- und -ausgabeeinrichtung* ist und durch die die vielfältigen Funktionen der Meßwerterfassung und der Steuerwertausgabe realisiert werden.

Als Beispiel ist das Blockschaltbild einer *Meßwerterfassungseinheit* mit ihren wesentlichen Baugruppen im Bild 7.10 dargestellt. Eine analoge Struktur besitzt eine Steuerwertausgabeeinheit.
Die wichtigsten *Merkmale* einer vollständigen Prozeßein- und -ausgabeeinrichtung sind in Tabelle 7.18 zusammengestellt. Über sie können die üblichen Meß-, Steuer- und Regeleinrichtungen (Stellglieder, Transmitter, Meßfühler usw.) an den Prozeßrechner angeschlossen werden.

7.7. Betriebsarten und Einsatz von Prozeßrechenanlagen

7.7.1. Betriebsarten

In Abhängigkeit von den verschiedenartigen Aufgaben, die mit Hilfe eines Prozeßrechners gelöst werden sollen, erfolgt eine unterschiedliche Kopplung des Prozeßrechners an den Prozeß. Tabelle 7.19 veranschaulicht die typischen Merkmale der verschiedenen Betriebsarten des Prozeßrechnereinsatzes.
Der beiderseits prozeßgekoppelte Betrieb als höchste Form der Automatisierung mittels Prozeßrechner stellt extrem hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit sämtlicher Komponenten der Prozeßrechenanlage.

7.7.2. Einsatzkomplexe

Prozeßrechner finden in allen gesellschaftlichen Bereichen — industriellen und nichtindustriellen — eine wachsende Anwendung. Sie realisieren im Rahmen der komplexen sozialistischen Automatisierung die objektiv notwendige Intensivierung auf dem Teilprozeß der Informationsverarbeitung. Die Breite der Einsatzmöglichkeiten von Prozeßrechenanlagen zur Überwachung und Steuerung ist in Tabelle 7.20 anhand von Beispielen angedeutet.

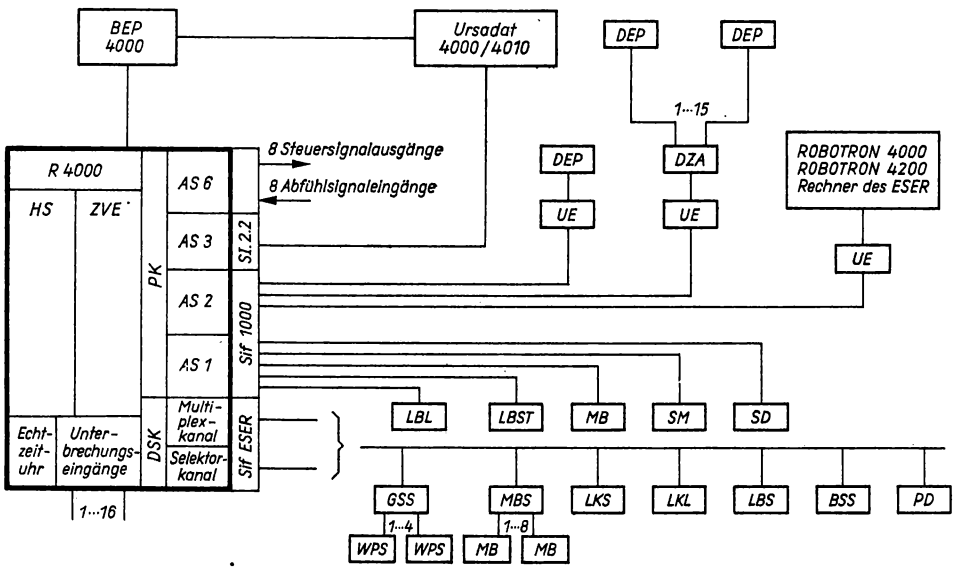


Bild 7.9. Anschlußmöglichkeiten des Prozeßrechensystems PRS 4000
AS Anschlußsteuerung, BEP Bedieneinheit Prozeßrechner, BSS Bildschirmsystem, DEP Datenerfassungsplatz, DSK direkter Speicherkanal, DZA dezentrale Abfrageeinheit, GSS Großraumspeichersteuergerät, HS Hauptspeicher, LBL Lochbandleser, LBS Lochbandstanzer, LBST Lochbandstation, LKL Lochkartenleser, LKS Lochkartenstanzer, MB Magnetbandgerät, MBS Magnetbandsteuergerät, PD Paralleldrucker, PK programmierter Kanal, SD Seriendrucker, Sif Standardinterface, SM Schreibmaschine, UE Übertragungseinrichtung, WPS Wechselplattenspeicher, ZVE zentrale Verarbeitungseinheit

Tabelle 7.17: Technische Daten der Rechnerfamilie 4000 (Auswahl)

Kenngröße	ROBOTRON 4000	ROBOTRON 4200	ROBOTRON 4201
Einsatz als Zentrale Verarbeitungseinheit	PRS	KRS	KRS
Wortlänge in bit	16	16	
Anzahl der Befehle	96	53	
Zykluszeit in µs	1,1	1,3	
Operationsgeschwindigkeit in Op/s	426000	74000	
Operationszeiten in µs			
Addition	2,2	2,6	
Multiplikation	10,5	200	
Unterbrechungskanäle			
extern	18	18	
intern	4	2	
Hauptspeicher	Ferritkern	Ferritkern	
Zykluszeit in µs	0,9	1,3	
Zugriffszeit in ns	440	450	
Kapazität in K Worte	16, 32	8, 16	
Betriebsarten der Ein- und Ausgabekanäle			
programmierter Kanal max. anschließbare Anschlußsteuereinheiten	11	3···4	16
direkter Speicherkanal	1 Selektorkanal und 1 Multiplexkanal mit je 8 Subkanälen	für 1 GSE	für 3 GSE
Stellung zum ESER	nicht im ESER	nicht im ESER	entspricht den ESER-Bedingungen

Tabelle 7.18: Merkmale einer Prozeßein- und -ausgabeeinrichtung

Meßobjekt	Eingabe	Ausgabe	Steuerobjekt
	digital	digital	
Zyklische Abfrage digitaler Meßeinrichtungen, Meldungen von Endschaltern, Relaiskontakten, Drehschaltern u. ä.	statisch	statisch	Ausgabe von digitalen und binären Steuerwerten; Ansteuerung von digitalen Sollwertstationen, Lampen, Relais sowie Ziffernanzeigen, Drucksteuerungen usw.
Nichtzyklisches Abfragen von Kontaktschaltungen und Meldeeinrichtungen nach Auftreten eines PU-Signals	statisch mit Programmunterbrechungssignal	dynamisch	Ansteuerung von Schrittschaltwerken, zur Löschung von Selbsthalteschaltungen; Bildung von Einzelimpulsen
Erfassen von Zählimpulsen geringer Folgefrequenz, Speicherung impulsförmiger Signale, Verdichtung von PU-Signalen (Alarmsignal)	dynamisch mit Programmunterbrechungssignal	Ziffernanzeige	optische Ausgabe digitaler Informationen in Ziffern- und Symboldarstellung
Aufsummieren der Impulse externer Geber (z. B. Stückgutzähler)	Impulszähler	inkremental	Ansteuerung von Servomotoren in Leitgeräten für die rechnergeführte Regelung
Aufsummieren von Impulsen von Wäge- und Durchflußmeßgeräten bei Misch- und Dosierproblemen; Abgabe eines PU-Signals bei Erreichen der Vorwahl	Vorwahlzähler		
	analog	analog	
Erfassung analoger Spannungs- und Stromsignale unterschiedlichen Pegels (z. B. Temperatur-, Stellungs- und Durchflußwerte)	Relaisdurchschaltung (≈ 150 Meßstellen/s)		Ausgabe analog weiterverarbeiteter Signale unterschiedlicher Genauigkeit; Übertragung von Steuerwerten auf Anzeigegeräte (Registrierung) oder direkt auf Regler und Stellglieder
	elektronische Durchschaltung (≈ 5000 Meßstellen/s)		

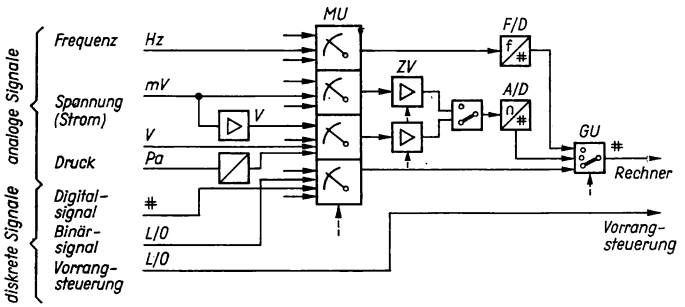


Bild 7.10. Blockschaltbild einer Meßwerterfassungseinheit
MU Meßstellenumschalter, ZV Zentralverstärker, GU Gruppenumschalter, A/D Analog-Digital Umsetzer, F/D Frequenz-Digital-Umsetzer

Tabelle 7.19: Betriebsarten von Prozeßrechnern

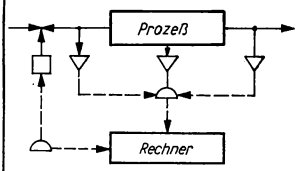
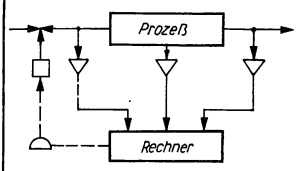
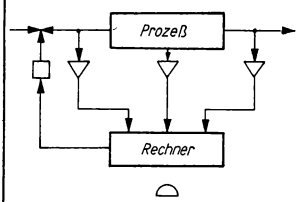
Betriebsart	Prozeßparalleler Betrieb	Prozeßgekoppelter Betrieb	
		einseitig prozeßgekoppelt (offener Wirkungskreis)	beiderseitig prozeßgekoppelt (geschlossener Wirkungskreis)
Merkmal	keine direkte Prozeßverbindung	einseitige, meist eingangsseitige, direkte Prozeßkopplung	beiderseitige, direkte Prozeßkopplung
Schema Zeichenerklärung: ▽ Meßeinrichtung □ Stellorgan ⌓ Mensch —— gerätetechnische Verbindung - - - Verbindung über den Menschen			
Eingabe von Meßwerten	manuelle Protokollierung der Meßwerte; Eingabe von Hand oder Herstellung maschinenlesbarer Datenträger automatische Ausgabe maschinenlesbarer Datenträger	direkte Eingabe der Werte von der Meßeinrichtung in den Rechner; zusätzliche Anzeige und Protokollierung möglich	direkte Eingabe der Werte von der Meßeinrichtung in den Rechner; zusätzliche Anzeige und Protokollierung möglich
Ausgabe von Steuerinformationen und Protokollen	keine zeitechten Steuerinformationen und Protokolle	Ausgabe zeitechter Protokolle und Steuerinformationen auf Schreibmaschine	Ausgabe zeitechter Protokolle; zeitechte Übergabe der Steuerinformationen an die Stellorgane
Stellung des Menschen	Tätigkeit mit Handeingabe in Rechner und Stellorgane	Entlastung von Routinearbeiten; manuelle Prozeßführung (Handeingabe) nach kritischer Beurteilung der Steuerinformationen	Entlastung von Routinearbeiten; Überwachungsfunktionen
Einsatzmöglichkeiten	Programmtest Prozeßanalyse Modellierung Optimierung stationär verlaufender Prozesse in großen Zeitabständen	Meßwerterfassung Meßwertverarbeitung Prozeßüberwachung Bilanzierung Optimierung	zusätzlich zum offenen Kreis: Stabilisierung und Sicherung des Prozeßverlaufes Übernahme von Reglerfunktionen Optimierung von Übergangszuständen

Tabelle 7.20: Beispiele für den Einsatz von Prozeßrechenanlagen

Einsatzgebiet	Einsatzbeispiel	
Produktionsbetriebe	Fließprozesse	*Chargenprozeß:* chemische, Glas-, Textil-, Keramik-, Zement-, Papierindustrie, Metallurgie u. a. *Kontinuierliche Prozesse:* Erdölindustrie, Metallurgie (Walzwerke)
	Stückgutprozesse	Metallverarbeitende Industrie (Teilefertigung, Montage, Prüfung, Lagerhaltung) Elektrotechnik/Elektronik (Leiterplattenprüfung, Bauelementeproduktion)
Energiewesen	Erzeugung	Kraftwerksblöcke, Kernreaktoren, Pumpspeicherwerke
	Verteilung	Dispatcherzentralen, Fernübertragungsanlagen für Elektroenergie, Gas und Wärme
Verkehrswesen	Eisenbahn	Rangierbetrieb, Streckenüberwachung, Auskunfts- und Buchungssysteme
	Straßenverkehr	Verkehrsablauf, Verkehrsregelung
	Schiffahrt	Steuerung und Navigation, Ladeorganisation
Landwirtschaft	Kraftfutterwerke, Lagerhaltung	
Gesundheitswesen	Patientenüberwachung, Diagnostikhilfe, Patientendokumentation	
Forschung und Entwicklung	Automatisierung von Labor-, Meß- und Prüfprozessen, Automatisierung der Versuchsdurchführung auf technischen, medizinischen, biokybernetischen, kernphysikalischen u. ä. Gebieten	

Sachwortverzeichnis

Abgleichkern 206
Ablaufsteuerung 232
Ablesefehler 244
Abnehmeranlagen 380f.
Abschaltfaktor k 388
Abscherspannungen 61
Absorptionsmesser 235
Abspannisolatoren 341
Achshöhen 271
Addieren 12f., 25
Addierer 180
Additionstheorie 22
Additivtechnik 220
Aderleitungen 408
Äquivalente, elektrochemische 50
AFC 466
Akkumulator 227
–, ortsfest 228
–, tragbar 228
– für Fahrzeuge 228
Akkumulatorenanlagen 231
aktive Geber 249f.
Akustik 55
Akzeptor 134
Algebra 12ff.
– einer zweiwertigen Logik 489
Algorithmus 496
All|gebrauchslampen 415
–strommotoren, Anschlußbezeichnungen 267
Alphabet, deutsches 11
–, griechisches 11
–, russisches 11
alphamerische Daten 488
alphanumerische Daten 488
Aluminium 83
–, Lote 85
AM-Empfangsteil von Hör-Rundfunkempfängern, Kenngrößen 445
Aminoplaste 88
Ampere 52
analoge integrierte Schaltkreise 178ff.
– – –, Grundschaltungen 180f.
– – –, Kenngrößen 179
– – –, Schaltungstechnik 179
analytische Geometrie 23f.
Anion 130, 133
Ankerwicklungen 279
Anlasser 297, 434
– mit verschiebbarem Anker 434
Anodenfall 134
Anpassung 142
Anschluß an Energieversorgungsanlage 380
–bezeichnungen 267
–plan 125, 128
–schaltung 483
Ansichten 74
Antennen 447
Antriebe 297ff.
Anzapfungen 304
Anzeigeröhren, Typenschlüssel 176
Arbeit, elektrische 67
– und Leistung 59
Arbeits|gang 373ff.
–punkt von Starkstrom- und Informationsstromkreisen 141
arithmetische Operationen 25
Armaturen 340ff., 432
Assembler 497
astabiler Multivibrator 181
Asynchron|generator 264
–maschinen 264
Asynchronmotor 264
Atommassen, relative 49
Auf|fangeinrichtungen 430
–lagerkräfte 62
–putz-Installation 400
Ausbreitungswiderstand 312
Ausfall 226
–abstand, mittlerer 226
–arten 227
–raten bei Bauelementen 227
– – – integrierten Schaltungen 227
Ausgabegeräte von EDVA 495
Ausgangsübertrager 310
Ausgleichswandler 309
Aushänge in Starkstromanlagen 379f.
Auslöser 253ff.
Auslösewandler 309
Ausschaltung 125
Ausschaltvorgang bei Thyristoren 160
Außenanlagen 355f., 378f.
Außenleiter 312
Außenpolmaschine 264
Aussetzbetrieb 312
Ausstattungsgrad von Rundfunkempfängern 446
automatische Wählvermittlung 474
Automatisierungs|systeme 242
–technik 232ff.

Backwarddioden 149
Badlötung 225
Band|breite 210, 212
–filter 212
–leitung 455
–paß 213
–sperre 213
Basismaterial für Leiterplatten 218
Batterie 227
–kapazität 228
–schutz 437
Batterien für Fahrzeuge 230
– – Kraftfahrzeuge 230f.
– – Zugbeleuchtung 230
Bau|formen elektrischer Maschinen 267
–glieder 238
–schaltplan 125, 128
–schlackenwolle 67
–stahl 93
– –, Kennzeichnung 93
– –, mechanische Eigenschaften 93
–statik 61ff.
–teilanschluß 222
Bedienungs|gang 312, 373ff.
–komfort 466
Befehl 492
Befestigungsgewinde 103
Beharrungs|temperatur 312
–zustand 232
Belastbarkeit von Stromschienen 369ff.
Belegungsplan 125, 129
Beleuchtung geschlossener Räume 421
Beleuchtungs|anlage 421, 434
–stärke 412, 419
–technik 418
–wirkungsgrad 412, 420
Bemessung der Kabel 328ff.
– von Schaltanlagen 365ff.
Berechnungsmengen von Material 61
Berührungs|schaltautomatik 467
–schutz 312, 337, 375ff., 382ff.
–spannung 312, 383
Beschleunigungsmessung 249
Betonmaste 342
Betreiben elektrischer Anlagen 312, 395
Betriebs|erdung 312
–raum 312
–spannung 312
bewegliche Leitung 312
Bewegungsgewinde 103
Bezugserde 312
Biege|beanspruchung 62
–moment 62
–radien 326f., 336
–spannungen 61
Bildwiedergaberöhren 173
–, Leuchtstoffkennzeichnung 174
–, Typenschlüssel 174
Bimetallauslöser 260
Binärcode 490
Bit 488
Blatt|größe 71
–schreiber 481
Blei 94
–, Anwendung 94
–, Sorten 94
–, Zusammensetzung 94
–akkumulator 228f.
Blendung 413
Blendungsfreiheit 419
Blind|arbeitszähler 246
–leistung 137
–leistungs|kompensation 140, 364f.
– –maschine 264
–strom 68
–widerstand 68
Blitzschutz 342
–anlagen 312, 342, 429ff.
– –, Ableiteinrichtungen 431
– –, Armaturen 432
– –, Auffangeinrichtungen 431
– –, Erdungseinrichtungen 431f.
– –, Prüfung 432
–klassen 430
–maßnahmen 430
Bodenwelle 442
Bogen|entladung 175
–maße 78
Breitband|drossel 206
–quarzfilter 217
Bremslichtkontrolle 436
Brenndauer 413
Bruchrechnung 12f.
Brücken|schaltung 157, 248
–stabilisierung 157
Bürstenhalter 275ff.
Byte 495

Candela 54f., 412
CCIR-Fernsehübertragung 456
Chemie 47f.
chemische Benennung von technisch wichtigen Stoffen 49f.
– Elemente 47ff.
Codierung 490
Compiler 497
Compoundgenerator 283

Daten 488
–, alphamerische 488
–, alphanumerische 488
–, numerische 488
–arten 488
–bereitstellung 489
–erfassung 489
–flußplan 496
–träger 490f.

Datenübertragung 485
Dauer|betrieb 312
—kurzschlußstrom 312
DDR-Standard 69
Defektelektron 134
Dehnungs|messung 235
—meßstreifen 235, 251
Dekoder 447
Demodulator 447
deutsches Alphabet 11
Diagonalkreuz 77
diamagnetisch 143
Dichte 60f., 132
— einiger Stoffe 60f.
Differential|flaschenzug 58
—spule 234
—transformator 234
Differentiator 180
Differenzverstärker 168f., 180
digitale Schaltkreise 183ff.
— —, Gehäusearten 184
— —, Grundtechnologien 183, 185
— —, Integrationsgrad 184
— —, Kennzeichnung 184
Digitalrechner 494
Dioden 146ff., 224
—, Schleusenspannung 146
—, Typenschlüssel 146
—, Widerstandsgrößen 146
—buchsen 453
—übersicht 147
Dipolantennen 454
direkte Datenerfassung 490
Dividieren 12f., 17, 26
Donator 134
Doppel|frequenzmesser 286
—käfigläufer 289
—kranmotor 290
—spannungsmesser 286
—stromtastung 483
—zellenschalter 228
Draht|drehwiderstände 194
—widerstand 191f.
Drain 168
Dreh|ankersystem 487
—beanspruchung 62
—eisenmeßgerät 245
—feld an Drehstromsteckdosen 374
— —-Induktionsmotor 288
—kondensatoren 204
—moment 61
—momente, zulässige 63f.
—motoren 68
—nummernschalter 473f.
—richtungsumkehr 140
—spulmeßgerät 245
—strom 69, 140, 284
— —antriebe 240
— —-Asynchronmotor 288
— —-Einheitsmotoren 295f.
— —generator 285
— —-Kommutatormotor 292
— —lichtmaschine 433
— —linearmotor 293
— —motor, Anschluß 294
— —-Nebenschluß|-Kommutator-motoren 264
— — - —motor 293
— —-Öltransformator 306f.
— —steller 297
— —umrichter 298
—transformator 305
—wähler 476f.
—zahlmessung 235, 249
Drei|eck, rechtwinkliges 21f.
— —, schiefwinkliges 22
—ecke, Berechnungen 22
—eckschaltung 68ff., 141
—phasen|sätze 208
— —strom 69f.
Druck|beanspruchung 62
—messung 250
—spannungen 61
Dual|system 24ff.
—zahlen 25
Durchbiegung 62
Durch|bruchspannung 158
—gangsleistung 302
—hang 312, 339f.
—hangsberechnung 339f.
—laß|kennlinie 159
— —spannung 159
— —strom 159
—laufbetrieb 312
—messer 76
—schaltzeit 159
Dynamo|blech 94, 302
—bleche 278
dynamoelektrisches Prinzip 281

Echtzeitverarbeitung 498
EDVA ES 1040 493f.
Effektivwert 138
Effektkohle 417
Eigenleitfähigkeit 134
Einankerumformer 299
Einbau|bedingungen für Kondensatoren 226
—hinweise für elektronische Bauteile 222ff.
Einfach|stabilisierung 157
—stromtastung 483
Eingabegeräte von EDVA 495
Eingangsübertrager 310
Einheiten 51ff.
—, Beziehungen 56
—, Umrechnungsfaktoren 56ff.
—, Vorsätze 51
— physikalischer Größen 51ff.
—system, Internationales 51ff.
Einlagenleiterplatte 226
Einphasen|-Induktionsmotor 291
— -Kommutatormotor 291
—motoren 68
—strom 68
Einsatzbedingungen von Geräten 262ff.
Einschalt|strom 312
—vorgang bei Thyristoren 159
einstellbare Drahtwiderstände 192
Einzelkompensation 140
Eisenverluste 302
E-Kern 311
Elastizität 61
elektrische Arbeit 67, 137f.
— Leistung 67ff., 137
— Maschinen, rotierende 263ff.
— Meßgeräte 243
— —, Klassen 244
— —, Prüfspannungen 244
— Uhrenanlage 485f.
elektrischer Leitwert 67
— Strom 130
— Widerstand, spezifischer 67, 69
elektrisches Messen nichtelektrischer Größen 249ff.
Elektrizität 52f., 130
elektrochemische Äquivalente 50
— Spannung 130
— Spannungsquellen 227ff.
Elektrodenheizung 422
elektrodynamischer Geber 249
Elektrolyt 133
—kondensatoren 202f., 226
elektrolytische Spannungsquelle 130
elektro|magnetische Induktion 144f.
—mechanische Filter 217
Elektromotoren 287ff.
Elektron 130
Elektronen|leiter 132
—leitung 133
—röhren 171ff.
— —, Elektroden 171
— —, Ersatzschaltbilder 172
— —, Kenngrößen 172
— —, Kennlinien 172
— —, Schaltungstechnik 172f.
— —, Spezialröhren 173ff.
elektronische Bauteile 222
— Datenverarbeitung 488, 493
Elektroschweißen 426ff.
elektrostatischer Geber 249
Elektrostriktion 132
Elektrotechnik 67ff.
elektrotechnische Anlagen 312ff.
— —, Begriffe 312ff.
— —, Geräteeinsatz 262
— — für Kfz 432ff.
— Bauelemente 146ff.
— Betriebsmittel 312
— Geräte und Maschinen 243ff.
elektrothermische Relais 476
Elektrowärmeanlagen 421ff.
Elementarladung 130
Elemente, chemische 47ff.
Empfänger|abgleich 448
—klassifizierung 445
—rauschen 449
—röhren, Typenschlüssel 171
—technik (Super) 444
Empfangsvorgang 481
Empfindlichkeit 444
Entlade|charakteristik 229
—schlußspannung 228
—spannungsverlauf 229
—vorgang 228
Entladung, selbständig 133
—, unselbständig 133
Entladungslampe 417
Epoxidharz 88
Erden 312, 374f., 395f.
Erd|kabel-Installation 407
—schluß 312
— —spule 209
—seil 312
Erdung 342, 390ff.
Erdungs|anlagen 313, 390ff.
—leitungen 390ff.
— —, Abmessungen 391
— —, Kennzeichnung 392
— —, Strombelastbarkeit 391
Errichtung von Blitzschutzanlagen 430
Errichtungsvorschriften 372ff.
E-Schweißen 426
ESER 493ff.
explosionsgefährdeter Raum 313
explosivstoffgefährdeter Raum 313

Fachbereichstandard 69
Fahrdrähte für elektrische Bahnen 346
Fahrzeug-Akkumulator 230
Faktorenflaschenzug 58
FARADAY-Konstante 133
FARADAYsche Gesetze 133
Farb|aufnahmetechnik 460
—balkentestbild 461
—bildröhren 465
Farbe 413
Farbenlehre 460
Farbfern|sehen 460
—sehsysteme 462f.
Faseroptik 187
Federringe 107
Fehler|fortpflanzung 18
—korrekturgerät 485
—spannung 313
—spannungs-Schutzschaltung 313
—strom-Schutzschaltung 313, 389
Feld|effekttransistoren 168
—platten 250
Fern|hörer 469
—meldekabel 353ff.
— —, kombinierte 356
— —, Niederfrequenzkabel 353ff.
— —, Trägerfrequenzkabel 355ff.
—meldeleitungen 346ff.
— —, feste Legung 346ff.
— — für ortsveränderliche Betriebsmittel 351ff.
— —, Mantelleitungen 350f.
— —, Schaltleitungen 348ff.
— —, Stegleitungen 350ff.
—schaltgerät 482
—schreib|anlagen 479
— —geräte 481
— —netze 484
— —technik 479
— — -Übertragungstechnik 484
— — -Vermittlungstechnik 482

Fern|schreibzeichen 481
—seh|antennen 453
— —aufnahmeröhren 455
— —rundfunk 453
— —sender 458
—sprech|apparate 470f.
— —fernverkehr 474
— —ortsverkehr 474
— —schaltungen 469
— —technik 469f.
— —vermittlungs-Einrichtung 474f.
Ferritwerkstoffe 205
ferromagnetisch 143
Festigkeitslehre 61ff.
Fest|kondensatoren 198ff.
—körperschaltkreise 183, 185ff.
feststoffisolierte Schaltzellen 356f.
Fest|wertregelung 232
—widerstände 190
feuchter Raum 313
feuergefährdeter Raum 313
Filter 210ff., 217
—quarz 217
Flächen|berechnung, Formeln 18f.
—tragwerke 61
Flach|relais 475
—stahl 94f.
Flaschenzüge 58f.
flexible Leiterplatten 221
Flußtechnik 496
FM|-Demodulator 450
— -Empfangsteil von Hör-Rundfunkempfängern, Kenngrößen 445
Folge|regelung 232
—steuerung 232
Formkabelplan 125, 129
Foto|diode, Wirkungsweise 251
—element 250
—metrie 412
—thyristorkoppler 161
—transistor, Wirkungsweise 251
—vervielfacher 187
—widerstand 187, 251
—zelle 187
Frei|leitungen 313, 337ff.
— —, Armaturen 340ff.
— —, Blitzschutz 342
— —, Durchhang 339f.
— —, Leiter 338
— —, Maste 342ff.
—luftanlage 355f.
—schalten 313, 374f., 395
—werdezeit 160
Fremdspannung 306
Frequenz 138, 284
—bereiche 442
—messer 245
—wandler 299
—weiche 452
Führungssteuerung 232
Füllstandsmessung 250
Funkentstörkondensatoren 203, 225
Funktionsschaltplan 123f.
Fußleisten-Installation 406

galvanisches Element, Leistungsmasse 130
Gangbreiten 376f.
Gas|entladung 415
—entladungsröhren 175f.
— —, Einteilung 175
gasiisolierte Schaltzellen 357
Gasrohr 101
Gate 168
Geber, aktiv 249
—, passiv 250
gedruckte Induktivitäten 209
— Schaltung 218
— —, Konstruktion 221
geerdeter Sternpunkt 313
Gegen|kopplung 239
—kopplungsschaltungen 182
—zellen 228
Gefahren|bereich 313
—stellen, Kennzeichnung 379
Gehörschutzgleichrichter 474
gekapselte Schaltzellen 355f.
Geko-Kontakt 255, 436
Generator 264
—, Dreieckschaltung 285
—, Sternschaltung 285
Generatoren 68, 281ff.
Gentex-Netz 484
Geometrie 18ff.
—, analytische 23f.
geometrische Grundkonstruktionen 22f.
gepoltes Relais 475f.
Gerät 313
Geräte|schaltplan 122f.
—system einer EDVA 493
— — von Prozeßrechenanlagen 498ff.
Gewinde 78
—wirkungsgrad 103
Glättungsfaktor 157
Gleich|gewichtsbedingungen 61f.
—richter 180
— —dioden 150
— — —, Typenschlüssel 150
— —kühlung 156
—spannungssiebung 155
—strom 68
— —-Compoundmotor 288
— —-Doppelschluß|generator 283
— — -—motoren 288
— —generatoren 281
— —lichtmaschine 434
— —maschine 264, 283f.
— — — mit Fremderregung 283
— —motor 287f.
— —motoren 68
— —-Nebenschlußgenerator 281f.
— —-Nebenschlußmotor 287
— —-Reihenschlußgenerator 282
— —-Reihenschlußmotor 288
— —steller 298
— —-Verbundmotor 288
— —wicklungen 279f.
— —zähler 246
Gleichungen ersten Grades 14f.
— zweiten Grades 15f.
Glimm|entladung 175
—lampen 176, 417
—röhren 176
Glüh|faden 414
—lampe 413
Goniometrie 20ff.
Grahamgang 485
Grenz|frequenz 212
—temperatur 313
griechisches Alphabet 11
Größtfehler 18
Grund|konstruktionen, geometrische 22f.
—rechen|arten 12
— —operationen mit Dualzahlen 25
—stromkreis 141
Gruppen|verbindungsplan 123
—wähler (GW) 477ff.
Gürtelkabel 330
GULDINsche Regeln 19
GUNN-Dioden 149
Halb|leiter 134
— —|-Dehnungsmeßstreifen 235
— —dioden 146ff., 223
— —sperrschichtelemente 187
— —technologien 184
—messer 76
—zeuge 94
HALL|-Effekt 250
— -Generator 250
— -Spannung 250
Halogenglühlampe 436
Haltestrom 159
Hand|bereich 313
—vermittlung 474
Hängeisolatoren 341
Hart|faserplatten 67
—gewebe 91
— —, elektrische Eigenschaften 91
— —, mechanische Eigenschaften 91
—metall 93
—papier 91
— —, elektrische Eigenschaften 91
— —, mechanische Eigenschaften 91
Harze 89
Haupt|strom|generator 282
— —motor 288
—uhr 485f.
Haus|anschluß|kästen 380
— —raum 313
— —sicherung 313
—einführungen 380
Hebdrehwähler 477f.
Hebelgesetz 58
heißer Raum 313
Heißleiter 195
Heiz|arten 422
—leiter|berechnung 422ff.
— —werkstoffe 423f.
Hellempfindlichkeit 413
HF|-Spule 204, 206
— -Verstärker 450
HiFi-Qualität 451
Hilfsstromleitung 313
Hoch|frequenz|dioden 149
— — induktivitäten 204
—leistungszündspulen 437
—paß 312
—spannung 313
—spannungs|schalt|anlagen 356
— — —geräte 260ff.
— —verteiler 260ff.
—stabläufer 289
Höchstzugspannung 313, 338
Holzmaste 342
Hör|kapsel 470, 473f.
—rundfunk 442
—verstärker 470, 473
h-Parameter 162
Hüttenbimsbeton 67
Hybrid|parameter 162
—technik 183
Hyperbel 24
Hysterese 143

IEC-Standards 69
IGFET 168
I-Kern 311
IMPATT-Dioden 149
Impedanzmessung 247f.
Impulsverstärker 486
Imputz-Installation 399
indirekte Datenerfassung 490
induktive Geber 251f.
induktiver Aufnehmer 236
— Querankergeber 234
induktive Schwingschaltung 234
Induktivitäten 204ff.
Induktivitätsfaktor 204f.
Informations|anlagen 313, 442
—darstellung 488
—parameter 232
—technik 313
Infrarotheizung 422
Innen|anlagen 375ff.
—polmaschine 264
—raumbeleuchtung 421
Installation, sichtbar 399
—, verdeckt 399
Installations|plan 123f.
—technik 398ff.
— —, Arten 398ff.
Integrationsgrad 184
Integrator 180
integrierte Schaltkreise 178ff., 183ff.
Internationales Einheitensystem 51ff.
internationale Standards 69
invertierender Verstärker 180
Ion 130
Ionen|leiter 133
—leitung 133
—röhren 171ff., 175ff.
— —, Kennwerte 175
ionisierende Strahlung 55
ISA-Passungen und Grundtoleranzen 80f.
Isolation 313
Isolationswiderstandsmessung 248
Isolatoren 340ff.
—ketten 340ff.
Isolierlack 90

Isolier|mittel 314
—öl 90, 92
— —, Eigenschaften 92
—stoffe 89
— —, Eigenschaften 90
— —, elektrischer Widerstand 86
— —, fest 89
— —, gummifrei 90
Isopontverteiler 260ff.
ISO-Standards 69

Kabel 314, 327ff.
—, Auswahl 327f.
—, Bemessung 328ff.
—, Betriebskapazität 335
—, Biegeradien 336
—, induktiver Widerstand 335
—, Kennzeichnung 336
—, Legung 336f.
—, Leiterverbindungen 337
—, ohmscher Widerstand 335
—, Schutz 335f.
—, Strombelastbarkeit 329ff.
—, Zugbelastung 336f.
—abdecksteine 407
—fehlerortung 248
—formsteine 407f.
—kanal-Installation 407
Käfigläufermaschine 264
Kalksandstein 67
kalter Raum 314
Kalt|katoden|relaisröhren 176
— —röhren 176
—leiter 196, 234
Kanal- und Tragbügel-Installation 403
Kapazitätsdioden 148
Kapazität von Kabeln 335
kapazitive Geber 252
kapazitiver Aufnehmer 235
Kaskadenstabilisierung 157
Kation 130, 133
Katoden, Schaltsymbole 176
—fall 134
—strahl-Oszillograph 247
Kegel 77
Kelvin 53f.
Kennfarben von Kabeln 336
— — Leitern 373
— — Leitungen 326
— — Schmelzeinsätzen 257
Kennzeichnung von integrierten Schaltungen 184
— — Leitern 372f.
— — Leitungen 326
keramische Kleinkondensatoren 201ff., 226
— Leistungskondensatoren 202
Kern|abmessungen 310
—faktor 204f.
—formen 310
—verlustwiderstand 206
Kfz, Beleuchtung 434ff.
—, Leistungsbedarf 434
—, Schaltpläne 439ff.
—, Scheinwerfer 434ff.
—, Steckverbinder 441
Kilogramm 52
Kippstrom 158
KIRCHHOFFsche Gesetze 67
— Regeln 135
Kleinspannung 314
Klemmenspannung 228
Klemmverbindungen 408
Klimabedingung 372
Klinker 67
Klystron 174
Knick|beanspruchung 62
—lasten, zulässige 64
Knotenpunktregel 135
Koaxialleitung 455
Kodierung 490
Koerzitivkraft 143
Kohle|bogenlampe 417
—bürsten 275ff.
—mikrofon 470f.
Kolbenlötung 223
kombinierte Fernmeldekabel 356
Kommaverschiebung 27ff.
Komparator 181
Kompensationsspule 208
Kompensator 246
Kondensatoren 136, 139f., 197ff., 225
—felder 362ff.
Kondensator|ladung 136
—lampe 418
Konstanten, physikalische 50
Konstant|spannungs-Synchrongenerator 264
—stromquelle 180
Konsumgüterschaltkreise 467
Kontaktthermometer 234
Kontrast 413
—empfindlichkeit 413
Kontrollgang 314
Konvertierung in Dualzahlen 25
Koordinaten|schalter 478f.
—ursprungspunkt 221
Kopplung 212
Kopplungsgrad 212
Körperschluß 314
Kosinus 20
Kotangens 21
Kräftepaar 61
Kraft|messung 235, 250
—wirkung im Magnetfeld 144
Kreis|güte 212
—inhalte 27ff.
—mittelpunkt 23
—teilung 78
—umfänge 27ff.
Kreuz|modulation 444, 450
—schaltung 127
—spulmeßgerät 245
Kriechstrecken 314, 373
Kristallgitter 134
Kugel 77
—festpunkt 374
Kühlflächen 167
Kühlung von Leistungsgleichrichtern 156
Kunstharzschaum 67
künstliche Erdungsleitungen 391
Kunststoffolie-Kondensatoren 199
Kupfer 83
—, Eigenschaften 84
—, Einsatzgebiete 84
—, elektrische Eigenschaften 84
—, Lote 85
—, Zusammensetzungen 84
Kurz|schließen 374f., 395f.
—schluß 314
— —drosselspule 208
— —festigkeit 366ff.
— —läufermotor 289
— —spannung 208, 303f., 306
—zeitbetrieb 314

Lackkondensatoren 200
Lade|charakteristik 229
—faktor 228
—schlußspannung 228
—spannungsverlauf 229
—stromspule 208
—vorgang 228
—vorschrift 229
Ladungsmenge 67
Lampenwirkungsgrad 412
landwirtschaftlich genutzter Raum 314
Längsdrosselspule 208
Laser 186
Last|schalter 259
—trennschalter 260
lateinisches Alphabet 74
Läuferwicklungen 281
Lauf|feldröhren 175
—zeitröhren 174
Lautsprecher 451
Lawinen-Laufzeitdioden 149
LC-Filter 212
LECLANCHÉ-Element 227
Leer|lauf 141
—laufspannung bei Schweißstromquellen 427
Legeplan 402
Legung von Kabeln 336
— — Leitungen 317, 326
Leistung, Arbeit und 59
—, elektrische 67, 137
Leistungs|bedarf elektrotechnischer Einrichtungen 434
—faktor 314
—gleichrichter, Kühlung 156
—schalter 258, 260f.
—schild, Kennzeichen und Angaben 266, 304
Leiter 132, 338
—, Mindestquerschnitte 316, 318
—befestigungen 340
—grenztemperatur 328
—kennfarben 373
—kennzeichnung 372
—platte, Außenabmessungen 221
— —, Bestückung 222
— —, Einlagen- 226
— —, Lötbarkeit 219, 226
— —, Lötbeständigkeit 219, 226
— —, Mehrlagen- 226
—spannung 314
—verbindungen 337
—werkstoffe 83
Leitungen 314, 316ff.
—, Auswahl 316f.
—, Biegeradien 326f.
—, Kennzeichnung 326
—, Legeverbot 317
—, Legung 326
—, Montage 408ff.
—, Strombelastbarkeit 318ff.
—, Zugbelastung 326
Leitungs|auswahl 316f.
—berechnungen 320ff.
—schutzschalter 256f.
—wähler 477f.
Leitwert, elektrischer 67
—parameter 162
Leuchtdichte 412
—unterschied 413
Leuchtenwirkungsgrad 412
Leucht|farbe 415
—stoffe 415
—stofflampe 415f.
Licht 413
—ausbeute 412
—blitzstroboskop 235
—bogen|heizung 422
— —schweißen 426ff.
lichtelektrischer Meßfühler 235
Licht|empfänger, Kenndaten 187f.
—erzeugungstechnik 413
—farbe 421
—leiterkabel 187
—maschine 433
—messung 250
—schranke 234
—sender 186
—stärke 412
—strom 412
—technik 412
lineare Widerstände 189
Linearmotor 293f.
Linie 72
—, Art 72
—, Breite 72
Loch|karte 490f.
—maskenröhre 466
—streifen 490f.
— —geräte 481
—teilung 78
—ziegel 67
Logarithmen 15f.
—, natürliche 43f.
logische Bauelemente 489
— Operationen 489
— Verknüpfungen 26
Lokomotivtransformator 305
lose Rolle 58
Lötbarkeit elektronischer Bauteile 222ff.
Lote 85
— für Aluminium 85

Lote für Kupferlegierungen 85
Lotfällen 23
Lötvorschriften für elektronische Bauteile 222ff.
LSI-Schaltkreise 185
Luftdrehkondensator 203
luftisollierte Schaltzellen 355ff.
Luft|spule 206
—strecken 314, 373, 375
Lüftung von Transformatorenräumen 307
Lumen 412
Lumineszenz 415
—dioden 187
—elemente 187
Lux 412

Magnet|band 490f.
—feld 143
magnetische Durchflutung 143
— Feldstärke 143
— Flußdichte 143
— Kraftwirkung 144
— Sättigung 143
— Werkstoffe 144
magnetischer Fluß 143
Magnetisierungskennlinien 302
Magnetismus und Elektrizität 52f.
Magnet|karte 490f.
—kreis 144
magneto|elastischer Geber 235
—mechanische Filter 217f.
Magnetron 175
Manifer 205
Mantel|flächen 19f.
—leitungen 409
Mantissen 37f.
Maschen|netz 314
—satz 135
maschinelle Informationsverarbeitung 492f.
Maschinen, einfache 58f.
—, rotierende elektrische 263ff.
—gattungen 264
—lötung 223
—sprache 497
Maß 75
—, Anordnung 77
—, Auswahl 77
—bezeichnungen 273
—eintragung 75
—hilfslinien 75
—linien 75
—pfeile 76
—stäbe 72
—zahlen 76
Masse 314
—kabel 330f.
Maste 342ff.
Mathematik 11ff.
mathematische Zeichen 11
Mechanik 52, 58ff.
mechanische Filter 217
— Kurzschlußfestigkeit 366ff.
medizinisch genutzter Raum 314
Mehrlagenleiterplatte 226
Melder 241
Melderelais 253
Meßbereichserweiterung für Strommesser 247
Messen elektrischer Größen 243
— nichtelektrischer Größen 249
Meßgeräte, elektrische 243ff.
Messing 85
—, Lote 85
—, Zusammensetzungen 84
Messung magnetischer Größen 250
Meßwerterfassung 499, 501
Metalle 81ff.
—, Eigenschaften 83
—, Vorkommen 81f.
Metallpapierkondensatoren 199
Meter 51
metrisches Gewinde 103
MIG-Schweißen 426
Mikro|schalter 234
—wellenröhren 174f.
Minderung bei Kabeln 332ff.
— — Leitungen 318ff.
Mindest|abstände bei Leitungen 337f.
—querschnitte 338
Minutenimpulsverstärker 486
Misch|lichtlampe 417
—stufe 446
MISFET 168f.
Mitkopplung 239
Modulation 442
Modulator 147
Mol 54
Moment, statisches 61
monolithische Schaltkreise 185
monostabiler Multivibrator 181
Montage von Leitungen 408ff.
— — —, Befestigungsabstände 409
— — —, Biegeradien 409
— — Rohren 410ff.
— — —, Befestigungsabstände 411
— — —, Biegeradien 410
— — —, Zuordnung der Leitungen 410f.
MOSFET 168f.
Motor 263
—, Anlaßhäufigkeit 297
—, Anlaßschwere 297
—, Anlaßstrom 297
—generatoren 299
—kondensatoren 203
—schutz 295f.
— —schalter 259f.
Multiplizieren 12f., 16f., 25
Münzfernsprecher 470, 473
Muttern 106

Nachstelleinrichtung 486
Näherung 314
nasser Raum 314
Natriumdampflampe 417
natürliche Erder 390
— Logarithmen 43f.
Neben|anlage 314
—uhr 487
Neigung 77
Nenn|betrieb 314
—betriebsarten 264ff.
—bürde 308
—frequenz 142f.
—größe 314
—ladestrom 228
—leistungen 271, 304
—oberspannung 306
—spannung 142, 271, 314
—strom 142f., 314
—unterspannung 306
Neper-Dezibel, Umrechnung 47
Netz 314
neutraler Leiter 314
NF|-Quellen 451
—-Verstärker 446f., 451
nichtbrennbare Stoffe 314
Nichteisenmetalle 93
nicht|invertierender Verstärker 180
—lineare Widerstände 194ff.
Nickel 94
—, Anwendung 94
—, Legierungen 94
— -Eisen-Akkumulator 230
— -Kadmium-Akkumulator 230
Nieder|frequenz|induktivitäten 204
— —kabel 353
—spannung 314
—spannungsschaltgeräte 257ff.
N-Kern 311
n-Leitung 134
Normal|element 130
—spannungen 61
NTSC-System 462
Null|kippspannung 158
—leiter 314
Nullung 314, 388
numerische Daten 488
Nummernschalter 470, 473f.
Nuten 77
Nutzbremsung 299

obere Betriebsspannung 314
Oberflächenrauheit 73
Ofentransformator 305
offene Schaltzellen 355f.
Offsetkompensation 179
Ohmmeter 247
ohmsche Leiterwiderstände 335
ohmscher Leiterwiderstand 221
OHMsches Gesetz 67, 69, 135
Öltransformator 305
Operationsverstärker 179
Optik, physiologische 413
optische Koppler 187
— Strahlung 54f.
Optoelektronik 186ff.
optoelektronische Effekte 186
— Koppler 188
— Übertragungskette 186
Ortsbatterie-System (OB) 469
orts|fest 314
—feste Leitung 314
Ortsnetz-Transformatorenstation 359f.
ortsveränderlich 314
Oszillator 446
Oszillograph 247

PAL|-Dekoder 465
— -System 462
Papier|formate 70
—kondensatoren 198
Parabel 24
Parallaxe 244
Parallel|betrieb 315
—drosselspule 208
—schaltungen 136, 155
— — von Umspannern 303
—schwingkreis 210f.
Parallele ziehen 23
paramagnetisch 143
passive Geber 250ff.
Passungen 79f.
PELTIER-Effekt 250
Pendel|kontakt 486
—uhr 485
Periodensystem der chemischen Elemente 47ff.
periphere Geräte von EDVA 495
Permeabilität 143
PETERSON-Spule 209
Pflanzenfasermatten 67
Phase 315
phasenempfindlicher Gleichrichter 181
Phasen|faktor 137
—spannung 141
—verschiebung 285
Phenoplaste 88
Physik 51ff.
physikalische Chemie 54
— Konstanten 50
physiologische Optik 413
Piezoeffekt 132
piezoelektrischer Geber 235, 250
Piezoelektrizität 132
Pilottonverfahren 443
pin-Dioden 149
Planimetrie 18f.
Plaste 86ff.
—, Eigenschaften 87
—, Einteilung 86
—, Gleitlager 89
—, Herstellung 86
—, Verarbeitung 88
—, Verwendung 87
Plast|kabel 329ff.
—panzerrohre 410
—rohre 410
p-Leitung 134
pn-Übergang 134
Pol|anschlußklemmen 229
—reagenzpapier 229
—wendekontakt 486
Polyamid 87
Polyester|folie-Kondensatoren 200
—harz 87
Polykarbonatfolie-Kondensatoren 200, 226

Polystyrol 67, 87
– folie-Kondensatoren 199
Polyvinylchlorid 87
Potentialausgleich 384
Potenzen 27ff.
Potenzieren 13f.
Präzisionsgleichrichter 181
Primärelemente 227
Pritschen-Installation 406
Problemanalyse 496
Programm 492
– ablaufplan 496
Programmiersprachen 497
Programmierung 497
Programm|regelung 232
– steuerung 232, 492
– unterbrechungssystem 498
Proportionen 13
Proton 130
Prozentrechnung 13
Prozeß|ein- und -ausgabeeinrichtungen 499f.
– rechner 497ff.
– –, Betriebsarten 499, 501
– –, Einsatzbereiche 499, 502
Prüfung 315
– elektrotechnischer Anlagen 398
– von Blitzschutzanlagen 432
Pufferbatterie 229
PVC-Schnitzel 67

Quadranten 21
quadratische Gleichungen 15
Quadrat|wurzelziehen 14, 17
– zeichen 77
Quadrieren 17
Quadrofonie 452
Quecksilberdampf|lampe 417
– -Glas-Gleichrichter 177
– -Groß-Gleichrichter 177
– -Stromrichterventile 178
Quer|drosselspule 108
– feld-Generator 283

Radizieren 14, 17
Rauheit 73
Raum 315
– mit Unfallgefahr 315
– und Zeit 51f.
– heizung 425
– inhalte 19f.
– temperaturen 425
– welle 442
– winkel 412
– wirkungsgrad 412
RC|-Doppel-T-Filter 217
– -Filter 215
– -Generator 216
– -Glied 137, 215
– -Kopplung 165
– -Phasenkette 216
– -Tiefpaß 215
Reaktor 208
Rechenstab 16ff.
Rechnerfamilie 4000 500
Rechteckrohr 101f.
Referenzdiode 158
Reflexionsgrad 420
Regel|abweichung 241
– einrichtung 232
– größe 232
– güte 241
– kreis 232
– schaltungen, Übergangsfunktionen 239
– strecke 232, 238
– zeiten 241
Regelung 232, 241
Reibung 59f.
Reibungszahlen 60
Reihe 315
Reihen|drosselspule 208
– schaltungen 135f., 155
– schlußmotor 291
– schwingkreis 210f.
Rekombination 134
Relais 253ff., 474f.
relative Atommassen 49
RELOG-Relais 254f.
Remanenz 143
Repulsionsmotor 291
Resonanz|frequenz 212, 216
– widerstand 210, 212
Resonator, elektromechanisch 132
reziproke Werte 17
RGW|-Empfehlung 69
– -Standard 69
Richtkraft 245
Riemenscheiben 277
Ring|leitung 315
– modulatoren 147
Roheisen 92
Rohre 101
Rohrtrassen-Installation 406
Rolle, lose 58
römische Zahlzeichen 11
Rosenberg-Generator 283
rotierende elektrische Maschinen 263ff.
– – –, Achshöhen 271
– – –, Anschlußbezeichnungen 267f.
– – –, Aufbau 268
– – –, Bauformen 268ff.
– – –, Belastung 264
– – –, Betriebsart 264
– – –, Betriebsbedingungen 264
– – –, Betriebszustand 264
– – –, Kühlungsarten 266
– – –, Leistungsschilder 266f.
– – –, Nenndaten 264
– – –, Nennleistungen 271
– – –, Nennspannungen 271
– – –, Übertragung 277f.
– – –, Wellendurchmesser 272
– – –, Wellenenden 271f.
– – –, Wicklungen 279ff.
Rück|hördämpfungsschaltung 469f.
– leiter 315
– spannung 315
– stromschutzdiode 437
Ruhespannung 228
Rund|relais 475
– funktechnik 442ff.
russisches Alphabet 11

Sägezahngenerator 148
Sättigungswandler 310
Schacht-Installation 403
Schäkelisolatoren 341
Schalenkern 206
Schalt|anlage 315
– anlagen 356ff.
– dioden 148
– drähte 408
– felder 360ff.
– geräte 253ff.
– kreise, integrierte 178ff., 183ff.
– kreisfamilien 184
– kurzzeichen 110ff.
– plan 120ff.
– pläne von Kraftfahrzeugen 439ff.
– tafelinstrumente 245
– zeichen 108ff., 178
– zellen 356f.
Schaltungen, gedruckte 218ff.
Schattenwirkung 419
Schaumglas 67
Scheiben 107
– wicklung 303
Schein|leistung 137
– werfer 434ff.
Scheitelwert 139
Schenkelpolmaschine 264
Scherbeanspruchung 62
Schichtdrehwiderstände 192
schiefe Ebene 58
Schiene 315
Schlagweite 315
Schleif|leitung 315
– leitungsanlage 315
– ringläufermaschine 264, 290
Schleusenspannung 159
Schlitzmaskenröhre 466
Schmelzeinsätze 256f.
Schmelz|temperaturen 66
– wärme 66f.
– – von Stoffen 66
Schmuckuhr 487
Schnellarbeitsstahl 93
Schnitte 74
SCHOTTKY-Dioden 149
Schraffur 72
Schrauben 104
schreibende Meßgeräte 246
Schreiber 246
Schrift für Zeichnungen 71
Schritt|geschwindigkeit 480
– kombination 480
– spannung 315
Schub|beanspruchung 62
– schraubtriebanlasser 434
Schutz gegen Berühren 315, 337, 375ff.
– abstand 315
– art 315
– bereich 315
Schütze 258f.
Schutzerdung 315, 388
Schützfelder 362
Schutz|grad 315
– grade 270
– isolierung 315, 386
– isolierungszeichen 387
– klasse 315
– kleinspannung 315, 387
– leiter 315, 385f.
– – -Isolierung 385f.
– – -Kennzeichnung 386
– – -Mindestquerschnitt 385f.
– – -Trennung 386
– leitungssystem 315, 387
– maßnahme 315
– maßnahmen in elektrotechnischen Anlagen 381ff.
– raum für Bade- und Duscheinrichtungen 383
– relais 253f.
– – plan 123f.
– rohrkontaktrelais 255
– trennung 315, 387
– vorrichtungen 382
Schwarz-Weiß-Fernsehen 459
Schweiß|generatoren 427f.
– stromquellen 426
– transformator 305
– transformatoren, Kenndaten 428
– umformer 427
– verfahren 426
Schwindmaße von Metallen 65
Schwing|ankersystem 487
– kreise 210ff.
– quarz 132, 217
SCOTT-Schaltung 429
SECAM|-Dekoder 465
– -System 463
Sechskant|muttern 106
– –, flach 106
– schrauben 105
Seiltrommel 58
Sekundärelemente 227
Sekunde 51
Sekundenpendel 485
Selbsthemmungsgrenze 103
Selektivverstärker 181
Selenüberspannungsbegrenzer 149
Senkrechte ermitteln 23
Sendevorgang 481
Senkschrauben 106
Sensortasten 467
Serien|generator 282
– schaltung 126
SG/CO_2-Schweißen 426
sicherheitstechnische Forderungen für Starkstromanlagen 395f.
Sicherungen 256f.
Sieb|faktoren 156, 215
– schaltungen 212ff.
Siebung von Gleichspannungen 155
Siedetemperaturen 66
Signal 232
–, analoges 232

Signal, digitales 232
–, diskretes 232
–, kontinuierliches 232
–, Mehrpunkt- 232
–, stetiges 232
–, unstetiges 232
–anlagen 315
–aufnahme 233
–ausgabe 240
–einrichtung 486
–farben 241
–fluß der Steuerung, Regelung 233
– –plan 233
–verarbeitung 236
Sinus 20
– - und Tangenswerte 17f.
Skalensymbole 244
Sondermaschinen, Anschlußbezeichnungen 267
Source 168
Spann|draht 403ff.
– – -Installation 403ff.
–seil 403ff.
Spannung 130
Spannungs|folger 180
–messer 247
–messung 243
– –, leistungslos 246
–quellen, elektrochemische 227
–reihe, elektrochemische 130
– –, thermoelektrische 131
–übersetzungsverhältnis 302
–vervielfachung 155
–wandler 310
– –fehler 310
Spartransformatoren 302, 304
Spektrum, elektromagnetisches 443
Sperr|kennlinie von Thyristoren 158
–schicht|-FET 169
– – -Temperatur 158
–spannung 158
–verzugszeit 160
–wandler 310
Spezialzündanlagen 438
spezifische Leitfähigkeit 131f.
– Wärmekapazitäten 66
spezifischer elektrischer Widerstand 67, 69
– Erdwiderstand 315
– Widerstand 131f.
Spiegelfrequenz 444
Spitzenlagerung 244
Sprechkapsel 470
Spule im Gleichstromkreis 137
– – Wechselstromkreis 139
Stabilisatorröhre 176
Stabilisierungs|faktor 157
–schaltungen 157
Stabwerke 61
Stahl 91
–, Fremdstoffgehalt 92
–, Gütegruppen 93
–, Mischungen 92
–akkumulator 230
–blech 94f.
–maste 343f.
–panzerrohre 411
–profile 94ff.
Standardisierung 68ff.
–, internationale 69
Standards der Elektrotechnik 69f.
Ständerwicklungen 280
Standortisolierung 316
Starkstrom|anlage 316, 373ff.
–freileitungen 337ff.
–installation 316
–kabel 327ff.
–leitungen 316ff.
starre Scheibenkupplung 273ff.
– Sternpunkterdung 316
Starter 416
Start|-Stop|-Schritt 480
– – – -Verzerrungsgrad 481
statisches Moment 61
staubfreier Raum 316
staubiger Raum 316
Staufferbuchsen 273
Steckverbinder 441
Stegleitungen 408
Stelleinrichtung 240
Steller 297
Stellglied 232
Stereofonie 442, 452
Stereometrie 19f.
Stern|punkt|belastbarkeit 306
– –drosselspule 209
–schaltung 68, 70, 141
stetige lineare Grundglieder 237
Steuer|elektrode 158
–erder 316
–kette 232
–kreis 159
–leitung 316
–strom 158f.
Steuerung 232
Stör|größe 232
–stellenleitfähigkeit 134
Stoßionisation 133
Strahlung 414
–, ionisierende 55
–, optische 54f.
Streckmetall 102
Streifenschreiber 481
Streufeldtransformator 416
Strom|begrenzungsdrosselspule 208
–belastbarkeit 222, 318ff., 327, 329ff.
–kreis 316
–laufplan 122
–leitung 171
–messung 243
–richter 176ff., 316
– –, fremdgeführt 301
– –, netzgeführt 300
– –, Typenschlüssel 176
– –anlage 316
– –schaltungen 150ff.
– –transformator 305
–schiene 316
–schienen|anordnung 373
– –material 83
–übersetzungsverhältnis 302
Strömungsmessung 249
Strom|verdrängungsmotor 289
–wandler 308
– –fehler 310
Strossenleitung 316
Stückzählung 236
Stufenstromwandler 310
Subtrahieren 12f., 25
Subtraktivtechnik 218
Summenwandler 310
Super 444
Supraleitung 132, 143
Symbole, Zeichen und 11
Synchronisationseinrichtung 486
Synchronisiereinrichtung 286
Synchronmaschinen 264, 290
Synchronoskop 286
Synchronuhr 485
Systemunterlagen 497f.

Tachometer|geber 249
–dynamo 235
Tangens 21
Tangenten 23
Tangentialspannungen 61
Tauchlötung 223
Telegrafenalphabet 479
Telegrafie 479
Telegrafiergeschwindigkeit 480
Telex-Netz 484
Temperatur|geber 250
–koeffizient 69, 132, 157f.
–messung 234, 249
TFT 168
TGX-Netz 484
thermische Bemessung von Erdungsanlagen 390f.
– Festigkeit 316
– Kurzschlußfestigkeit 368ff.
Thermistoren 195, 234, 251
Thermodynamik 53f., 65ff.
Thermo|element 131, 233, 249
– –, Kennlinien 250
–spannung 131
–strom 131
–umformer-Meßgerät 246
THOMSON-Brücke 248
Thyratron 176
Thyristoren 158ff.
Thyristorsteller 298
Tiefpaß 213
Toleranzen 79
Torsionsspannungen 61
Trafobleche 278
Träger, statische Werte 62f.
–frequenzkabel 355
Trägheitsmomente 63
Tragwerke 61
Transformator, Absichern 307
–, Anzapfungen 304
–, Belüftung 306ff.
–, Freileitungsstation 359
–, Gefahrenmeldung 306
–, Kabelstation 359f.
–, Kurzschluß|schutz 306
–, –verluste 306
–, Leerlaufverluste 306
–, Nennleistung 306
–, Ölfanggrube 306
–, Schaltgruppen 303, 306
–, Schutz 306
–, Überlastschutz 306
Transformatoren 68, 304, 316
–räume, Lüftung 307
Transistor, Arbeitspunkteinstellung 166
–, bipolar 160ff., 225
–, Einbaubedingungen 225
–, Kennliniendarstellung 164
–, Lötung 225
–, *RC*-Kopplung 165
–, Schaltungstechnik 165
–, Schaltverhalten 166
–, Steuerungsarten 165
–, unipolar 168
–differenzverstärker 168
–kühlung 167
transportabel 316
Trenner 260f.
Trenn|-Fehlerstrom-Schutzschaltung 316, 390
–schärfe 444
–strecken 374
–transformator 316
Treppenbeleuchtung, selbsttätig 127
Triftröhren 173
Trigonometrie 22
Trimmer 204
Trivialnamen chemischer Stoffe 49f.
trockener Raum
Trockentransformator 305
TSE-Beschaltung 153
Tunneldioden 149

Übersichtsschaltplan 123f.
Überspannungsableitung 153
Überspielkabel 453
Überstromschutz 152
–einrichtungen 325
Übertrager 302, 310
Übertragungsglied 232, 236
U-Dioden 149
Uhren|leitungsnetz 487
–linie 485
–schleife 485
–zentrale 486
U-Kern 311
UK-Station 357ff.
Ultraschallfernbedienung 466
Umdrehungsflächen 19
Umformer 264, 299
–, rotierend 299
–, statisch 299
Umrichter 299
Umspanner 302, 304
Umspannstation 357ff.
unipolare Transistoren 168ff.
Universaldioden 147

Universalmotor 291
Unterflur-Installation 400f.
Unterputz-Installation 399
UP-Schweißen 426
URS 242
US-Schweißen 426
U-Stahl 100

Valenzelektron 134
Varaktordioden 149
Varistoren 194
veränderbare Kondensatoren 204
veränderliche Widerstände 192
Verbraucheranlage 316
Verbundgenerator 283
Verdampfungswärme 66f.
– von Stoffen 66
Verdrehspannungen 61
Verjüngung 77
verkettete Spannung 141
Vermittlungstechnik, Bauteile 474
Verrechnungszählung 381
Verschlüsselung von Daten 490f.
Verstärker 236
Verteilungsanlage 360ff.
Vier|poltheorie 161
–schichtdioden 148
Voll|kern-Langstabisolator 341
–polmaschine 264
–ziegel, Wärmeleitfähigkeit 67
Volumenberechnung, Formeln 19f.
Vorsätze 51
Vorwähler (VW) 477f.
Vouten-Installation 402
Vulkanfiber 87

Wabenziegel 67
Wähl|anlage 478
–vermittlung 474
Wand|kanal-Installation 403
–konsolen 273
Wandler 302, 308
–fehler 309
–klassen 309
–übertragungstemperatur 310
– -Zähler-Meßgeräte 381
Wärme|ausdehnungskoeffizient 65f.
–auslöser 260
–kapazitäten, spezifische 66
– – von Stoffen 65
–lehre 53f., 65f.
–leitfähigkeit 67, 167
– – von Stoffen 67
–übergangswiderstand 167
–widerstand 167
Warn|blinkanlage 436
–schilder 379
Wasserrohr 101
Wechsel|schaltung 126
– spannung 138
Wechselstrom 69, 138, 284
– -Generator 284
– –, Aufbau 284
– –, Parallelschaltung 286
–motor 288ff.
–relais 475f.
–steller 297
–telegrafie 484
–widerstand 139
–zähler 246
Wegmessung 234, 249
Weicheisenmeßgerät 245
Wellen|bereiche 442
–enden 271
–kupplungen 273ff.
–widerstand 212, 214, 454
Werk|standard 69
–stoffe 83ff.
–zeugstahl 93
WESTON-Normalelement 130
WHEATSTONEsche Brücke 67f., 248
WHITWORTH|-Gewinde 104
– -Rohrgewinde 104
Wicklungen 279
Widerstand 131ff., 189ff.
–, induktiv 139
–, kapazitiv 139
–, spezifischer elektrischer 67, 69
Widerstands|geber 250f.
–heizung 422
–messung 247
–momente 63f.
–nomogramm 189
–preßschweißen 429
–thermometer 233
–übersetzungsverhältnis 302
WIG-Schweißen 426
Windungszahl 204
Winkel, Bezeichnungen 21
–antragen 23
–funktionen 20ff.
– –, Beziehungen 21
– –, natürliche Werte 39
–halbieren 23
–messung 234
–stahl 96
– –, gleichschenklig 96, 98
– –, ungleichschenklig 97, 99
Wirbelstromläufer 289
Wirk|arbeitszähler 246
–leistung 137
–strom 68
Wirkungs|plan 125, 129
–weg 232
Wirkwiderstand 68
Wurzeln 27ff.
Wurzelziehen 14, 17

YAGI-Antennen 454
y-Parameter 161ff.

Zahlen|darstellung, duale 25
–tabellen 27ff.
Zähler 246
–tafel 381
Zählröhren, Typenschlüssel 176
Zahn|räder 277
–scheiben 107f.
Zapfenlagerung 244
Z-Dioden 156
Zeichen 488
–satz in EDVA 490
– und Symbole 11
Zeichnen, technisches 70
Zeiger 487
–bild 138, 140
–einschwingvorgang 244
Zeilensprungverfahren 454
Zeit|konstante 136f.
–plan|regelung 232
– –steuerung 232
–relais 253f.
zeitweise feuchter Raum 316
Zelle 316
Zellen|schalter 228
–verbinder 229
Zelluloid 87
Zentralbatterie-System (Z^B 469
ZF-Verstärker 447
Zifferblatt 487
Ziffernanzeigeröhren 176
Zink 94
–, Anwendung 94
–, Zusammensetzung 94
Zug|beanspruchung 62
–belastung 326, 336f.
–kräfte, zulässige 326, 337
–spannungen 61
Zünd|anlage 438
–impulsbreite 159
–kerze 437
–spulen 437
–strom 159
–verzugszeit 159
–zeit 159
Zusammenschalten von Erdungsanlagen 394
Zuverlässigkeit von Bauelementen und Baugruppen 226
Zweiphasenmotor 289
Z-Widerstand, differentieller 157
– –, elektrischer 158
– –, thermischer 158
Zwischen|decken-Installation 403
–relais 253f.
Zylinder|kern 206
–schrauben 105
–wicklung 303