

**Wissensspeicher  
für die  
Berufsbildung**

**W**

**GRUNDLAGEN  
DER  
ELEKTROTECHNIK**

**BAHR-ECKE**

---

---

WISSENSSPEICHER FÜR DIE BERUFSBILDUNG

---

# GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK

Oberlehrer Dipl.-Ing.-Päd. Hans-Jörg Bähr  
Oberlehrer Dipl.-Gwl. Wolfgang Ecke

6., durchgesehene Auflage



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Als berufsbildende Literatur für die Ausbildung der Lehrlinge zum Facharbeiter und für Werktätige, die zum Facharbeiter ausgebildet werden, für verbindlich erklärt

1. 9. 1980

Ministerium für Elektrotechnik/Elektronik

Dieser Wissensspeicher wurde mit Unterstützung der Zentralstelle für Aus- und Weiterbildung am Institut für Rationalisierung des Industriebereichs Elektrotechnik/Elektronik entwickelt.

239 Bilder, 38 Tafeln

© VEB Verlag Technik, Berlin, 1976

Bearbeitete Auflage: © VEB Verlag Technik, Berlin, 1980

Unveränderter Nachdruck 1981

Lizenz 201 · 370/169/81

DK 621.3(075) · LSV 3502 · VT 5/5246-6

Lektor: Dipl.-Ing. Siegfried Liebscher

Printed in the German Democratic Republic

Schreibsatz: VEB Verlag Technik, Berlin

Reproduktion, Offsetrotation und buchbind. Verarbeitung:

(52) Nationales Druckhaus, VOB National, Berlin

Redaktionsschluß: 10. 11. 1980

Bestellnummer: 552 867 7

DDR: 6,25 M

## **Vorwort**

Der Wissensspeicher wurde für die Berufsausbildung von Elektrofacharbeitern aller Industriebereiche entwickelt. Er kann außerdem in der Ausbildung aller der Berufe eingesetzt werden, deren Ausbildungsunterlagen das Unterrichtsfach „Grundlagen der Elektrotechnik“ enthalten. Er enthält eine fachlich geordnete und methodisch aufbereitete, komprimierte Fassung der Grundlagen der Elektrotechnik. Die Erfordernisse der Leistungselektrotechnik und die der Informationselektrotechnik werden in gleichem Maße berücksichtigt. Einige komplizierte Zusammenhänge werden ausführlicher, als in Wissensspeichern üblich, dargestellt und erläutert. Tafeln zu allen Stoffkomplexen sollen dem Erkennen von objektiven Gesetzen, vorhandenen Prinzipien und einzuprägenden Regeln dienen. Um Gemeinsamkeiten der drei Feldarten deutlich herauszuarbeiten, haben die Autoren, wo erforderlich, gleichartige Formulierungen gewählt.

Der Wissensspeicher soll die Ausführungen des Lehrenden im Unterricht und bei Laborversuchen unterstützen und dem Lernenden zur Zweitinformation dienen.

Die 5., stark bearbeitete Auflage kann neben der vorliegenden 6., durchgesehenen Auflage im Unterricht eingesetzt werden.

Zur Information über das Angebot der gesamten berufsbildenden Literatur empfehlen wir den Literaturkatalog Berufsbildung, der vom Staatssekretariat für Berufsbildung herausgegeben wurde.

Die Autoren und der Verlag danken allen, die am Entstehen des Wissensspeichers als Gutachter und Berater mitgewirkt haben. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Rose für die zahlreichen fachlichen und methodischen Hinweise. Den Lehrlingen und den Werktagigen in der Aus- und Weiterbildung wünschen wir, daß ihnen der Wissensspeicher zum erfolgreichen Abschluß der Berufsausbildung verhelfen möge.

Für Hinweise, die sich aus der Anwendung des Wissensspeichers im Unterricht und in der Praxis ergeben, sind wir dankbar.

Autoren und Verlag

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung in die Elektrotechnik . . . . .	7
1.1.	Bedeutung der Elektrotechnik für die Volkswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik . . . . .	7
1.2.	Bereiche der Elektrotechnik . . . . .	8
1.3.	Elektrische Energie als Erscheinungsform der Materie . . . . .	9
2.	Wesen der Elektrizität . . . . .	11
2.1.	Elektrische Ladungen . . . . .	11
2.2.	Elektrische Leiter, Halbleiter, Nichtleiter . . . . .	12
3.	Elektrische Erscheinungen in Leitern . . . . .	14
3.1.	Elektrisches Strömungsfeld . . . . .	14
3.2.	Darstellung und Erscheinungen des elektrischen Strömungsfeldes . . . . .	14
3.3.	Meßgrößen des elektrischen Strömungsfeldes . . . . .	15
3.3.1.	Strom, Stromstärke und Stromdichte . . . . .	15
3.3.1.1.	Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen	15
3.3.1.2.	Wirkungen des elektrischen Stromes . . . . .	19
3.3.2.	Urspannung, Spannungsabfall, Feldstärke, Potential, Pegel . . . . .	21
3.3.2.1.	Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen	21
3.3.2.2.	Urspannungserzeugung . . . . .	26
3.3.3.	Elektrische Leitfähigkeit - Zusammenhang zwischen Feldstärke und Stromdichte . . . . .	26
3.4.	Zusammenhänge zwischen Spannung und Strom im elektrischen Strömungsfeld . . . . .	27
3.4.1.	Elektrischer Widerstand . . . . .	27
3.4.1.1.	Elektrischer Leitwert und elektrischer Widerstand . . . . .	27
3.4.1.2.	Bemessungsgleichung des elektrischen Widerstandes . . . . .	28
3.4.1.3.	Temperaturabhängigkeit von Widerständen . . . . .	29
3.4.2.	Spannungs-Strom-Verhalten von Widerständen . . . . .	30
3.4.2.1.	Lineare Spannungs-Strom-Charakteristik . . . . .	30
3.4.2.2.	Nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik . . . . .	31
3.5.	Elektrische Stromkreise . . . . .	33
3.5.1.	Grundstromkreis und seine Elemente . . . . .	33
3.5.2.	Betriebszustände elektrischer Stromkreise . . . . .	35
3.6.	Erweiterte Stromkreise und ihre Berechnungsgesetze . . . . .	38
3.6.1.	Arten erweiterter Stromkreise, Begriffsbestimmungen . . . . .	38
3.6.2.	Kirchhoffsche Gesetze . . . . .	40
3.7.	Zusammenschaltung von Zweipolen . . . . .	42
3.7.1.	Schaltungen elektrischer Widerstände . . . . .	42
3.7.1.1.	Reihenschaltung von Widerständen . . . . .	42
3.7.1.2.	Parallelschaltung von Widerständen . . . . .	44
3.7.1.3.	Gemischte Schaltung von Widerständen . . . . .	47
3.7.2.	Zusammenschaltung elektrischer Spannungsquellen . . . . .	48
3.7.2.1.	Reihenschaltung von Spannungsquellen . . . . .	48
3.7.2.2.	Parallelschaltung von Spannungsquellen . . . . .	49
3.8.	Elektrische Energie und Leistung . . . . .	50
3.8.1.	Elektrische Energie . . . . .	50
3.8.1.1.	Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten . . . . .	50
3.8.1.2.	Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen und umgekehrte Energiewandlungen . . . . .	52

3.8.2.	Elektrische Leistung . . . . .	62
3.8.3.	Wirkungsgrad, Leistungsumsatz und Anpassung . . . . .	63
4.	Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern . . . . .	66
4.1.	Elektrostatisches Feld . . . . .	66
4.2.	Darstellung und Erscheinungen des elektrostatischen Feldes . . . . .	66
4.2.1.	Feldbilder . . . . .	66
4.2.2.	Erscheinungen des elektrostatischen Feldes . . . . .	68
4.3.	Meßgrößen des elektrostatischen Feldes . . . . .	69
4.3.1.	Verschiebungsfluß, Ladung und Verschiebungsflußdichte . . . . .	69
4.3.2.	Spannung und elektrische Feldstärke . . . . .	70
4.3.3.	Dielektrizitätskonstante – Zusammenhang zwischen Feldstärke und Verschiebungsflußdichte . . . . .	73
4.3.4.	Dielektrischer Verschiebungsstrom . . . . .	74
4.4.	Kondensator . . . . .	75
4.4.1.	Kapazität von Kondensatoren . . . . .	75
4.4.2.	Bemessungsgleichung der Kapazität . . . . .	76
4.5.	Zusammenschaltung von Kondensatoren . . . . .	76
4.5.1.	Reihenschaltung von Kondensatoren – Ermittlung der Ersatzkapazität . . . . .	77
4.5.2.	Parallelschaltung von Kondensatoren – Ermittlung der Ersatzkapazität . . . . .	78
4.6.	Kondensatoranordnungen mit geschichtetem Dielektrikum . . . . .	80
4.7.	Erwünschte und unerwünschte Kondensatoranordnungen . . . . .	81
4.8.	Verlustlose und verlustbehaftete Kondensatoren . . . . .	82
4.9.	Verhalten von Kondensatoren bei verschiedenen Betriebsarten . . . . .	83
4.9.1.	Verhalten von Kondensatoren an unveränderlicher Gleichspannung . . . . .	83
4.9.2.	Verhalten von Kondensatoren an veränderlicher Gleichspannung . . . . .	83
4.9.3.	Verhalten von Kondensatoren bei Schaltvorgängen . . . . .	84
4.9.3.1.	Begriffsbestimmungen bei Schaltvorgängen . . . . .	84
4.9.3.2.	Lade- und Entladevorgänge an Kondensatoren . . . . .	85
4.10.	Zeitkonstante von Kondensatoren . . . . .	90
5.	Elektromagnetische Erscheinungen . . . . .	91
5.1.	Elektromagnetisches Feld . . . . .	91
5.2.	Darstellung und Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes . . . . .	91
5.2.1.	Feldbilder . . . . .	91
5.2.2.	Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes . . . . .	92
5.3.	Elektromagnetische Felder elektrischer Ströme . . . . .	93
5.3.1.	Magnetfelder stromdurchflossener geradliniger Leiter . . . . .	94
5.3.2.	Magnetfelder stromdurchflossener Spulen . . . . .	95
5.4.	Meßgrößen des elektromagnetischen Feldes . . . . .	96
5.4.1.	Magnetischer Fluß und magnetische Flußdichte . . . . .	96
5.4.2.	Magnetische Durchflutung und magnetische Feldstärke . . . . .	97
5.4.3.	Definition des magnetischen Leitwertes . . . . .	98
5.4.4.	Bemessung des magnetischen Leitwertes . . . . .	99
5.4.5.	Magnetischer Widerstand . . . . .	100
5.4.6.	Magnetische Feldkonstante – Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Magnetflußdichte . . . . .	100
5.5.	Magnetische Kreise . . . . .	101
5.5.1.	Maschengesetzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen . . . . .	101
5.5.2.	Verzweigungsgegesetzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen . . . . .	102
5.5.3.	Durchflutungsgesetz . . . . .	103

5.6.	<b>Elektromagnetische Kreise mit verschiedenen Magnetmaterialien . . . . .</b>	104
5.6.1.	<b>Elektromagnetische Kreise mit Luft bzw. Vakuum als Magnetmedium . . . . .</b>	104
5.6.2.	<b>Magnetisierungskennlinien von Ferromagnetika . . . . .</b>	105
5.6.3.	<b>Hystereseschleife – Entstehung und energetische Deutung . . . . .</b>	107
5.7.	<b>Permanentmagnetismus als Sonderform des Elektromagnetismus . . . . .</b>	108
5.8.	<b>Elektromagnetische Induktion . . . . .</b>	109
5.8.1.	<b>Allgemeines Induktionsgesetz . . . . .</b>	110
5.8.2.	<b>Gegeninduktion . . . . .</b>	114
5.8.3.	<b>Selbstinduktion . . . . .</b>	116
5.8.4.	<b>Wirbelstrombildung . . . . .</b>	117
5.8.5.	<b>Spule und elektromagnetisches Feld . . . . .</b>	119
5.8.5.1.	<b>Induktivität von Spulen . . . . .</b>	119
5.8.5.2.	<b>Zusammenschaltung von Spulen . . . . .</b>	120
5.8.5.3.	<b>Erwünschte und unerwünschte Spulenanordnungen . . . . .</b>	122
5.8.5.4.	<b>Verlustlose und verlustbehaftete Spulen . . . . .</b>	123
5.9.	<b>Verhalten von Spulen bei verschiedenen Betriebsarten . . . . .</b>	124
5.9.1.	<b>Spule an unveränderlicher Gleichspannung . . . . .</b>	124
5.9.2.	<b>Spule an veränderlicher Gleichspannung . . . . .</b>	124
5.9.3.	<b>Verhalten von Spulen bei Schaltvorgängen . . . . .</b>	125
5.10.	<b>Zeitkonstante von Spulen . . . . .</b>	130
5.11.	<b>Kraftwirkungen elektromagnetischer Felder . . . . .</b>	132
5.11.1.	<b>Kraftwirkungen auf magnetisierbare Materialien . . . . .</b>	132
5.11.2.	<b>Kraftwirkungen auf stromdurchflossene Leiter . . . . .</b>	134
5.11.3.	<b>Elektromagnetische Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern . . . . .</b>	136
6.	<b>Wechselstromerscheinungen . . . . .</b>	137
6.1.	<b>Sinusförmige Wechselspannung . . . . .</b>	138
6.1.1.	<b>Bestimmungsgrößen sinusförmiger Wechselspannungen und -ströme . . . . .</b>	139
6.1.2.	<b>Grafische Darstellung und Darstellungshilfen . . . . .</b>	142
6.2.	<b>Wechselstromerscheinungen bei passiven und aktiven Zweipolen . . . . .</b>	145
6.2.1.	<b>Passive Zweipole im Wechselstromkreis . . . . .</b>	145
6.2.1.1.	<b>Ideale Widerstände, Spulen und Kondensatoren . . . . .</b>	145
6.2.1.2.	<b>Zusammenschaltungen von idealen Widerständen, Spulen und Kondensatoren . . . . .</b>	152
6.2.1.2.1.	<b>Reihenschaltungen . . . . .</b>	152
6.2.1.2.2.	<b>Parallelschaltungen . . . . .</b>	155
6.2.1.3.	<b>Reale Widerstände, Spulen und Kondensatoren . . . . .</b>	158
6.2.2.	<b>Leistung und Energie in Wechselstromkreisen . . . . .</b>	160
6.2.3.	<b>Elektrische Schwingkreise . . . . .</b>	161
6.2.3.1.	<b>Reihenschwingkreise . . . . .</b>	161
6.2.3.2.	<b>Parallelschwingkreise . . . . .</b>	164
6.2.3.3.	<b>Einfluß des Generatorwiderstandes auf die Eigenschaften elektrischer Schwingkreise . . . . .</b>	166
6.2.3.4.	<b>Kompensation von Blindleistungen . . . . .</b>	169
6.2.4.	<b>Zusammenschaltung von Wechselspannungsquellen . . . . .</b>	172
6.3.	<b>Mehrphasige Wechselspannungen und Wechselströme . . . . .</b>	174
6.3.1.	<b>Erzeugung mehrphasiger Wechselspannungen . . . . .</b>	174
6.3.2.	<b>Verkettung mehrphasiger Wechselspannungen . . . . .</b>	177
6.3.3.	<b>Energie und Leistung im Dreiphasensystem . . . . .</b>	181
6.3.4.	<b>Magnetische Felder bei Dreiphasenwechselstrom . . . . .</b>	182
7.	<b>Anhang . . . . .</b>	184
7.1.	<b>Verwendete Formelzeichen, Benennungen, Einheiten . . . . .</b>	184
7.2.	<b>Wichtige Konstanten in der Elektrotechnik . . . . .</b>	187
7.3.	<b>Wichtige Formeln . . . . .</b>	187
	<b>Sachwörterverzeichnis . . . . .</b>	191

# 1. Einführung in die Elektrotechnik

## 1.1. Bedeutung der Elektrotechnik für die Volkswirtschaft der Deutschen Demokratischen Republik

Der Anteil elektrotechnischer und elektronischer Bauelemente, Baugruppen, Geräte und Anlagen in allen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens, insbesondere in der Industrie, im Gewerbe und in den Haushalten, nimmt ständig zu. Die Werktätigen mit elektrotechnischen Berufen leisten durch ihre schöpferische Arbeit in allen Bereichen der Volkswirtschaft einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der Wirtschaftskraft unserer Republik. Dadurch wird die Erfüllung der Hauptaufgabe maßgeblich beeinflußt. Bei der Gestaltung der entwickelten sozialistischen Gesellschaft und beim allmählichen Übergang zum Kommunismus wird das Wachstum der Produktivkräfte entscheidend vom Niveau, von der Struktur und dem Entwicklungstempo der Energiewirtschaft beeinflußt. Bei der weiteren Verbesserung und Sicherung der Elektroenergieerzeugung, -übertragung und -anwendung erwachsen den Werktätigen mit elektrotechnischen Berufen verantwortungsvolle Aufgaben.

Durch die zielgerichtete Weiterentwicklung der Mikroelektronik und den immer größeren Einsatz der auf dieser Basis geschaffenen Bauelemente in der gesamten Volkswirtschaft entstehen höhere Anforderungen an alle Werktätigen.

Für alle Bereiche der Elektrotechnik/Elektronik sind das zusammengefaßt folgende Forderungen:

- ständiger wissenschaftlich-technischer Fortschritt, insbesondere bei der beschleunigten Durchsetzung neuer Technologien;
- Intensivierung in allen Bereichen der Volkswirtschaft der DDR im Zusammenwirken mit der kontinuierlichen Erfüllung der Staatsplanaufgaben und deren zielgerichteter Übererfüllung;
- Steigerung der Arbeitsproduktivität durch Rationalisierung;
- rationelle und sparsame Anwendung von Energie und Rohstoffen;
- konsequente Erfüllung von Exportverpflichtungen nach Menge und Qualität im Rahmen der sozialistischen ökonomischen Integration wie auch gegenüber dem nichtsozialistischen Wirtschaftsgebiet;
- volle Auslastung von hochproduktiven Maschinen und Anlagen;
- Deckung des begründeten Bedarfs an Ausrüstungen und Zulieferungen für alle Bereiche der Volkswirtschaft;
- Bereitstellung hochwertiger Konsumgüter und Sicherung der Eratzteilversorgung für die Bevölkerung.

Der zukünftige Facharbeiter auf dem Gebiet der Elektrotechnik/Elektronik muß bereit und befähigt sein, diesen gesellschaftlichen Erfordernissen Rechnung zu tragen, weil eine überdurchschnittliche Entwicklung der Elektrotechnik/Elektronik Schlüsselfrage für das Wachstum des ökonomischen Potentials der DDR ist.

## 1.2. Bereiche der Elektrotechnik

Begriffsbestimmung  
„Elektrotechnik“

Die Elektrotechnik ist ein Bereich der Technik. Sie basiert auf der Physik als naturwissenschaftlicher Grundlage. Sie umfaßt die Gesamtheit aller elektrischen Erscheinungen, die damit verbundenen objektiven Naturgesetze und wissenschaftlichen Gesetze, Prinzipien, Regeln und deren zielgerichtete Anwendung und Nutzung in der Volkswirtschaft.

Damit dient die Elektrotechnik dem Menschen zur bewußten Veränderung der Natur zum Zwecke der Befriedigung seiner Bedürfnisse. Besondere Bedeutung hat die Erzeugung **elektrischer Energie** und ihre Umwandlung in andere Energiearten.

Bereiche

Leistungselektrotechnik

Sie dient der Bereitstellung benötigter Energie an notwendigen Orten und zu gewünschten Zeiten (Bild 1.1).

Informations-  
elektrotechnik

Sie dient dem Austausch von Informationen zu gewünschten Zeiten über beliebige Entfernung.

Informationsträger sind elektrische Signale (Bild 1.1).

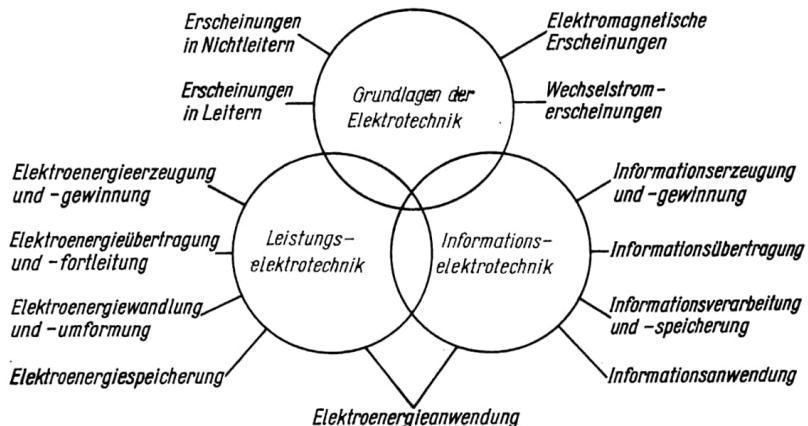


Bild 1.1. Teilbereiche der Elektrotechnik

Eine eindeutige Zuordnung elektrotechnischer Bauelemente, Geräte und Anlagen zu den Bereichen ist nicht immer möglich. Die Bereiche sind sehr eng miteinander verflochten und lassen sich kaum noch trennen.

Beispielsweise werden elektronische Bauelemente, die zur Informationselektrotechnik gehören, seit einigen Jahren verstärkt auch im Bereich der Leistungselektrotechnik verwendet (Bild 1.1).

Grundlagen der  
Elektrotechnik

Objektive Gesetze sowie festgelegte Begriffe und vereinbarte Regeln, die Voraussetzung sind für das Erfassen der speziellen elektrotechnischen Bereiche.

### 1.3. Elektrische Energie als Erscheinungsform der Materie

Begriffsbestimmung  
„Materie“

Materie ist die Gesamtheit der außerhalb und unabhängig vom menschlichen Bewußtsein (menschlichen Denken und Wissen) existierenden objektiven Realität.

Materie hat unendlich viele Erscheinungsformen.

Beispiele:

- feste, flüssige oder gasförmige Stoffe;
- Molekül, Atom, subatomares Teilchen;
- Kraftfelder;
- Energie;
- Licht.

Begriffsbestimmung  
„Energie“

Energie ist eine Erscheinungsform der Materie. Energie charakterisiert einen bestimmten Zustand.

Energie ist das Vermögen eines physikalischen Systems, Arbeit zu verrichten.

Potentielle Energie

Ist die Fähigkeit eines Körpers, auf Grund seiner Lage oder seines Spannungszustandes Arbeit zu verrichten.

$$W_p = F s$$

(1.1)

$W_p$  potentielle Energie,  
F Kraft,  
s Weg.

Kinetische Energie

Muß aufgewendet werden, um einen Körper zu beschleunigen und ihn auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu bringen. Dabei wird Arbeit verrichtet.

$$W_k = \frac{m}{2} v^2$$

(1.2)

$W_k$  kinetische Energie,  
m Masse des Körpers,  
v Geschwindigkeit des Körpers.

Energieerhaltungssatz

In einem geschlossenen System ist die Summe der einzelnen Energien konstant.

$$\Sigma W = \text{konst.}$$

Energieumwandlung

Energie kann weder erzeugt werden, noch kann vorhandene Energie verschwinden. Es treten nur Umwandlungen einer Energieart in andere Arten auf.

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie formulierte Robert Mayer 1842.

(Julius Robert v. Mayer, 1814-1878, deutscher Arzt und Naturforscher)

Energiearten	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Elektrische Energie</li> <li>● Elektromagnetische Energie</li> <li>● Mechanische Energie</li> <li>● Wärmeenergie</li> <li>● Lichtenergie</li> <li>● Kernenergie</li> </ul>
Energieformen in der Elektrotechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Energie ruhender elektrischer Ladungen</li> <li>● Energie strömender elektrischer Ladungen</li> <li>● Elektromagnetische Energie</li> </ul>
	<p>Die Energie ruhender elektrischer Ladungen ist potentielle Energie, die Energie strömender elektrischer Ladungen ist kinetische Energie.</p>
	<p>Es ist ein besonderes Merkmal dieser Energieformen, daß sie mit Feldern verknüpft sind.</p>
Begriffsbestimmung „Feld“	<p>Ein Feld ist ein Raum, in dem jedem Punkt des Raumes ein bestimmter Wert einer physikalischen Größe zugeordnet werden kann.</p>
	<p>Physikalische Größen nennt man Skalare, wenn sie durch ihren Betrag eindeutig gekennzeichnet sind.</p>
	<p>Sind physikalische Größen außerdem richtungsbehaftet, werden sie als Vektoren bezeichnet.</p>
	<p>Man unterscheidet deshalb skalare Felder und Vektorfelder.</p>
Beispiele für skalare Felder	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Höhenlinien einer Landkarte</li> <li>● Isothermen und Isobaren einer Wetterkarte</li> <li>● Temperaturfeld eines Raumes</li> </ul>
Beispiele für Vektorfelder	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Gravitationsfeld der Erde</li> <li>● Geschwindigkeitsverteilung in einer Strömung</li> <li>● elektrische Strömungsfelder</li> <li>● elektrostatische Felder</li> <li>● elektromagnetische Felder</li> </ul>
Feldgrößen	<p>Physikalische Größen, die ein Feld beschreiben.</p>
Beschreibung von Feldern	<p>Es werden unterschieden:</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Wirkungsgrößen – physikalische Größen, die sich in bestimmten Wirkungen, Effekten und Erscheinungen äußern;</li> <li>● Ursachengrößen – physikalische Größen, die als Ursache für bestimmte Erscheinungen und Vorgänge vorhanden sind oder erzeugt werden;</li> <li>● Bedingungs- oder Vermittlungsgrößen – beschreiben die notwendigen Bedingungen, unter denen aus Ursachengrößen Wirkungsgrößen entstehen;</li> <li>● Dichtegrößen sind auf Flächen bezogene Wirkungsgrößen;</li> <li>● Feldstärkegrößen sind auf Längen bezogene Ursachengrößen.</li> </ul>
	<p>Hinweis</p>
	<p>Im vorliegenden Wissensspeicher werden bei der Abhandlung physikalischer Zusammenhänge die Feldgrößen als Skalare betrachtet, weil sich im Unterrichtsfach „Grundlagen der Elektrotechnik“ alle Berechnungen auf homogene Felder beschränken und nur mit den Zahlenwerten dieser Größen gerechnet wird.</p>

## 2. Wesen der Elektrizität

### 2.1. Elektrische Ladungen

**Begriffsbestimmung**  
elektrische Ladungen

Sie kennzeichnen eine Grundeigenschaft bestimmter materieller Erscheinungen, die die elektrischen Vorgänge hervorruft. Elektrische Ladungen sind somit die Ursache aller elektrischen Erscheinungen.

Auf Grund der zwischen Ladungen auftretenden Kraftwirkungen unterscheidet man positive und negative Ladungen.

**Elektrostatisches Kraftwirkungsgesetz**

Gleichnamige Ladungen stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an.

**Elementarladung e**

Der kleinste, nicht mehr teilbare Ladungsbetrag eines Elementarteilchens.

Hinweis

Vgl. Abschn. 3.1.

Elementarteilchen sind u.a.

- Protonen im Atomkern,
- Elektronen in der Atomhülle eines chemischen Elements.

**Elektron**

Träger der negativen Elementarladung.

Elektron:  $Q = -e$

**Proton**

Träger der positiven Elementarladung.

Proton:  $Q = +e$

**Elektrizitätsmenge Q  
(Ladungsmenge)**

Menge von Elementarladungen.

$Q = n(\pm e)$

(2.1)

n Anzahl der Elementarladungen

$n = 1, 2, 3, \dots, k$

Hinweis

Häufig wird für die physikalische Größe „Ladungsmenge“ nur der Begriff „Ladung“ verwendet.

In einem Atom ist die Anzahl der Protonen und Elektronen gleich groß. Das Atom wirkt nach außen elektrisch neutral (Bild 2.1).

**Ionen**

Werden Elektronen durch Energieeinwirkung aus dem Atomverband entfernt oder ihm hinzugefügt, ist das Atom nicht mehr elektrisch neutral. Man nennt diese durch Energie veränderten Atome oder Moleküle (Atomgruppen) Ionen.

**Positive Ionen**

Elektronenmangel: positiv geladen

**Negative Ionen**

Elektronenüberschuss: negativ geladen

## Kennzeichen elektrischer Ladungen

- Zwischen elektrischen Ladungen wirken Kräfte.
- Elektrische Ladungen können unter dem Einfluß von Energie bewegt werden.
- Elektrisch geladene Körper streben den neutralen Zustand an (Ausgleichsbestreben).
- Träger beweglicher elektrischer Ladungen sind Elektronen und Ionen.

## 2.2. Elektrische Leiter, Halbleiter, Nichtleiter

Die elektrischen Eigenschaften der Elemente lassen sich aus ihrer Stellung im Periodensystem der Elemente, der Anzahl der Elektronen auf der äußersten Schale, erklären.

Sind die äußersten Schalen nicht voll mit Elektronen besetzt, kann eine freie Beweglichkeit der Elektronen angenommen werden. Die Anzahl der frei beweglichen elektrischen Ladungsträger ist bei verschiedenen Stoffen unterschiedlich (vgl. Bild 2.1).

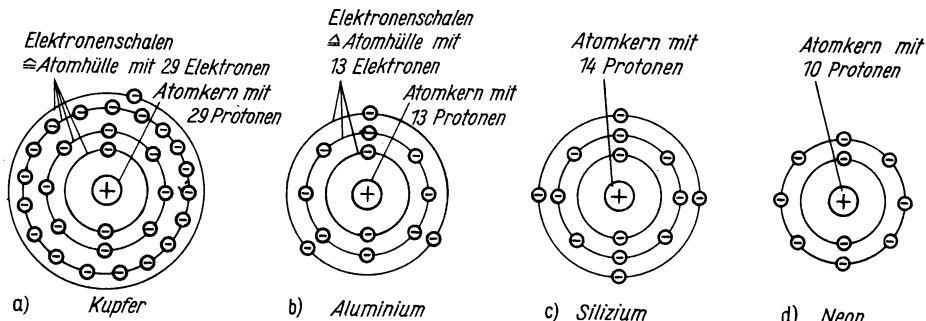


Bild 2.1. Vereinfachte schematische Darstellung verschiedener chemischer Elemente  
 a), b), c) äußere Elektronenschale nicht voll besetzt  
 d) äußere Elektronenschale voll besetzt (stabile Edelgaskonfiguration)

### Elektrische Leiter Elektronenleiter (Leiter 1. Klasse)

Elektrische Leiter  
 Halbleiter  
 Nichtleiter



Anzahl frei beweglicher Ladungsträger

groß  
 gering  
 fast keine

Ladungsträger sind frei bewegliche Elektronen. Die Atome stellen Leitungselektronen zur Verfügung (vgl. Tafel 2.1). Diese Elektronen „wimmeln“ in Zickzackbewegungen zwischen den im Kristallgitter angeordneten positiven Ionen wie die Moleküle eines Gases – sie bilden ein sog. Elektronengas.  
 Zu den Elektronenleitern gehören

- alle Metalle,
- Metalllegierungen.

Durch die Ladungsbewegung tritt kein Stofftransport ein.

### Supraleiter

Bei zahlreichen Metallen, Legierungen und nichtmetallischen Verbindungen steigt die elektrische Leitfähigkeit bei einer Temperatur

Tafel 2.1. Anzahl der frei beweglichen Elektronen und der Atome einiger Leiterwerkstoffe

Leiterwerkstoff	Anzahl der frei beweglichen Elektronen je cm <sup>3</sup>	Anzahl der Atome je cm <sup>3</sup>
Silber	$3,6 \cdot 10^{22}$	$5,85 \cdot 10^{22}$
Kupfer	$3,4 \cdot 10^{22}$	$8,4 \cdot 10^{22}$
Aluminium	$2,2 \cdot 10^{22}$	$8,25 \cdot 10^{22}$
Platin	$1,4 \cdot 10^{22}$	$6,6 \cdot 10^{22}$
Zink	$5,8 \cdot 10^{21}$	$6,6 \cdot 10^{22}$
Blei	$4,5 \cdot 10^{21}$	$3,3 \cdot 10^{22}$
Quecksilber	$4,3 \cdot 10^{20}$	$4,09 \cdot 10^{22}$

in der Nähe des absoluten Nullpunktes sprungartig auf sehr hohe Werte an. Diese Erscheinung wird als Supraleitung bezeichnet. Die Kryotechnik untersucht diese Erscheinungen und wendet sie technisch für verlustarme Energieübertragung an. Die Bedeutung dieses jungen Zweiges der Elektrotechnik wird weiter wachsen.

#### Ionenleiter (Leiter 2. Klasse)

Ladungsträger sind positive Ionen (Kationen) und negative Ionen (Anionen).

Zu den Ionenleitern gehören

- Elektrolyte,
- ionisierte Gase (Plasma).

Durch die Ionenbewegung tritt ein Stofftransport auf.

#### Halbleiter

Ladungsträger sind Elektronen und Defektelektronen. Hinsichtlich der Anzahl frei beweglicher Ladungsträger nehmen sie eine Zwischenstellung zwischen Leitern und Nichtleitern ein. Im Vergleich zu Kupfer beträgt die Anzahl der freien Elektronen je Volumeneinheit etwa den 10<sup>9</sup>-ten Teil.

Wichtige Halbleiterwerkstoffe sind

- Germanium, Silizium, Selen und deren Verbindungen,
- Graphit,
- Indiumverbindungen,
- Galliumverbindungen.

Hinweis

Siehe dazu auch „Werkstoffkunde Elektroberufe“.

#### Nichtleiter (Isolierstoffe)

Enthalten keine oder nur wenige frei bewegliche Ladungsträger.

Wichtige Nichtleiter sind

- Vakuum und Gase unter bestimmten Bedingungen,
- Öle, Fette, Benzine, Alkohole, destilliertes Wasser,
- Glimmer, Quarz, Marmor, Schiefer, Bernstein,
- Harz, Holz, Lacke, Hartpapier, Keramik.

Hinweis

Vgl. hierzu Tafel 4.1.

### 3. Elektrische Erscheinungen in Leitern

#### 3.1. Elektrisches Strömungsfeld

Begriffsbestimmung  
„elektrisches  
Strömungsfeld“

Das elektrische Strömungsfeld ist das Feld bewegter elektrischer Ladungen.

Wesen und  
Erscheinungen

Das elektrische Strömungsfeld

- ist ein räumlicher Zustand der Materie,
- ist eine mögliche Erscheinungsform der Materie,
- bildet sich in Leitern aus.
- Die Maßgrößen sind richtungsbehaftet (Vektorfeld).
- Die Feldlinien sind in sich geschlossen.

Wirkungen

Das elektrische Strömungsfeld ist nur an seinen Wirkungen erkennbar und nachweisbar. Die Wirkungen sind die des elektrischen Stromes (vgl. Abschn. 3.3.1.2.).

#### 3.2. Darstellung und Erscheinungen des elektrischen Strömungsfeldes

Feldlinien

Sie veranschaulichen das elektrische Strömungsfeld und stellen die makroskopischen Bahnen der bewegten Ladungsträger dar. Sie werden als Strom- oder Strömungslinien bezeichnet. Der Verlauf des Strömungsfeldes wird durch Stromlinien veranschaulicht.

- Die Stromlinien haben eine bestimmte Richtung.
- Die Dichte der Stromlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des Strömungsfeldes.
- Infolge des Kraftwirkungsgesetzes (vgl. Abschn. 2.1.) wirken Zugkräfte längs der Stromlinien und Druckkräfte quer zu den Stromlinien.
- Die Stromlinien sind in sich geschlossen.

Richtung der  
Feldlinien

Festlegung: Die Feldlinien (Stromlinien) im elektrischen Strömungsfeld verlaufen in Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger.

Arten elektrischer  
Strömungsfelder

Parallel-homogene  
Felder linienhafter  
Leiter

Strömungsfelder sind homogen, wenn die Stromlinien parallel zueinander verlaufen und überall die gleiche Dichte aufweisen.

Inhomogene Felder

Strömungsfelder sind inhomogen, wenn eine der Bedingungen für ein homogenes Feld nicht erfüllt ist.

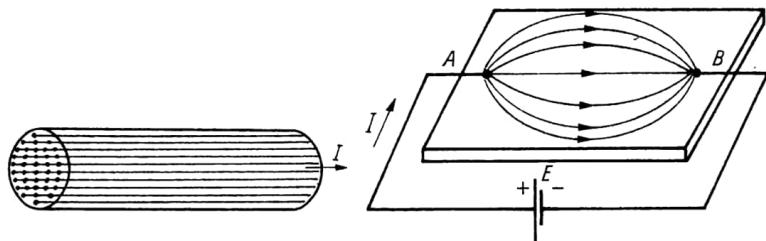


Bild 3.1

Strömungsfeld eines linienhaften Leiters mit gleichbleibendem Querschnitt

Bild 3.2

Strömungsfeld eines flächenhaften Leiters

### 3.3. Meßgrößen des elektrischen Strömungsfeldes

Das elektrische Strömungsfeld kann durch physikalische Größen beschrieben und erfaßt werden.

Dabei sind zu unterscheiden:

- Wirkungsgrößen,
- Bedingungsgrößen (Vermittlungsgrößen),
- Ursachengrößen.

Diese Größen erfassen mathematisch die Zusammenhänge zwischen Wesen und Erscheinungen des Feldes, kennzeichnen den Einfluß geometrischer Abmessungen und beschreiben die verschiedenen Materialien unter Einwirkung des Feldes.

Physikalische Größe

Eine physikalische Größe läßt sich als Produkt eines Zahlenwertes und einer standardisierten Einheit ausdrücken.

Physikalische Größe = Zahlenwert · Einheit

#### 3.3.1. Strom, Stromstärke und Stromdichte

##### 3.3.1.1. Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen

Begriffsbestimmung  
„Wirkungsgröße  
Strom“

Der elektrische Strom ist die Gesamtheit aller durch den elektrischen Leiter in einer Richtung bewegten Ladungen. Er bewirkt die elektrischen Erscheinungen im Leiter. Träger von bewegten elektrischen Ladungen können Elektronen oder Ionen sein.

Hinweis

Bei Halbleiterwerkstoffen sind auch Defektelektronen Träger elektrischer Ladungen.

Der Verlauf der Stromlinien, der Bahnen der bewegten Ladungsträger, entspricht der räumlichen Verteilung des Stromes im Strömungsfeld.

Stromröhre

Der Raum zwischen benachbarten Stromlinien wird als Stromröhre bezeichnet (Bilder 3.3 und 3.4). In dieser Stromröhre fließt ein bestimmter Teilstrom  $\Delta I$ . Somit setzt sich der Gesamtstrom, der

durch einen Leiter fließt, aus den Teilströmen aller Stromröhren zusammen.

$$I = \sum \Delta I$$

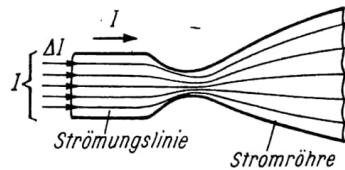


Bild 3.3  
Strömungsfeld eines Leiters mit Querschnittsveränderung

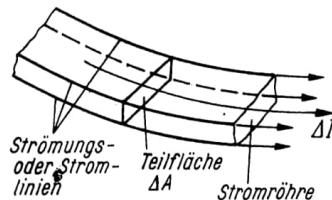


Bild 3.4  
Darstellung einer Stromröhre

Die Intensität der Wirkungen des Stromes wird durch die Stromstärke ausgedrückt.

**Begriffsbestimmung  
„Stromstärke“**

Die Stromstärke ist die in einem Zeitabschnitt  $\Delta t$  durch den Querschnitt eines Leiters bewegte Elektrizitätsmenge  $\Delta Q$ .

Formelzeichen

I

Physikalischer  
Zusammenhang

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

(3.1)

Einheit

Ampere

$$[I] = 1 \text{ A}$$

• Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ kA} = 1 \text{ Kiloampere} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ mA} = 1 \text{ Milliampere} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A} = 1 \text{ Mikroampere} = 10^{-6} \text{ A}$$

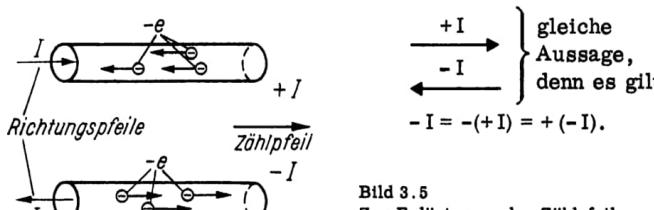
$$1 \text{ nA} = 1 \text{ Nanoampere} = 10^{-9} \text{ A}$$

Ampere

Grundeinheit. Sie wird mit Hilfe der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes (vgl. Abschn. 3.3.1.2.) festgelegt und durch eine Kraftmessung bestimmt (vgl. Abschn. 5.9.3.). (André Marie Ampère, 1775–1836, französischer Physiker)

Tafel 3.1. Technische Richtwerte für Größenordnungen der Stromstärke

Geräte/Bauelemente	Stromstärke A	Geräte/Bauelemente	Stromstärke A
Telefonfernhörer	$10^{-5}$	Elektrische Haushaltswärmegeräte	$2 \dots 10$
Elektronenröhren	$10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-1}$	Straßenbahnmotoren	$200 \dots 400$
Halbleiterbauelemente	$10^{-3} \dots 10^3$	Elektroschweißgerät	500
Glühlampen und Scheinwerferlampen	$10^{-1} \dots 10^2$	Gasgleichrichter	$1 \cdot 10^3$
		Aluminiumschmelzofen	$16 \cdot 10^3$
		Elektrostahlofen	$12 \cdot 10^4$

Elektrizitätsmenge	Formelzeichen	Q	
Physikalischer Zusammenhang		$Q = I \cdot t$	(3.1a)
Einheit		Coulomb $[Q] = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$ $= 1 \text{ C}$	
	● Weitere gesetzliche Einheiten:		
		$1 \text{ A} \cdot \text{h} = 1 \text{ Amperestunde} = 1 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ A} \cdot \text{s}$ $= 3,6 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{s}$	
Coulomb		Elektrizitätsmenge, die während 1 s bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A durch den Querschnitt des Leiters bewegt wird. (Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806, französischer Physiker)	
Betrag der Elementarladung e		$e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	
Definition der Stromrichtung		Die Stromrichtung ist positiv definiert in Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger.	
		Diese festgelegte Stromrichtung wurde früher irreführend als „technische Stromrichtung“ bezeichnet.	
		Elektronen bewegen sich also entgegen der festgelegten positiven Stromrichtung. Stromrichtung wird durch Richtungspfeile angegeben.	
Zählpfeile		Werden häufig in elektrotechnischen Schaltungen verwendet. Der Zählpfeil einer Größe gibt an, daß die Größe in der angegebenen Richtung positiv gezählt wird. Die Richtung des Zählpfeiles kann willkürlich festgelegt werden.	
			
		Bild 3.5 Zur Erläuterung des Zählpfeils	
		Durch die Wahl eines Zählpfeiles können positive oder negative Vorzeichen bei den Stromstärken auftreten.	
	Hinweis		
		Bei der Berechnung von elektrischen Schaltungen mit unbekannter Stromrichtung wird die Richtung des Zählpfeiles willkürlich festgelegt. Hat im Ergebnis die errechnete Stromstärke einen negativen Wert, entsprach die festgelegte Richtung nicht der Stromrichtung in dieser Schaltung.	
Erscheinungen des Stromes	Der Strom ist		
		● eine räumliche Erscheinungsform der Materie; ● eine in sich geschlossene, gerichtete Erscheinung; ● die Wirkungsgröße der elektrischen Erscheinungen im Leiter;	

- nur an seinen Wirkungen erkennbar;
- mit einer Erwärmung des Leiters verbunden.

Hinweis

Eine Ausnahme bilden Supraleiter (vgl. Abschn. 2.2.);

- in Ionenleitern mit einem Stofftransport verbunden;
- von einem Magnetfeld begleitet.

### Grundmeßschaltung

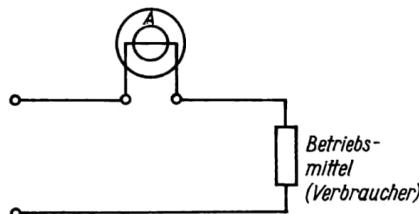


Bild 3.6. Grundschatzung für Stromstärkemessungen

Dichtegröße  
Stromdichte

Beschreibt die Verteilung der Stromstärke  $\Delta I$  in einer bestimmten, vom Strom durchsetzten Querschnittsfläche  $\Delta A$ .

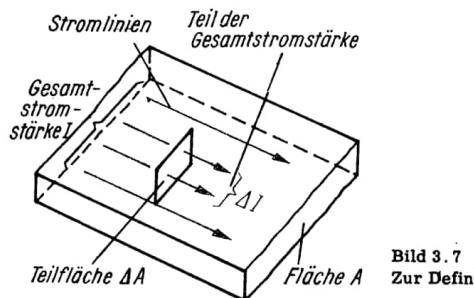


Bild 3.7  
Zur Definition der Stromdichte

Die Stromdichte ist also ein Maß für die Stromdurchsetzung eines Leiters.

Formelzeichen

S

Physikalischer  
Zusammenhang

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta A} \quad (3.2)$$

Einheit

$$[S] = 1 \frac{A}{m^2}$$

Hinweis

In der Praxis wird vorwiegend mit der Einheit  $1 \frac{A}{mm^2}$  gerechnet.

Begriffsbestimmung  
„Stromdichte“

Die Stromdichte ist die einem Gebiet des Feldes zugeordnete, die räumliche Strömung charakterisierende Größe.

Die Dichte der Stromlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des elektrischen Strömungsfeldes.

Ist die Stromstärke gleichmäßig über die Fläche verteilt, gilt

$$S = \frac{I}{A} . \quad (3.2a)$$

Die Stromdichte ist eine wichtige Größe bei der Bemessung von Leiterquerschnitten. In TGL 200-0613 sind den standardisierten Leiterquerschnitten entsprechende Höchststromstärken zugeordnet (Strombelastbarkeit von Leitungen).

Tafel 3.2. Ausgewählte Belastbarkeiten elektrischer Leiterquerschnitte nach TGL 200-0613 (ohne Berücksichtigung von Einschränkungen)

Leiterquerschnitt mm <sup>2</sup>	Belastbarkeit Kupferleiter A	Aluminiumleiter A
0,5	12	-
1	20	-
1,5	26	-
2,5	36	27
4	50	37
6	63	50
10	86	67
16	117	90
25	155	120
50	240	187
95	365	282
120	425	328
240	640	502
300	735	578

### 3.3.1.2. Wirkungen des elektrischen Stromes

Wärmewirkung	Bei der Bewegung durch den Leiter stoßen die Ladungsträger mit den Atomen des Metallgitters zusammen und übertragen ihnen dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie. Die Energieaufnahme der Atome äußert sich in ihrer größeren thermischen Bewegung und einer Temperaturerhöhung des Werkstoffs. Die Energie der Ladungsträger wandelt sich in Wärmeenergie um (s. hierzu Abschn. 3.8.1.2.).
Magnetische Wirkung	Bewegte elektrische Ladungsträger erzeugen in ihrer Umgebung ein magnetisches Feld. Elektromagnetische Erscheinungen werden im Abschn. 5. behandelt.
Chemische Wirkung	Durch den elektrischen Strom können chemische Reaktionen ausgelöst werden, z.B. Zersetzung dissoziierter chemischer Verbindungen in stromdurchflossenen Flüssigkeiten.
Lichtwirkung	Nach Energieaufnahme können Atome, Moleküle oder Ionen Lichtenergie in Form elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen des sichtbaren Spektrums wieder abgeben. Es werden Temperaturstrahler (mit Wärmewirkung verbunden) und Lumineszenzstrahler unterschieden (s. hierzu Abschn. 3.8.1.2.).
Wirkungen auf den Menschen	Sind abhängig von <ul style="list-style-type: none"> <li>● Einwirkdauer,</li> <li>● Stromstärke,</li> <li>● Stromweg im menschlichen Körper,</li> </ul>

- Frequenz,
- körperlicher Verfassung und dem Gewicht des Menschen.

Die Empfindlichkeit des Menschen gegenüber dem elektrischen Strom ist bei Wechselstrom bis 200 Hz größer als bei Gleichstrom. Sie ist von der Einwirkdauer und vom Stromweg abhängig. Die Stärke des Stromes ist vom jeweiligen Gesamtwiderstand des menschlichen Körpers, dieser wiederum von der anliegenden Spannung und der Einwirkzeit des Stromes abhängig.

Nützliche Wirkungen (Elektromedizin)	Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren werden die Wirkungen des elektrischen Stromes bewußt in der Medizin zur Behandlung erkrankter Menschen mit Erfolg genutzt.
Schädigende Wirkungen (Unfallgefahr)	Unfälle durch elektrischen Strom bei unwillkürlicher Einwirkung des Stromes auf den Menschen (Tafel 3.3). Ein Stromweg, in den der Herzmuskel einbezogen ist, hat stets lebensgefährliche oder tödliche Wirkungen.

Tafel 3.3. Wirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper

Stromstärkebereich	Physiologische Reaktion	Wechselstrom 15...200 Hz, Effektivwert	Gleichstrom	
I	geringe Muskelkontraktionen in den Fingern Nervenerschüttungen in den Fingern bis zum Unterarm Loslassen der Elektrode gerade noch möglich selbständiges Lösen von der Elektrode nicht mehr möglich	Blutdrucksteigerung, abhängig von der Stromstärke, kein Einfluß auf die Herzschlagfolge und das Reizelektionsystem	0,4...4 mA 0,8...4,5 mA 6...22 mA 8,5...30 mA	1...20 mA 25...40 mA 40...60 mA 60...90 mA
II	noch ertragbare Stromstärke, ohne daß Bewußtlosigkeit eintritt, Blutdrucksteigerung, Herzunregelmäßigkeit; reversibler Herzstillstand bei höherer Stromstärke, teilweise auch schon Bewußtlosigkeit		25...80 mA	80...300 mA
III	Herzammerflimmern, in der Regel Bewußtlosigkeit		80 mA...8 A <sup>1)</sup>	250 mA...8 A
IV	wie Stromstärkebereich II, Blutdrucksteigerung, Herzstillstand, Arrhythmien; Lungenblähung, Verbrennungen, in der Regel Bewußtlosigkeit		> 3 A	> 3 A

<sup>1)</sup> Die Werte gelten für Strome, die über 1 s lang fließen.

#### Unfallverhütung

Um Unfällen durch den elektrischen Strom vorzubeugen, sind die Sicherheitsvorschriften unter allen Umständen einzuhalten.  
Besonders zu beachtende Vorschriften:

- ABAO 900/1
- TGL 200-0601
- TGL 200-0602
- TGL 200-0611
- TGL 200-0619

### 3.3.2. Urspannung, Spannungsabfall, Feldstärke, Potential, Pegel

#### 3.3.2.1. Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten, Richtungsfestlegungen

Ladungsträger sind stets massebehaftet. Um diese (wenn auch äußerst geringen) Massen bewegen zu können, ist Energie erforderlich.

Begriffsbestimmung  
„elektrische  
Spannung“

Die elektrische Spannung ist die Energiedifferenz  $\Delta W$  einer Elektrizitätsmenge  $\Delta Q$  zwischen zwei Punkten A und B, bezogen auf diese Elektrizitätsmenge.

Formelzeichen

U

Physikalischer  
Zusammenhang

$$U = \frac{\Delta W_{AB}}{\Delta Q}$$

(3.3)

Einheit

Volt

$$[U] = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ C}} = 1 \text{ V}$$

• Weitere gesetzliche Einheiten:

$$\begin{aligned} 1 \text{ MV} &= 1 \text{ Megavolt} = 10^6 \text{ V} \\ 1 \text{ kV} &= 1 \text{ Kilovolt} = 10^3 \text{ V} \\ 1 \text{ mV} &= 1 \text{ Millivolt} = 10^{-3} \text{ V} \\ 1 \text{ } \mu\text{V} &= 1 \text{ Mikrovolt} = 10^{-6} \text{ V} \end{aligned}$$

Tafel 3.4. Spannungsbereiche in der Elektrotechnik

Bezeichnung	Spannungsbereiche	Anwendungsbeispiele
Kleinspannung	$0 < U \leq 42 \text{ V}$	elektromechanisches Spielzeug
Niederspannung	$0 \text{ V} < U \leq 1 \text{ kV}$	Betriebsnetze aller Art, Haushalte, Gewerbe
Mittelspannung	$1 \text{ kV} < U \leq 30 \text{ kV}$	Hochspannungsfreileitungen
Hochspannung	$1 \text{ kV} < U \leq 110 \text{ kV}$	und -kabel
Höchstspannung	$110 \text{ kV} < U \leq 1 \text{ MV}$	Höchstspannungsfreileitungen (Stand 1975)

Tafel 3.5. Technische Richtwerte für Größenordnungen der Spannung

Einrichtung	Spannung V	Einrichtung	Spannung V
Antennenspannung	$(5 \dots 50) \cdot 10^{-6}$	Straßenbahn, U- und S-Bahn	$500 \dots 800$
Nervenspannung	$(0,5 \dots 5) \cdot 10^{-2}$	Zündkerze im Kraftwagenmotor	$(5 \dots 15) \cdot 10^3$
Bleiakkumulatorzelle	2		
Fahrraddynamo	6	Fahrdrahtspannung der Deutschen Reichsbahn	$15 \cdot 10^3$
Elektrokarren	bis 80		
Hausspannungsanschluß	220 oder 380	Röntgenröhren	$bis 2 \cdot 10^5$
		Bandgeneratoren	$bis 5 \cdot 10^6$

## Volt

Ein Volt ist die Spannung zwischen zwei Punkten eines homogenen und gleichmäßig temperierten metallischen Leiters, in dem bei einem zeitlich unveränderlichen Strom der Stärke 1 A zwischen den beiden Punkten eine Leistung von 1 W (s. Abschn. 3.8.2.) umgesetzt wird. (Alessandro Volta, 1745–1827, italienischer Physiker)

Bei Bewegung einer Elektrizitätsmenge  $\Delta Q$  sind zwei Möglichkeiten des Energieaustausches vorhanden:

- Erhöhung der Energie der Ladungsmenge,
- Energieabgabe der Ladungsmenge.

Entsprechend diesen beiden Möglichkeiten wird zwischen Ursprungsspannung und Spannungsabfall unterschieden.

## Ursachengröße Ursprungsspannung

Ist die in einer Spannungsquelle „erzeugte“ Spannung. Die Spannungsquelle erhöht die Energie der Ladungsträger. Die Ursprungsspannung charakterisiert den Bewegungsdrang der Ladungsträger. Sie ist die Ursache des Stromflusses.

Energieaufnahme durch Energieumwandlung.

### Hinweis

In neuen Standards wird die Ursprungsspannung als Quellenspannung bezeichnet.

Die Bezeichnung „Spannungsquelle“ (auch „elektrische Energiequelle“) kennzeichnet lediglich die Umwandlungsstelle verschiedener Energiearten in elektrische Energie (vgl. Abschn. 1.3.).

### Formelzeichen



### Physikalischer Zusammenhang

$$U_0 = \frac{\Delta W_{AB \text{ zugef}}}{\Delta Q}$$

(3.3 a)

### Einheit

### Volt

$$[E] = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ C}} = 1 \text{ V}$$

### Allgemeines Schaltzeichen einer (Gleich-)Ursprungsspannungsquelle

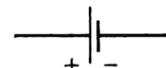


Bild 3.8.

## Definition der Richtung der Ursprungsspannung

Die Ursprungsspannung ist positiv definiert in Antriebsrichtung positiver Ladungsträger.

Die Richtung der Ursprungsspannung wird durch Richtungspfeile gekennzeichnet (Bild 3.9).

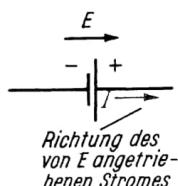


Bild 3.9. Richtungsfestlegung der Ursprungsspannung

## Spannungsabfall

Ist die Energieabgabe  $\Delta W$  einer Elektrizitätsmenge  $\Delta Q$  zwischen zwei Punkten A und B, bezogen auf diese Elektrizitätsmenge.

Energieabgabe durch Energieumwandlung

Die Ursache des Spannungsabfalls ist der elektrische Strom.

Formelzeichen

$U_{AB}$

Physikalischer Zusammenhang

$$U_{AB} = \frac{\Delta W_{AB \text{ abgeg}}}{\Delta Q} \quad (3.3b)$$

Einheit

Volt

$$[U] = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ C}} = 1 \text{ V}$$

Definition der Richtung des Spannungsabfalls

Der Spannungsabfall ist positiv definiert in Bewegungsrichtung positiver Ladungen.

## Grundmeßschaltung

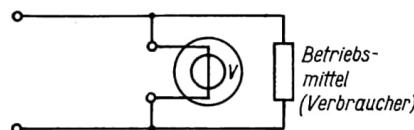


Bild 3.10. Grundschaltung für Spannungsmessungen

Die Richtung des Spannungsabfalls wird durch Richtungspfeile gekennzeichnet.

Wie beim elektrischen Strom können auch Zählpfeile verwendet werden. Bei Gleichspannungen wählt man den Spannungs-Zählpfeil in Richtung des Strom-Zählpfeiles, um positive Ergebnisse zu erhalten (Bild 3.11).

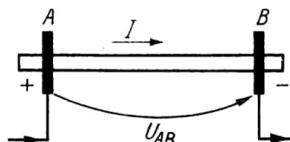


Bild 3.11  
Richtungsfestlegung des Spannungsabfalls

Um die Größe der Kraftwirkungen auf Ladungen im elektrischen (Strömungs-) Feld beschreiben zu können, wird die elektrische Feldstärke eingeführt.

## Feldstärke

Formelzeichen

$E$

Physikalischer Zusammenhang

$$E = \frac{F}{Q} \quad (3.4)$$

Begriffsbestimmung  
„elektrische Feldstärke“

Die elektrische Feldstärke ist eine Meßgröße des elektrischen Feldes, die die Erscheinungen des elektrischen Strömungsfeldes und des elektrostatischen Feldes beschreibt (vgl. Abschnitt 4.3.2.).

Befindet sich eine Ladung  $Q$  im Kraftfeld einer anderen Ladung, so ist die Kraft  $F$  proportional der Ladung.

Die elektrische Feldstärke bildet den Proportionalitätsfaktor der Beziehung

$$F \sim Q.$$

Sie kann auch als Maß für den Spannungsabfall zwischen zwei betrachteten Feldpunkten bezeichnet werden.

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta l} \quad (3.5)$$

Einheit  $[E] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ m}}$

Potential

Treten in einer Schaltung mehrere Spannungen auf, wird häufig ein gemeinsamer Bezugspunkt für alle Spannungen gewählt.

Ein elektrisches Potential ist die Anhäufung einer bestimmten Ladungsträgermenge gleicher Polarität.

Dabei wird das Potential als die auf einen Punkt bezogene Spannung ausgedrückt.

Der Bezugspunkt ist Potentialnullpunkt. Er ist frei wählbar (z. B. unendlich weit entfernt; Erde, Masse) und hat das Potential Null.

Formelzeichen  $\varphi$  (Phi)

Physikalischer Zusammenhang  $\varphi = U_1 - U_0$

$U_1$  Spannung am Punkt 1,  
 $U_0$  Spannung am Potentialnullpunkt

Einheit  $[\varphi] = 1 \text{ V}$

Die Potentiale erhalten die gleichen Vorzeichen wie die Spannungsabfälle vom jeweiligen Punkt zum Bezugspunkt.

Potentialdifferenz

Die Spannung zwischen zwei beliebigen Punkten einer Schaltung ist gleich der Differenz der Potentiale beider Punkte (Bild 3.12).

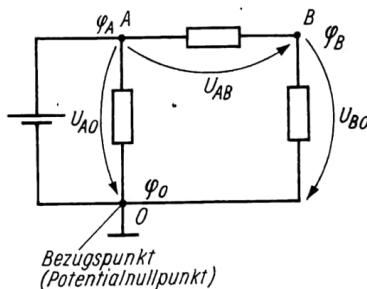


Bild 3.12  
Zur Potentialbetrachtung

Es gilt

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B. \quad (3.6)$$

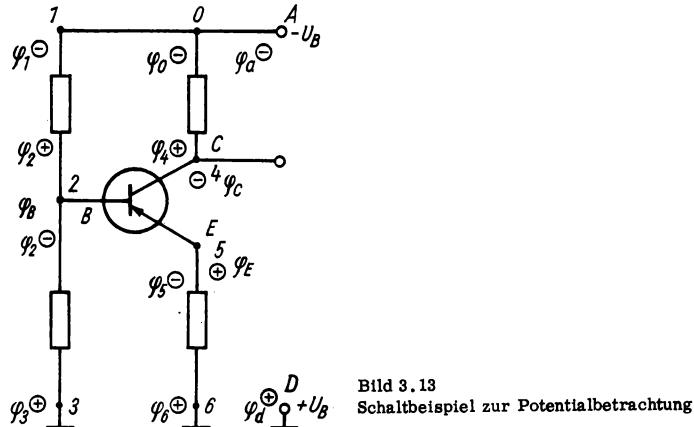
$$U_{AB} > 0, \text{ wenn } \varphi_A > \varphi_B;$$

$$U_{AB} < 0, \text{ wenn } \varphi_A < \varphi_B.$$

$$\varphi_A = U_{A0} - 0; \varphi_B = U_{B0} - 0;$$

$$U_{AB} = U_{A0} - U_{B0}.$$

Man formuliert z. B. solche bezogenen Aussagen (vgl. Bild 3.13):  
Die Spannung am Punkt A ist negativer als die Spannung am Punkt D  
der Schaltung.  
Beide Spannungen sind positiv gegenüber dem Potentialnullpunkt.



Aus Bild 3.13 folgt auch:

1.  $\varphi_a = \varphi_0 = \varphi_1$ ,  
 $\varphi_d = \varphi_6 = \varphi_3$ .
  2.  $\varphi_1$  ist negativ gegenüber  $\varphi_2$ .
  3.  $\varphi_2$  ist negativ gegenüber  $\varphi_3$ .
  4.  $\varphi_2$  ist weniger negativ als  $\varphi_1$ , bezogen auf  $\varphi_3$   
usw.

Daraus ergibt sich:

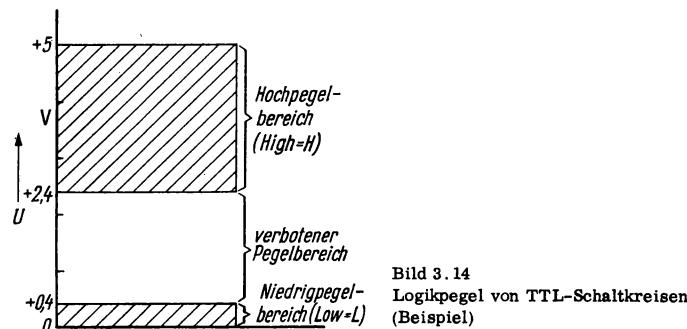
... weniger negativ → positiv.  
... weniger positiv → negativ

Diese Betrachtungsweise ist für das Verstehen elektronischer Schaltungen sehr bedeutsam.

## Pegel

Ein Pegel kennzeichnet oder legt fest, welche Spannung oder welches Potential an bestimmten Schaltungspunkten oder beim Einsatz bestimmter Schaltungen vorhanden sein müssen.

Vor allem in der Informationselektronik (z. B. Elektroakustik,



Signalübertragungstechnik) und in der elektronischen Datenverarbeitung verwendet.

Ein typisches Anwendungsgebiet sind die integrierten Schaltkreise (vgl. Bild 3.14). Hier werden Pegelbereiche angegeben.

### 3.3.2.2. Urspannungserzeugung

**Prinzip** In jeder Anordnung, in der eine Ladungstrennung erfolgt, wird eine elektrische Urspannung erzeugt.

**Verfahren** Urspannungserzeugung durch

- elektromagnetische Induktion (z. B. in Generatoren),
- chemische Vorgänge (z. B. bei galvanischen Elementen),
- thermoelektrische Verfahren (z. B. mit Thermoelementen),
- Lichteinwirkung auf bestimmte Materialien (z. B. auf Fotoelemente, Fotodioden, Fototransistoren).

In jedem Fall wird die elektrische Urspannung durch Energieumwandlung anderer Energiearten in elektrische Energie gewonnen.

**Hinweis**

Vgl. hierzu Abschn. 3.8.1.2.

### 3.3.3. Elektrische Leitfähigkeit – Zusammenhang zwischen Feldstärke und Stromdichte

**Einfluß des Materials** Im Zusammenhang zwischen Feldstärke und Felddichtegröße kommt immer der Einfluß des Leitermaterials zum Ausdruck. Die Stromdichte ist proportional der Feldstärke.

Der Proportionalitätsfaktor ist eine vom Material abhängige Konstante.

**Elektrische Leitfähigkeit** Die Materialkonstante wird als elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  (Kappa) bezeichnet.

**Physikalischer Zusammenhang** 
$$\mathbf{S} = \kappa \mathbf{E} \quad (3.7)$$

**Begriffsbestimmung** Die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  eines Werkstoffs ist ein Maß für das Vermögen, den elektrischen Strom zu leiten. Sie ist abhängig von der Konzentration der Leitungselektronen (vgl. Tafel 2.1) und von der Ladungsträgerbeweglichkeit.

**Spezifischer Widerstand** Der reziproke Wert der Leitfähigkeit wird als spezifischer Widerstand  $\rho$  (Rho) bezeichnet.

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad (3.8)$$

**Hinweis**

Vgl. hierzu Abschn. 3.4.1.2. und Tafel 3.7.

### 3.4. Zusammenhänge zwischen Spannung und Strom im elektrischen Strömungsfeld

#### 3.4.1. Elektrischer Widerstand

##### 3.4.1.1. Elektrischer Leitwert und elektrischer Widerstand

Bedingungsgröße  
des elektrischen  
Strömungsfeldes

Es wird definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

Hinweis

Ebenso kann der reziproke Wert des Quotienten definiert werden.

Elektrischer  
Leitwert

Im elektrischen Strömungsfeld wird der elektrische Leitwert als Bedingungsgröße eingeführt.

Formelzeichen

G

Physikalischer  
Zusammenhang

$$G = \frac{I}{U}$$

(3.9)

(Gültigkeitsbedingung: homogener, linearer,  
gleichmäßig temperierter Leiter.)

Einheit

Siemens

$$[G] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V}} = 1 \text{ S}$$

(Werner von Siemens, 1816–1892, deutscher Ingenieur)

Eigenschaft  
Leitvermögen

Der Leitwert G ist ein Maß für die Stromdurchlässigkeit eines Leiters.

Je kleiner das Leitvermögen eines elektrischen Leiters ist, um so mehr widersetzt er sich dem Durchfluß des elektrischen Stroms, d.h., um so kleiner ist der Leitwert.

Bei besserem Leitvermögen ist die stromvermindernde Wirkung geringer.

Diese Eigenschaften können einem elektrotechnischen Bauelement zugeordnet werden.

Elektrischer  
Widerstand

Allgemeines  
Schaltzeichen

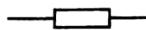


Bild 3.15.

Formelzeichen

R

Physikalischer  
Zusammenhang

$$R = \frac{1}{G}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

(3.10); (3.11)

(Gültigkeitsbedingung: homogener, linearer,  
gleichmäßig temperierter Leiter.)

Einheit

Ohm

$$[R] = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = \frac{1}{\text{S}} = 1 \Omega$$

- Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ m}\Omega = 1 \text{ Milliohm} = 10^{-3} \Omega$$

$$1 \text{ k}\Omega = 1 \text{ Kilohm} = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 1 \text{ Megaohm} = 10^6 \Omega$$

Ohm

Ein 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. (Georg Simon Ohm, 1789-1854, deutscher Physiker)

Grundbauelement  
elektrischer  
Widerstand.

Grundbauelement des elektrischen Strömungsfeldes ist der elektrische Widerstand. Er ist das Bauelement, an dem konzentriert eine Energieumwandlung auftritt. Er wird meist industriell mit einem bestimmten Widerstandswert gefertigt.

Begriffsbestimmung  
„elektrischer  
Widerstand“

Die Bezeichnung „Widerstand“ wird auch für die Eigenschaft elektrischer Leiter, Halbleiter und Nichtleiter, stromhemmend zu wirken, verwendet.

Der elektrische Widerstand ist ein Maß für die Größe der Behinderung eines Stromflusses.

### 3.4.1.2. Bemessungsgleichung des elektrischen Widerstandes

Bemessung von  
Widerständen

Der elektrische Widerstand ist eine Konstruktionsgröße, die in der Praxis vorausbestimmbar ist.

Der Widerstand eines Leiters ist um so größer,

- je größer der spezifische Widerstand ist,
- je länger der Leiter ist,
- je kleiner der Querschnitt des Leiters ist.

Unter der Voraussetzung eines homogenen Strömungsfeldes (Leiters) mit überall gleicher Stromdichte gilt

Bemessungs-  
gleichung

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (3.12)$$

$$\text{oder mit Gleichung (3.8) } \rho = \frac{1}{\kappa} \quad (3.12)$$

$$R = \frac{1}{\kappa A} \quad (3.12a)$$

R Widerstand in  $\Omega$ ,

l Leiterlänge in m,

A Leiterquerschnitt in  $\text{mm}^2$ ,

$\rho$  spezifischer Widerstand in  $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ ,

$\kappa$  Leitfähigkeit in  $\frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$ .

### 3.4.1.3. Temperaturabhängigkeit von Widerständen

Der Widerstand eines Leiters wird nicht nur von den Abmessungen und den Materialeigenschaften, sondern auch von seiner Temperatur bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit von Widerständen ist mit den Bewegungsgesetzen von Ladungsträgern in den einzelnen Werkstoffen zu erklären.

Der Temperaturkoeffizient oder Temperaturbeiwert  $\alpha$  drückt die Temperaturabhängigkeit aus.

Begriffsbestimmung  
„Temperatur-  
koeffizient“  $\alpha$

Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  ist die relative Widerstandsänderung je Grad Temperaturänderung.

$$\text{Einheit} \quad \frac{1}{\text{Kelvin}}$$

$$[\alpha] = \frac{1}{K}$$

Tafel 3.6. Richtgrößen des Temperaturkoeffizienten einiger Leiterwerkstoffe

Leiterwerkstoff	$\alpha$	Verhalten von R bei Temperaturerhöhung
Reine Metalle	$\approx + 4 \frac{0/00}{K}$	Zunahme von R
Spezielle Metallegierungen (z. B. Konstantan)	$\approx 0$	$R \approx \text{konst.}$
Halbleiter, (Kohle), Elektrolyte	$< 0$	Abnahme von R

Tafel 3.7. Spezifischer Widerstand  $\varrho$ , Leitfähigkeit  $\alpha$  und Temperaturkoeffizient  $\alpha_{20}$  und  $\beta_{20}$  von Leiterwerkstoffen

Werkstoff	$\varrho$ $\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	$\alpha$ $\text{S} \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2}$	$\alpha_{20}$ $\frac{1}{\text{K}}$	$\beta_{20}$ $\frac{1}{\text{K}^2}$
Silber	0,016	62,5	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	0,01786	56	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$
Bronze	0,018...0,056	55...18	-	-
Gold	0,023	44	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	0,02857	35	$3,77 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Magnesium	0,045	22	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Wolfram	0,055	18	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Zink	0,063	16	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Messing	0,07...0,09	14...11	$1,5 \cdot 10^{-3}$	-
Nickel	0,08...0,11	13...9	$(3,7...6) \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Eisen	0,10...0,15	10...7	$(4,5...6) \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Zinn	0,11	9,1	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Platin	0,11...0,14	9...7	$(2...3) \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$
Blei	0,21	4,8	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Novokonstant <sup>1)</sup>	0,45	2,3	$0,01 \cdot 10^{-3}$	-
Konstantan <sup>2)</sup>	0,5	2,0	$-0,35 \cdot 10^{-5}$	-
Quecksilber	0,96	1,04	$0,92 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Wismut	1,2	0,83	$4,2 \cdot 10^{-3}$	-

1) Novokonstant: 82,5 % Cu; 12 % Mn; 4 % Al; 1,5 % Fe

2) Konstantan: 54 % Cu; 45 % Ni; 1 % Mn

Es gilt

$$R_t = R_{20} \left[ 1 + \alpha_{20} (t - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) \right] \quad (3.13)$$

$R_t$  Widerstandswert bei Temperatur  $t$  in  $\Omega$ ,

$R_{20}$  Widerstandswert bei  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  in  $\Omega$ ,

$\alpha_{20}$  Temperaturkoeffizient für  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  in  $\frac{1}{\text{K}}$ .

Gl. (3.13) gilt nur für Temperaturen bis etwa  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Bei höheren Temperaturen ist der Widerstand mit nachstehender Gleichung zu berechnen:

$$R_t = R_{20} \left[ 1 + \alpha_{20} (t - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) + \beta_{20} (t - 20 \text{ } ^\circ\text{C})^2 \right] \quad (3.14)$$

Der zweite Temperaturkoeffizient  $\beta$  hat die Einheit  $1/\text{K}^2$ .

### 3.4.2. Spannungs-Strom-Verhalten von Widerständen

Durch die Gleichung  $R = \frac{U}{I}$  ist der Widerstand eines Leiters bei einer bestimmten Spannung bzw. einem bestimmten Strom festgelegt. Zur genaueren Kennzeichnung wird das Spannungs-Strom-Verhalten des Widerstandes betrachtet.

Kennlinie

Die grafische Darstellung der Funktion  $U = f(I)$  ist die Kennlinie des Widerstandes.

Nach dem Verlauf der Kennlinien unterscheidet man

- lineare Spannungs-Strom-Charakteristik,
- nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik.

#### 3.4.2.1. Lineare Spannungs-Strom-Charakteristik

Experimentell wurde von G. S. Ohm ermittelt, daß bei Metallen und Metallelegierungen unter konstanten Bedingungen das Verhältnis von Spannung zu Stromstärke konstant ist.

Ohmsches Gesetz

$$R = \frac{U}{I} = \text{konst.} \quad (3.15)$$

Das Ohmsche Gesetz ist ein Naturgesetz.

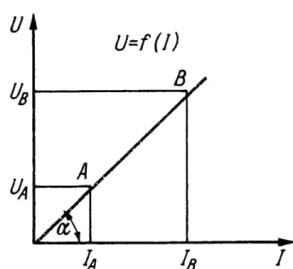


Bild 3.16  
Kennlinie eines linearen Widerstandes

Linearer Widerstand Ändert sich  $U_{AB}$  proportional zur Stromstärke  $I$  (Bild 3.16)

$$U_{AB} = \text{konst.} \cdot I,$$

so gilt nach Gl. (3.11)

$$\frac{U_{AB}}{I} = R_{AB} = \text{konst.}$$

Man spricht von einem linearen oder ohmschen Widerstand.

### 3.4.2.2. Nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik

Nichtlinearer Widerstand

Ändert sich  $U_{AB}$  bzw. ein beliebiges  $\Delta U$  nicht proportional zu einer Stromstärkeänderung  $\Delta I$ , bzw. ändert sich der Widerstand in Abhängigkeit von der Stromstärke (Bild 3.17), wird dieser als nichtlinearer Widerstand bezeichnet. Für nichtlineare Widerstände werden zwei charakteristische Kenngrößen definiert:

- Gleichstromwiderstand,
- differentieller Widerstand.

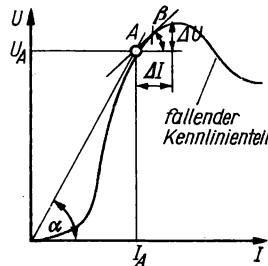


Bild 3.17  
Kennlinie eines nichtlinearen Widerstandes

Gleichstromwiderstand

Er wird durch das Steigungsmaß der Sekante vom Nullpunkt durch den Arbeitspunkt (z. B. A) bestimmt.

Der Gleichstromwiderstand ist stets positiv.

$$R = \frac{U_A}{I_A} \hat{=} \tan \alpha$$

Differentieller Widerstand

Er kennzeichnet die Steigung der Kennlinie  $U = f(I)$  in einem Punkt und ist definiert als Quotient einer Spannungsänderung und der entsprechenden Stromänderung in diesem Arbeitspunkt (z. B. A).

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \hat{=} \tan \beta$$

Im Gegensatz zum Gleichstromwiderstand kann der differentielle Widerstand auch negativ sein. Das ist der Fall, wenn eine Spannungszunahme mit einer Stromabnahme verbunden ist oder umgekehrt (fallende Kennlinie).

Die Nichtlinearität bestimmter Widerstände ist zurückzuführen auf

- Spannungsabhängigkeit (z. B. Varistoren),
- Temperaturabhängigkeit (z. B. Thermistoren),
- Lichtabhängigkeit (z. B. Fototransistoren).

## Spannungsabhängige Widerstände

Die Kennlinien spannungsabhängiger Widerstände können unsymmetrisch (Verlauf 1 im Bild 3.18) oder symmetrisch (Verlauf 2 im Bild 3.18) sein. Der Verlauf gibt Aufschluß, ob der Stromfluß von der Spannungsrichtung (oder Polarität) abhängig ist.

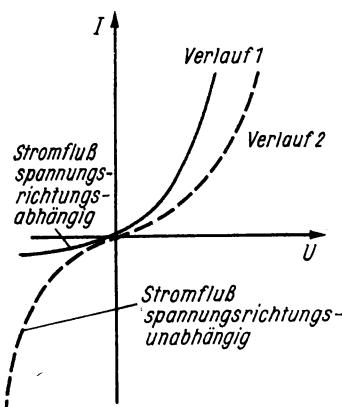


Bild 3.18  
Kennlinie spannungsabhängiger Widerstände

## Temperaturabhängige Widerstände

Temperaturabhängige nichtlineare Widerstände werden unterschieden in

- Kaltleiter (positiver Temperaturkoeffizient),
- Heißleiter (negativer Temperaturkoeffizient).

Der überwiegende Teil der Metalle sind Kaltleiter.

Kaltleiter mit hohem Temperaturkoeffizienten werden als Temperaturfühler, Stromkonstanthalter u.a. eingesetzt.

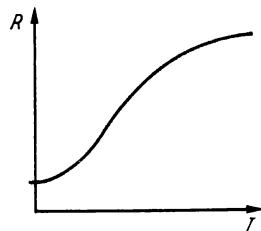


Bild 3.19  
Widerstandsverlauf eines Kaltleiters

Heißleiter werden zur Temperaturmessung, zur Kompensation eines positiven Temperaturkoeffizienten (als Anlaß- und Regelheißleiter) verwendet. Sie bestehen aus Metalloxiden.

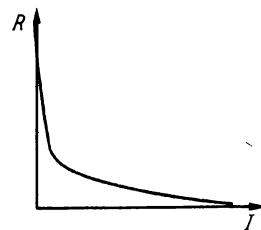
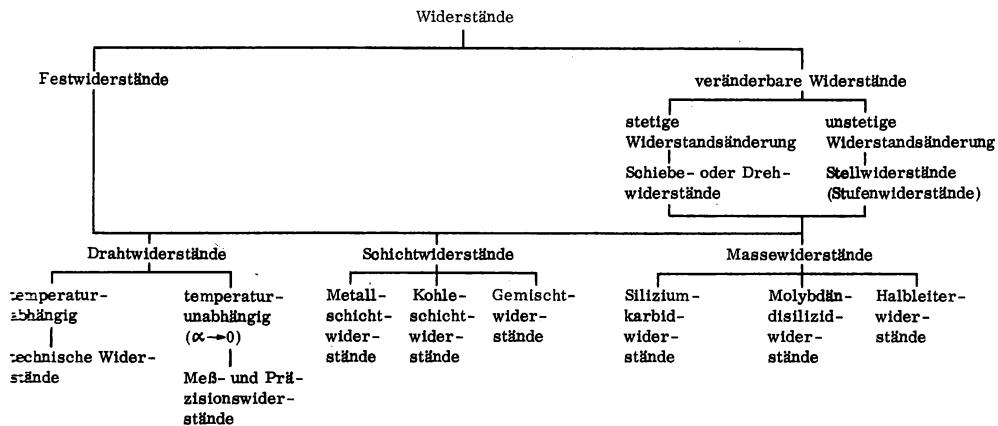


Bild 3.20  
Widerstandsverlauf eines Heißleiters

Tafel 3.8. Einteilung von Widerständen



Einweis: Siehe hierzu auch Wissensspeicher „Elektronik-Bauelemente“.

## 3.5. Elektrische Stromkreise

### 3.5.1. Grundstromkreis und seine Elemente

#### Grundstromkreis

Er ist eine Grundschaltung der Elektrotechnik, auf die sich auch komplizierte Schaltungen zurückführen lassen (Bild 3.21). Jeder Grundstromkreis besteht aus einem inneren Teil und einem äußeren Teil.

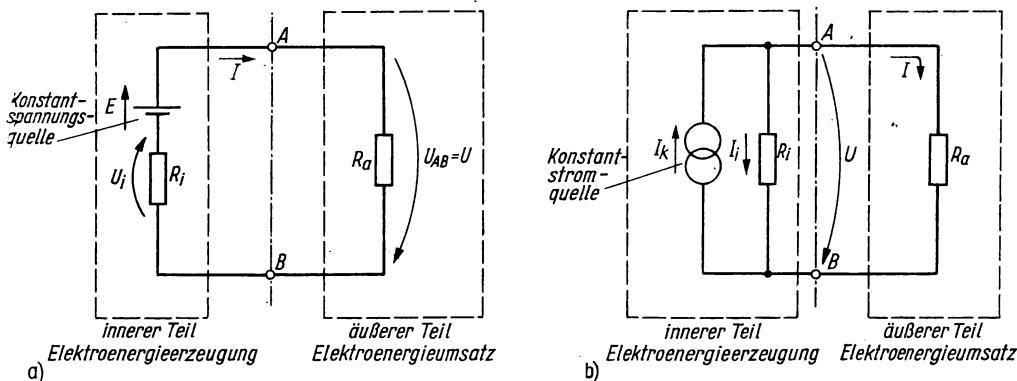


Bild 3.21. Ersatzschaltungen  
a) Spannungsquellenersatzschaltung  
b) Stromquellenersatzschaltung

#### Innerer Teil

Er umfaßt die **Spannungsquelle** mit dem ihr zugeordneten **Innenwiderstand  $R_i$** .

Die Spannungsquelle erzeugt eine Urspannung  $E$ .

In Schaltungen der Informationselektronik (z.B. beim Einsatz von integrierten Analogschaltkreisen) wird oft eine „**Stromquelle**“ mit konstanter Stromlieferfähigkeit angegeben, die die Berechnungen vereinfacht („**Konstantstromquelle**“, „**Einströmung**“).

Bei der Spannungsquelle wird ein unendlich kleiner Innenwiderstand vorausgesetzt, dagegen bei der „Stromquelle“ ein unendlich großer.

#### Äußerer Teil

Er erfaßt das Betriebsmittel oder den „Verbraucher“ mit einem bestimmten Außenwiderstand  $R_a$ . Am Betriebsmittel steht die Klemmenspannung  $U_{AB} = U$  zur Verfügung.

#### Aktiver Zweipol

Ein aktiver Zweipol ist eine elektrotechnische Energieumsatzstelle, die in der Lage ist, zwischen zwei Anschlußklemmen eine konstante elektrische Urspannung zu erzeugen bzw. einen konstanten elektrischen Strom anzutreiben.

Der innere Widerstand veranschaulicht dabei den Energieumsatz im Inneren der Spannungsquelle.

Bild 3.22 wird als Spannungsquellenersatzschaltung bezeichnet.

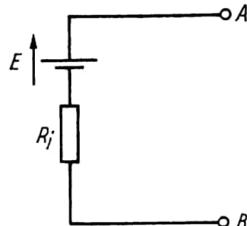


Bild 3.22. Spannungsquellenersatzschaltung eines aktiven Zweipols

#### Passiver Zweipol

Ein passiver Zweipol ist eine elektrotechnische Energieumsatzstelle mit zwei Anschlüsse ohne innere Urspannung, an der elektrische Energie in eine andere Energieform gewandelt wird.

Bei einem passiven Zweipol (Bild 3.23) muß die umgesetzte Energie nicht in jedem Fall aus dem Stromkreis heraustreten - (z. B. in Form von Wärme wie bei einem Widerstand, vgl. auch Abschnitte 4. und 5.).

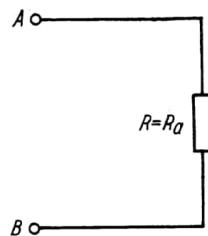


Bild 3.23  
Passiver Zweipol

#### Berechnungsgrundlagen (Bild 3.21)

Nach dem Ohmschen Gesetz kann geschrieben werden

$$U_i = I R_i; \quad U_{AB} = U = I R_a.$$

Urspannung

$$E = I(R_i + R_a) \quad (3.16)$$

Durch Verhältnisbildung entsteht

$$\frac{U}{E} = \frac{R_a}{R_i + R_a} . \quad (3.16 \text{ a})$$

Klemmenspannung  $U = E - I R_i \quad (3.16 \text{ b})$

Strom  $I = \frac{E}{R_i + R_a} \text{ (für } R_a \gg R_i\text{)} \quad (3.16 \text{ c})$

Bei Kurzschluß der Spannungsquelle gilt

$$I_K = \frac{E}{R_i} \text{ für } R_a = 0 . \quad (3.17 \text{ a})$$

Im Grundstromkreis ist in der Spannungsquellenersatzschaltung

$$I = \frac{E}{R_i + R_a} . \quad (3.16 \text{ c})$$

Anstelle der Konstantspannungsquellenschaltung (Bild 3.21 a) ist also eine Konstantstromquellenschaltung denkbar (Bild 3.21 b).

Es gilt damit rechnerisch für die „Stromquelle“

$$\frac{I}{I_K} = \frac{R_i}{R_i + R_a} . \quad (3.16 \text{ d})$$

### 3.5.2. Betriebszustände elektrischer Stromkreise

In jedem elektrischen Stromkreis sind die Belastungsverhältnisse von Bedeutung. Unter Belastung versteht man die durch den Widerstand angeschlossener Betriebsmittel beeinflußte größere oder kleinere Stromstärke.

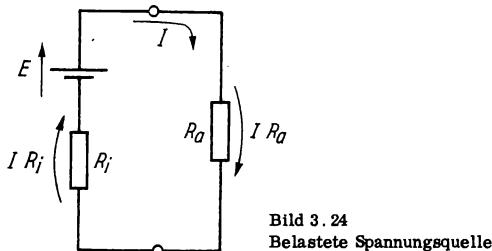
Allgemein gilt

$I \uparrow$   steigende Belastung,

$I \downarrow$   fallende Belastung.

Ein Betriebszustand ist in der Elektrotechnik das Vorhandensein einer bestimmten Belastung.

Belastung Sind Außenwiderstände bestimmter Größe vorhanden, so liegt Belastung der Spannungsquelle vor.



Dabei ist jeder beliebige Belastungsfall zwischen Kurzschluß und Leerlauf möglich.

$$0 < R_a < \infty$$

$$\infty > I > 0$$

Bei der Belastung werden in der Praxis noch andere Möglichkeiten unterschieden, z.B. Nennbelastung, Überbelastung, Unterbelastung, zulässige Dauerbelastung u.a.

Im Grundstromkreis ergeben sich folgende Verhältnisse bei Belastung:

$$0 < R_a < \infty \rightarrow \infty > I > 0 \rightarrow U = E - I R_i \quad (3.17)$$

$$U < E$$

Für jede belastete Spannungsquelle gilt:

Bei Belastung ist die Klemmenspannung stets kleiner als die erzeugte Uspannung.

Kurzschluß

Ein Kurzschluß ist eine widerstandslose Verbindung zweier oder mehrerer Potentialpunkte.

Er ist ein Extremfall der Belastung einer Spannungsquelle.

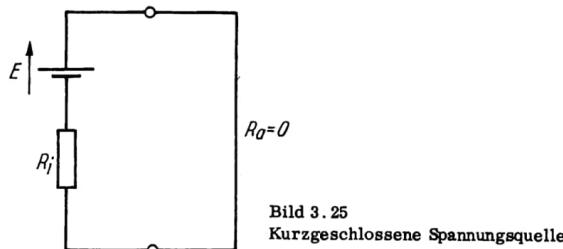


Bild 3.25  
Kurzgeschlossene Spannungsquelle

Nähert sich der Außenwiderstand in einem geschlossenen Stromkreis dem Wert Null oder ist er gleich Null, so spricht man von einem Kurzschluß der Spannungsquelle.

In diesem Fall erreicht der Strom ein Maximum.

Allgemein gilt:

$$R_a \rightarrow 0 \text{ (Realfall)}$$

$$R_a = 0 \text{ (Idealfall)}$$

$$I \quad \text{Maximalwert}$$

Im Grundstromkreis gilt bei Kurzschluß:

$$R_a = 0 \rightarrow I = I_K = \frac{E}{R_i} \rightarrow U = 0 \quad (3.17a)$$

Im Realfall kann ein vollkommener Kurzschluß nicht erreicht werden, da ein absoluter Leiter (vgl. Abschn. 2.2.) in der Technik nicht vorhanden ist.

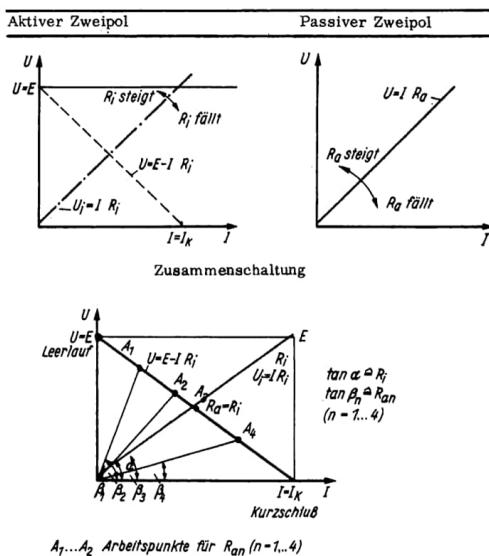
Für jede kurzgeschlossene Spannungsquelle gilt:

Bei einem Kurzschluß hat die Klemmenspannung den Wert Null.

Tafel 3.9. Gesamtverhalten des Grundstromkreises

	Leerlauf	Belastung	Kurzschluß	Anpassung
Außenwiderstand	$R_a = \infty$	$0 < R_a < \infty$	$R_a = 0$	$R_a = R_i$
Stromstärke	$I = 0$	$I = \frac{E}{R_i + R_a}$	$I = I_K = \frac{E}{R_i}$	$I = \frac{I_K}{2}$
Klemmenspannung	$U = E$	$U = E - I R_i$	$U = 0$	$U = \frac{E}{2}$
Urspannung	$E$	$E$	$E$	$E$

Tafel 3.10. Funktionale Zusammenhänge im Grundstromkreis



Leerlauf

Ein Leerlauf liegt vor, wenn der Stromkreis zwischen aktivem und passivem Zweipol nicht geschlossen ist.

Er ist ein Extremfall der Belastung einer Spannungsquelle.

Nähert sich der Außenwiderstand in einem Stromkreis dem Wert unendlich oder ist er unendlich, so spricht man vom Leerlauf der Spannungsquelle. Der Strom erreicht ein Minimum oder wird gleich Null. Allgemein gilt:

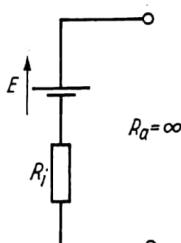
$R_a \rightarrow \infty$  (Realfall)  
 $R_a = \infty$  (Idealfall)  
 $I$  Minimalwert

Im Grundstromkreis gilt bei Leerlauf:

$$R_a = \infty \rightarrow I = 0 \rightarrow U = E$$

(3.17b)

Bild 3.26. Spannungsquelle im Leerlauf



Im Realfall kann ein vollkommener Leerlauf nicht erreicht werden, da ein absoluter Nichtleiter (vgl. Abschn. 2.2.) in der Technik nicht existiert. Für jede leerlaufende Spannungsquelle gilt:

Bei Leerlauf hat die Klemmenspannung den Wert der Leerlaufspannung oder Urspannung.

Anpassung

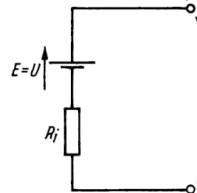
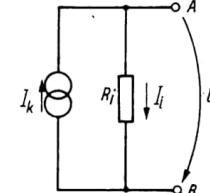
Ein Sonderfall der Belastung liegt vor, wenn Außenwiderstand und Innenwiderstand der Quelle gleich groß sind. Strom und Spannung betragen die Hälfte ihrer Maximalwerte. Dabei liegt am Außenwiderstand die höchstmögliche Leistung. (Vgl. Abschn. 3.8.3.)

Es gilt im Grundstromkreis:

$$R_a = R_i \rightarrow I = \frac{E}{2R_i} = \frac{I_K}{2} \rightarrow U_{Ra} = \frac{E}{2} \quad (3.17 \text{ c})$$

Dieser Betriebsfall ist vor allem in der Informationselektronik sehr bedeutsam.

Tafel 3.11. Ersatzdarstellungen aktiver Zweipole

	Spannungsquellen- ersatzschaltung	Stromquellen- ersatzschaltung
Ausgangspunkt	Leerlauf der Spannungsquelle	Kurzschluß der Stromquelle
Ersatzschaltung		
Berechnung	$\frac{U}{E} = \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (3.16 \text{ a})$	$\frac{I}{I_K} = \frac{R_i}{R_i + R_a} \quad (3.17)$
Praktische Anwendung	bei $R_i \ll R_a$ alle üblichen Spannungsquellen (Primär- und Sekundär- elemente; Generatoren)	bei $R_i \gg R_a$ bei Berechnung elektronischer Schaltungen (z. B. mit Transistoren, integrierten Schaltkreisen)
Zweck	Nachbildung des Verhaltens nach außen	Nachbildung des Verhaltens nach außen
Anwendungsbereich	Leistungselektronik	Informationselektronik

## 3.6. Erweiterte Stromkreise und ihre Berechnungsgesetze

### 3.6.1. Arten erweiterter Stromkreise, Begriffsbestimmungen

Erweiterter Stromkreis

Liegt vor, wenn in einem elektrischen Stromkreis mehr als eine Spannungsquelle oder (und) mehr als ein Betriebsmittel (Verbraucher) vorhanden sind. Spannungsquellen und Verbraucher können in vielfältiger Weise durch Leitungen verknüpft sein.

Verzweigter Stromkreis

Reihenschaltung (Serien- oder Hintereinanderschaltung) der Stromkreiselemente (Bild 3.27).

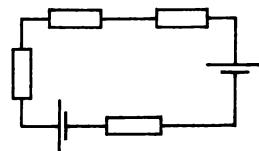


Bild 3.27  
Reihenschaltung

Verzweigter Stromkreis

Parallelschaltung (Nebeneinanderschaltung) oder Gemischtschaltung der Stromkreiselemente (Bilder 3.28 und 3.29).

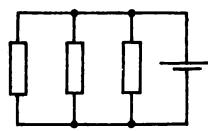


Bild 3.28  
Parallelschaltung

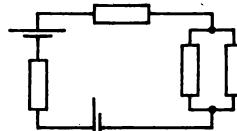


Bild 3.29  
Gemischtschaltung

Netzwerk

Zusammenschaltung mehrerer Stromkreise.

Knotenpunkt

Punkt im Stromkreis, in dem eine Stromverzweigung auftritt.

Zweig

Der zwischen zwei benachbarten Knotenpunkten liegende Stromkreis- teil, wenn in ihm mindestens eine Spannungsquelle und (oder) ein Verbraucher enthalten sind.

Masche

Die Aneinanderreihung von Zweigen zu geschlossenen Umläufen (Bild 3.30).

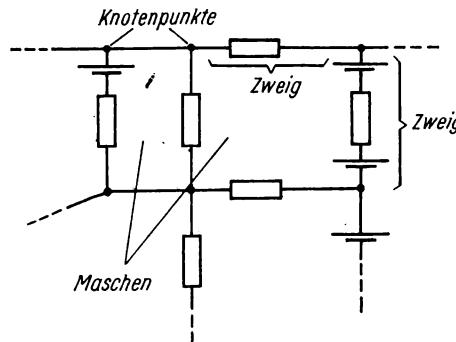


Bild 3.30. Zu den Begriffen Knotenpunkt, Zweig, Masche

Vermaschter Stromkreis

Zusammenschaltung mehrerer Spannungsquellen und Betriebsmittel in verschiedenen Zweigen.

### 3.6.2. Kirchhoffsche Gesetze

Knotenpunktsatz

(1. Kirchhoffsches Gesetz)

(Gustav Robert Kirchhoff,  
1824-1887,  
deutscher Physiker)

Da der elektrische Strom eine in sich geschlossene Erscheinung ist, gilt:

Die Summe aller zum Knotenpunkt hinfließenden Ströme ist gleich der Summe aller vom Knotenpunkt wegfließenden Ströme.

$$\sum_{k=1}^n I_k = \sum_{l=1}^m I_l$$

(3.18)

Aus Gl. (3.18) folgt

$$\sum_{k=1}^n I_k - \sum_{l=1}^m I_l = 0 ,$$

$$\sum_{n=1}^z I_n = 0 .$$

Die vorzeichenbehaftete Summe aller Ströme in einem Knotenpunkt ist Null.

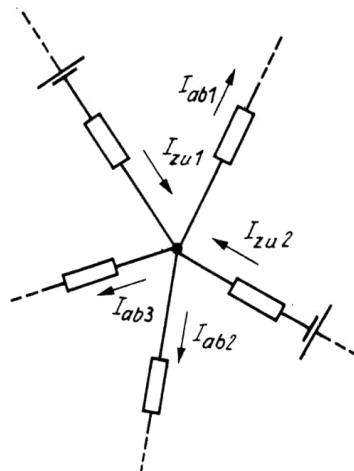


Bild 3.31  
Zur Ableitung des Knotenpunktsatzes

Hinweis

In Gl. (3.18 b) sind in den  $z$  Zweigströmen für die zum Knotenpunkt hinfließenden und für die vom Knotenpunkt wegfließenden Ströme unterschiedliche Vorzeichen festzulegen.

Maschensatz

(2. Kirchhoffsches Gesetz)

Für die Spannung längs eines geschlossenen Umlaufs (Masche) ergibt sich aus der Spannungsdefinition und aus dem Satz von der Erhaltung der Energie:

Die von den Ladungsträgern abgegebene Energie ist gleich der diesen Ladungsträgern zugeführten Energie.

$$W_{\text{zugef}} = W_{\text{abgeg}}$$

Für den im Bild 3.32 dargestellten Stromkreis gilt nach den Zählpfeilfestlegungen (vgl. Abschn. 3.3.1.1.)

$$W_{E1} - W_{E2} = W_{AB} + W_{CD} + W_{EA} .$$

Mit den Gln. (3.3 a) und (3.3 b) gilt

$$E_1 Q - E_2 Q = U_{AB} Q + U_{CD} Q + U_{EA} Q$$

$$\downarrow$$

$$E_1 - E_2 = U_{AB} + U_{CD} + U_{EA} .$$

Es ergibt sich

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{l=1}^m U_l . \quad (3.19)$$

In einer Masche ist die Summe aller Urspannungen gleich der Summe der Spannungsabfälle über den inneren und äußeren Widerständen.

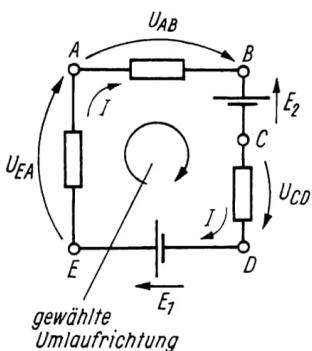


Bild 3.32  
Zur Ableitung des Maschensatzes

Hinweis

Zur Festlegung der Vorzeichen wird eine willkürliche Umlaufrichtung gewählt. Liegen die Zählpfeile in dieser Umlaufrichtung, so sind die entsprechenden Größen in Gl. (3.19) positiv einzusetzen, anderenfalls negativ.

### 3.7. Zusammenschaltung von Zweipolen

#### 3.7.1. Schaltungen elektrischer Widerstände

##### 3.7.1.1. Reihenschaltung von Widerständen

Bei einer Reihenschaltung von Widerständen ist die Stromstärke in allen Widerständen gleich groß.

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

(3.20)

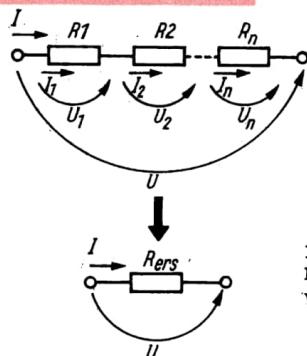


Bild 3.33  
Ersatzschaltplan einer Reihenschaltung  
von Widerständen

Nach dem Maschensatz Gl. (3.18) gilt

**Eigenschaft  
Spannungsteilung**

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

(3.21)

$$\text{Aus } U = \sum_{k=1}^n U_k, \quad I = I_n \text{ und}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

ergibt sich

$$R_{\text{ers}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

**Ersatzwiderstand**

$$R_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n R_k$$

(3.22)

Der Ersatzwiderstand ist gleich der Summe der Einzelwiderstände. Er ist der wirksame Gesamtwiderstand.

#### Hinweis

Bei einer Reihenschaltung von Widerständen ist der Ersatzwiderstand immer größer als der größte Einzelwiderstand.

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (3.13) des Widerstandes gilt:

Die Vergrößerung des Widerstandes bei einer Reihenschaltung ist mit der Vergrößerung der wirksamen Länge des Leiters vergleichbar.

Ersatzwiderstand  
der Reihenschaltung  
n gleicher Wider-  
stände

$$R_{\text{ers}} = n R_n$$

Spannungsteiler-  
gesetz

Nach den Gln. (3.20), (3.21), (3.22) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{oder} \quad \frac{U_1}{U_n} = \frac{R_1}{R_n} \quad (3.23)$$

$$(3.24)$$

Bei einer Reihenschaltung verhalten sich die Teilspannungen wie die dazugehörigen Teilwiderstände.

Technische  
Anwendung  
Unbelasteter  
Spannungsteiler

Eine Reihenschaltung mehrerer Widerstände ist ein Spannungsteiler (Bild 3.34).

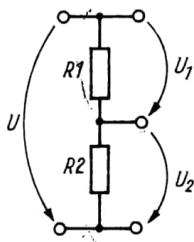


Bild 3.34  
Unbelasteter Spannungsteiler

Besonders in der Informationselektronik und in der Meßtechnik werden Spannungsteiler mit veränderbaren Widerständen (Potentiometer) benötigt, um eine vorhandene Klemmenspannung U aufzuteilen (Bild 3.35).

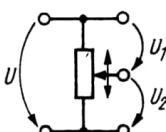


Bild 3.35  
Unbelasteter Spannungsteiler mit veränderlichem Abgriff

Da über den Anschluß zwischen R1 und R2 bzw. über den Abgriff kein Strom fließt, wird diese Schaltung als unbelasteter Spannungsteiler bezeichnet. Unter der Bedingung eines unbelasteten Spannungsteilers gilt

$$U_1 = U \frac{R_1}{R} ; \quad (3.25 \text{ a})$$

$$(3.25 \text{ b})$$

## Meßbereichserweiterung von Spannungsmessern

Läßt man bei Spannungsmessern durch das Vorschalten eines Vorspannungswiderstandes  $R_V$  nur einen bestimmten Teil der zu messenden Spannung  $U_M$  auf das Instrument wirken, können größere Spannungswerte gemessen werden (Bild 3.36).

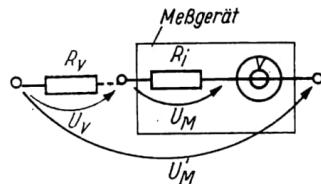


Bild 3.36  
Meßbereichserweiterung beim Spannungsmesser

Die Spannung  $U'_M$  wird so geteilt, daß nur  $U_M$  über dem Innenwiderstand  $R_i$  des Meßgeräts abfällt.

$$\text{Erweiterungsfaktor } n = \frac{\text{neuer Meßbereich}}{\text{ursprünglicher Meßbereich}} = \frac{U'_M}{U_M}$$

$$n = \frac{U'_M}{U_M} = \frac{R_V + R_i}{R_i}$$

$$n = \frac{R_V}{R_i} + 1 \quad (3.26)$$

Bei  $n$ -facher Meßbereichserweiterung errechnet sich  $R_V$  zu

$$R_V = R_i(n - 1). \quad (3.26a)$$

### 3.7.1.2. Parallelschaltung von Widerständen

Bei einer Parallelschaltung von Widerständen liegt über jedem Widerstand die gleiche Spannung.

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (3.27)$$

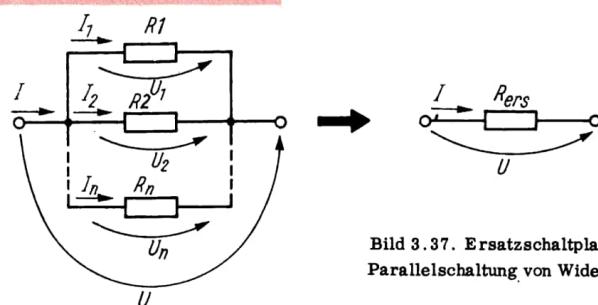


Bild 3.37. Ersatzschaltplan einer Parallelschaltung von Widerständen

### Eigenschaft Stromteilung

Für die Summe der Teilströme gilt nach dem Knotenpunktsatz [Gl. (3.18)]

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (3.28)$$

Aus  $U = U_n$ ;  $I = \sum_{k=1}^n I_k$  und

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{oder} \quad G = \frac{I}{U}$$

ergibt sich

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}; \quad G_{\text{ers}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

Ersatzwiderstand  
und  
Ersatzleitwert

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (3.29)$$

$$G_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n G_k \quad (3.30)$$

Der reziproke Wert des Ersatzwiderstandes ist gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelwiderstände.

#### Hinweis

Bei einer Parallelschaltung von Widerständen ist der Ersatzwiderstand immer kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (3.13) des Widerstandes gilt:

Die Verkleinerung des Widerstandes bei einer Parallelschaltung ist mit der Vergrößerung des wirksamen Querschnitts des Leiters vergleichbar.

Parallelschaltungen von Widerständen lassen sich übersichtlich mit Leitwerten berechnen.

Ersatzwiderstand  
und Ersatzleitwert  
n gleicher Wider-  
stände

$$\frac{1}{R_{\text{ers}}} = \frac{n}{R_n}; \quad G_{\text{ers}} = n G_n$$

$$\frac{R}{R_{\text{ers}}} = \frac{n}{1} \quad (3.31)$$

Ersatzwiderstand  
zweier  
Widerstände

$$R_{\text{ers}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.32)$$

Stromteilergesetz

Nach den Gln. (3.27), (3.28), (3.29) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{oder} \quad \frac{I_1}{I} = \frac{R_{\text{ers}}}{R_1} \quad (3.33 \text{ a})$$

$$(3.33 \text{ b})$$

Mit  $R = \frac{1}{G}$  [Gl. (3.10)] gilt

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} \quad \text{oder} \quad \frac{I_1}{I} = \frac{G_1}{G_{\text{ers}}}. \quad (3.34 \text{ a})$$

$$(3.34 \text{ b})$$

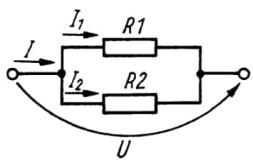


Bild 3.38  
Zum Stromteilergesetz

In einer Parallelschaltung verhalten sich die Teilstromstärken wie die Teilleitwerte.

Die Teilstromstärken verhalten sich also umgekehrt wie die Teilwiderstände.

Tafel 3.12. Vergleichende Betrachtung zu den Größen und Gesetzen

Reihenschaltung	Parallelschaltung	Bemerkungen
Stromstärke I	Spannung U	gleichbleibende Größen
$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$	
Spannung U	Stromstärke I	
$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$	
$U = \sum_{k=1}^n U_k$	$I = \sum_{k=1}^n I_k$	
Maschensatz	Knotenpunktsatz	
$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{l=1}^m U_l$	$\sum_{k=1}^n I_k = \sum_{l=1}^m I_l$	Kirchhoffsche Gesetze
Widerstand R	Leitwert G	
$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$	Widerstands- und
$R = \sum_{k=1}^n R_k$	$G = \sum_{k=1}^n G_k$	
Leitwert G	Widerstand R	Leitwert- beziehungen
$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \dots + \frac{1}{G_n}$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$	
$\frac{1}{G} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{G_k}$	$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$	
Spannungsteilergesetz	Stromteilergesetz	
$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2}$	Teilungs- gesetze

Technische Anwendung  
Meßbereichserweiterung von Strommessern

Wird durch einen Parallelwiderstand (Shunt)  $R_p$  die zu messende Stromstärke  $I_M$  so geteilt, daß nur der Teilstrom  $I_M$  durch das Meßgerät mit seinem Innenwiderstand  $R_i$  fließt, können größere Stromstärken gemessen werden (Bild 3.39).

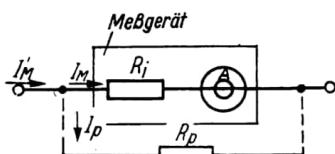


Bild 3.39  
Meßbereicherweiterung beim Strommesser

$$\text{Erweiterungsfaktor } n = \frac{\text{neuer Meßbereich}}{\text{ursprünglicher Meßbereich}} = \frac{I'_M}{I_M}$$

$$n = \frac{I'_M}{I_M} = \frac{R_p + R_i}{R_p}$$

$$n = 1 + \frac{R_i}{R_p} \quad (3.35)$$

Bei  $n$ -facher Meßbereichserweiterung berechnet sich  $R_p$  zu

$$R_p = \frac{R_i}{n - 1} \quad (3.36)$$

### 3.7.1.3. Gemischte Schaltung von Widerständen

Gemischte Schaltungen, ein Beispiel zeigt Bild 3.40, sind besonders für elektronische Schaltungen typisch.

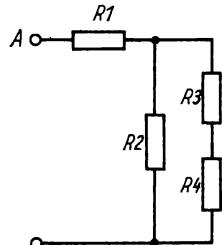
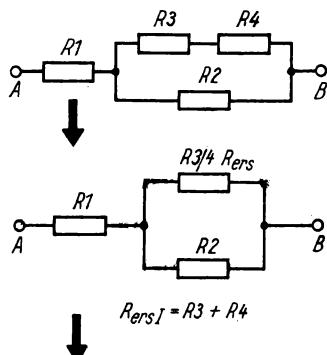


Bild 3.40.  
Beispiel einer Gemischtschaltung  
von Widerständen

Berechnung

Nur schrittweise möglich:



1. Umzeichnen der Schaltung, damit Zweige und Knotenpunkte erkennbar sind,
2. Erkennen und Kennzeichnen der Reihen- bzw. Parallelschaltungen innerhalb der Gemischtschaltung,
3. Berechnen der Ersatzwiderstände von Reihenschaltungen,
4. Berechnen der Ersatzwiderstände von Parallelschaltungen,
5. Berechnen der Reihen- bzw. Parallelschaltungen erfolgt so lange, bis der Ersatzwiderstand der gesamten Schaltung ermittelt ist.

$$R_{ers\text{I}} = R3 + R4$$

$$R_{ers\text{II}} = R2 \parallel (R3 + R4)$$

$$R_{ers} = R1 + R2 \parallel (R3 + R4)$$

Bild 3.41.  
Zur Berechnung von Gemischtschaltungen

### Hinweis

Für die Berechnung der Spannungen und Stromstärken ist sinngemäß das gleiche Prinzip anzuwenden.

### Technische Anwendung Belasteter Spannungsteiler

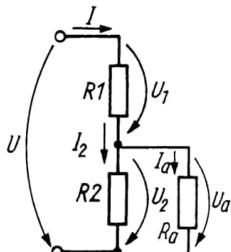


Bild 3.42. Belasteter Spannungsteiler

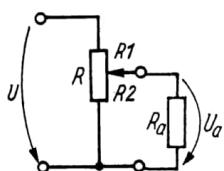


Bild 3.43. Belasteter Spannungsteiler mit veränderlichem Abgriff

Wie in den Bildern 3.42 und 3.43 angegeben, ist parallel zum Teilwiderstand  $R_2$  ein Belastungswiderstand  $R_a$  geschaltet. Der Strom  $I$  verzweigt sich dadurch in die Teilströme  $I_2$  und  $I_a$ .

Für die Spannung  $U_a$  am Belastungswiderstand gilt

$$U_a = U \frac{R_2 R_a}{R_1 R_2 + R_1 R_a + R_2 R_a}$$

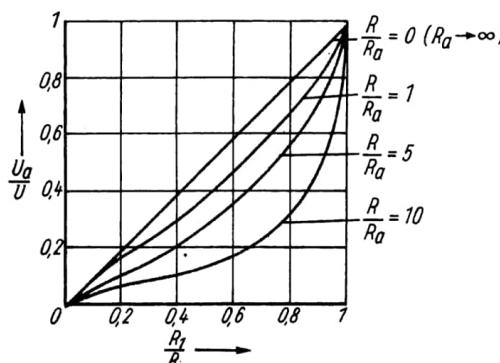


Bild 3.44. Kennlinien des belasteten Spannungsteilers

oder mit  $R_1 = R - R_2$

$$U_a = U \frac{R_2 R_a}{R R_2 + R R_a - R_2^2} \quad (3.37)$$

Im Bild 3.44 sind für verschiedene Belastungswerte die Spannungsverhältnisse  $\frac{U_a}{U}$  dargestellt.

Eine annähernd lineare Spannungsteilung des belasteten Spannungsteilers ist bis zu einem Verhältnis  $\frac{R}{R_a} \approx 5$  möglich.

## 3.7.2. Zusammenschaltung elektrischer Spannungsquellen

### 3.7.2.1. Reihenschaltung von Spannungsquellen

Berechnung

Nach den Gl. (3.19) und (3.22) gilt

$$E_{\text{ers}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

Ersatzurspannung

$$E_{ers} = \sum_{k=1}^n E_k$$

(3.38)

$$R_{iers} = R_{i1} + R_{i2} + \dots + R_{in}$$

Ersatz-  
Innenwiderstand

$$R_{iers} = \sum_{k=1}^n R_{ik}$$

(3.39)

Bei einer Reihenschaltung von Spannungsquellen ist die Gesamturspannung  $E_{ers}$  gleich der Summe der vorzeichenbehafteten Urspannungen und der Ersatzinnenwiderstand  $R_{iers}$  gleich der Summe der Innenwiderstände.

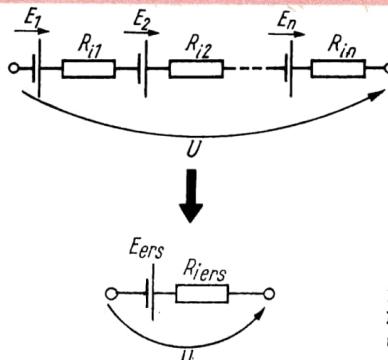


Bild 3.45  
Ersatzschaltplan einer Reihenschaltung von Spannungsquellen

Ersatzurspannung  
n gleicher  
Spannungsquellen

$$E_{ers} = n E$$

(3.40)

Ersatzinnenwider-  
stand n gleicher  
Innenwiderstände

$$R_{iers} = n R_i$$

(3.41)

#### Hinweis

Bei einer Reihenschaltung müssen die einzelnen Spannungsquellen nicht die gleiche Urspannung aufweisen.

Technische  
Anwendung

Reihenschaltungen von Spannungsquellen werden dort vorgenommen, wo eine höhere Spannung, als sie eine einzelne Quelle liefert, benötigt wird (z.B. Reihenschaltung von Batterien aus elektrochemischen Elementen in Taschenlampen, Kofferradios, Kraftfahrzeugen u.a.). Es ist zu beachten, daß die Spannungsquellen etwa die gleiche Strombelastbarkeit haben. Andernfalls werden die Quellen entweder überlastet oder nicht ausgenutzt.

### 3.7.2.2. Parallelschaltung von Spannungsquellen

Berechnung

Nach Gl. (3.27) gilt

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n$$

(3.42)

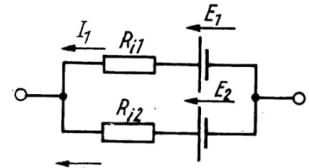
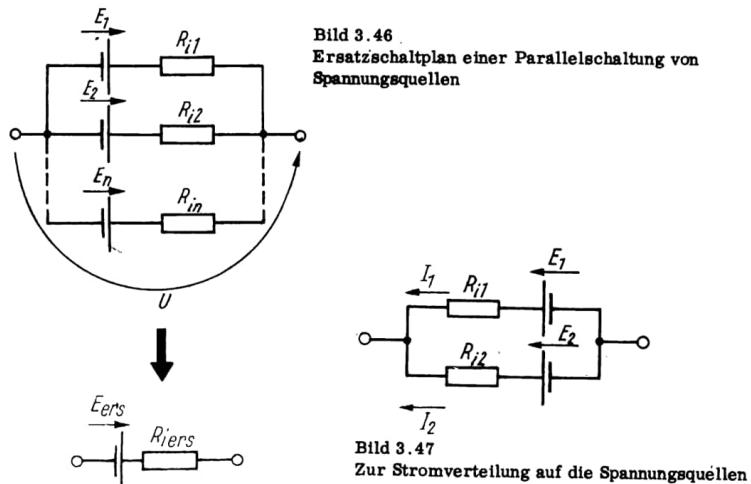
Die Urspannungen aller Spannungsquellen müssen in Betrag und Richtung übereinstimmen.

Bei Nichtbeachtung dieser Forderung fließen z. T. hohe Ausgleichsströme, ohne daß ein Außenwiderstand angeschlossen ist. Dies führt zur Erwärmung und Zerstörung der Spannungsquellen.

Wird die Forderung erfüllt, gilt für die Stromverteilung auf die einzelnen Spannungsquellen nach Gl. (3.33 a)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{i2}}{R_{i1}}. \quad (3.43)$$

Bei einer Parallelschaltung von Spannungsquellen verhalten sich die Teilströme umgekehrt wie die Innenwiderstände der Spannungsquellen (gilt jedoch nicht immer für Generatoren).



Technische Anwendung

Die Parallelschaltung von Spannungsquellen wird ausschließlich dann angewendet, wenn die Belastbarkeit einer einzelnen Quelle nicht ausreicht, um den Lastbedarf zu decken (z.B. Parallelschaltung von Batterien aus elektrochemischen Elementen, Gleichstromgeneratoren im Pufferbetrieb).

## 3.8. Elektrische Energie und Leistung

### 3.8.1. Elektrische Energie

#### 3.8.1.1. Begriffsbestimmungen, gesetzliche Einheiten

Elektrische Energie

Ist die im elektrischen Feld vorhandene Energie. Sie tritt in potentieller und in kinetischer Form auf. Sie ist stets an elektrische Ladungen gebunden.

Potentielle elektrische Energie (gespeicherte Elektroenergie)

Die elektrischen Ladungen sind im Ruhezustand, es findet keine Energieumwandlung statt; die elektrische Energie ist das **Arbeitsvermögen**. In potentieller Form befindet sich die elektrische Energie z.B. in

- allen Spannungsquellen im Leerlauf ( $R_A = \infty$ ),
- geladenen Kondensatoren (vgl. Abschn. 4.4.).

Kinetische  
elektrische Energie  
(Energie-  
umwandlung)

Die elektrischen Ladungen sind in Bewegung, es findet eine Energieumwandlung statt. Je nach dem vorliegenden Umwandlungsprozeß nimmt der Betrag der elektrischen Energie ab oder wird ständig erneuert und aufrechterhalten.

Elektrische Arbeit

Umwandlung kinetischer elektrischer Energie in andere Energieformen.

Beim Durchfluß einer Ladungsmenge  $\Delta Q$  durch einen passiven Zweipol AB wird in diesem eine Energie  $\Delta W$  umgesetzt [vgl. Abschnitt 3.3.2.1., Gl. (3.3 b)].

Formelzeichen W

Physikalischer Zusammenhang (3.3 c)

Mit Gl. (3.1) ergibt sich

$$\Delta W = U I \Delta t. \quad (3.44)$$

Sind Spannung U und Stromstärke I von der Zeit unabhängig, gilt

$$W = U I t. \quad (3.45)$$

Mit  $I = \frac{U}{R}$  und  $U = I R$  wird

$$W = \frac{U^2}{R} t \quad \text{oder} \quad (3.45 \text{ a})$$

$$W = I^2 R t \quad (3.45 \text{ b})$$

Einheit

Joule

$$[W] = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J} \text{ (Joule)}$$

- Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ Wh} = 1 \text{ Wattstunde} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ Kilowattstunde} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s}$$

(James Watt, 1736-1819, englischer Ingenieur)

Grundmeßschaltung

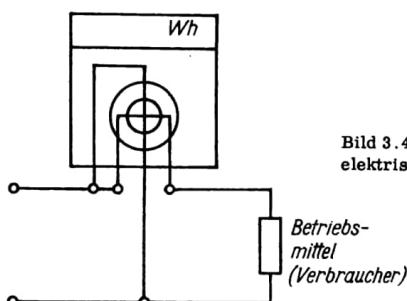


Bild 3.48. Grundschatzung für die Messung der elektrischen Arbeit

Joule

Ein Joule ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn sich der Angriffspunkt der Kraft 1 N in Richtung der Kraft um 1 m verschiebt.

(James Joule, 1818-1889, englischer Physiker;

Isaac Newton, 1643-1727, englischer Mathematiker und Naturwissenschaftler)

- Vorteile der elektrischen Energie
- Leichter und verlustarmer Transport über große Entfernungen.
  - Wirtschaftliche und technisch gut zu realisierende Umwandlung in andere Energiearten.
  - Leichte Beeinflussbarkeit der Energiemengen.

### 3.8.1.2. Umwandlung elektrischer Energie in andere Energieformen und umgekehrte Energiewandlungen

Umwandlung elektrischer Energie in thermische Energie

Die elektrotechnische Wärmeerzeugung beruht auf der Umwandlung der kinetischen Energie von Ladungsträgern in Wärmeenergie. Das Energiewandlerelement von elektrischer in gewünschte oder unerwünschte Wärmeenergie ist der Widerstand. Der elektrische Widerstand eines Leiters ist die Bedingung, und der elektrische Strom ist die Ursache für die Wirkung Stromwärme. Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie (vgl. Abschn. 1.3.) ist die in einem elektrischen Widerstand umgesetzte elektrische Energie  $W_{el}$  gleich der erzeugten thermischen Energie  $W_{th}$ .

$$W_{el} = W_{th}$$

Mit Gl. (3.45b) ergibt sich

Joulesches Gesetz

$$W_{th} = I^2 R t. \quad (3.46)$$

Technische Anwendung der Stromwärme

Tafel 3.13 enthält die verschiedenen Möglichkeiten.

Tafel 3.13. Möglichkeiten der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie

Ladungsträger	Elektronen in metallischen und Masseleitern	Elektronen und Ionen beim Übergang vom Vakuum in feste Leiter	Ionen und Elektronen in Gasen	Ionen und Elektronen in Flüssigkeiten
Anwendung	Widerstandserwärmung	Elektronenstrahl erwärzung	Lichtbogen erwärzung	elektrolytische Erwärmung

Widerstandserwärmung

Elektrisches Widerstandsschweißen

Preßschweißen unter Druck, bei dem elektrischer Strom an den Stoßstellen der Werkstücke infolge eines hohen Übergangswiderstandes eine schnelle Erwärmung bewirkt, die z.T. den Schmelzpunkt des Werkstoffes erreicht (Bild 3.49).

Technische Wärmegeräte

Wärmequelle ist meist ein stromdurchflossener Widerstandsdräht (Heizleiter) mit einem hohen spezifischen Widerstand und einer hohen Gebrauchstemperatur. Besonders eignen sich Drähte und Stäbe aus

- Legierungen mit Eisen, Nickel, Chrom, Aluminium,
- Siliziumkarbid,
- Molybdänsilizid.

Beispiele:

Raumheizer, Kochgeräte, Wärmestrahlungsgeräte für Heiz-, Koch-, Back-, Trockenprozesse.

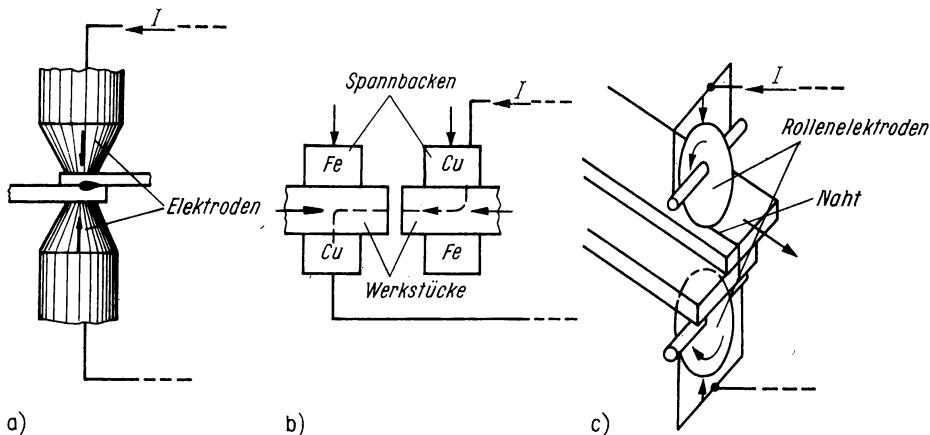


Bild 3.49. Schematische Darstellung elektrischer Widerstandsschweißverfahren  
a) Punktschweißen; b) Abbrenn-Stumpfschweißen; c) Nahtschweißen

#### Schmelzsicherungen

#### Aufgaben und Wirkungsweise

#### Allgemeines Schaltzeichen

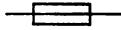


Bild 3.50.

In elektrotechnischen Anlagen müssen lang andauernde Überströme und kurzzeitig fließende Kurzschlußströme mit Sicherheit unterbunden werden. Zu diesem Zweck werden insbesondere Schmelzsicherungen eingesetzt. Ihre Wirkungsweise beruht auf einer zeitlich andauernden Wärmeentwicklung, die einen Schmelzdraht definierter Strombelastbarkeit zum Durchschmelzen bringt (vgl. Bild 3.51).

Schmelzsicherungen dienen dem Schutz

- von Leitungen und Betriebsmitteln vor unzulässiger Erwärmung
- von Energieversorgungseinrichtungen (z. B. Transformatoren, Generatoren) vor Kurzschlüssen mit Folgeschäden.

Nach dem Aufbau werden unterschieden

- Patronenschmelzsicherungen (z. B. im Haushalt, zur Niederspannungsverteilung)
- Gerätefeinsicherungen (z. B. in elektronischen Geräten).

#### Aufbau

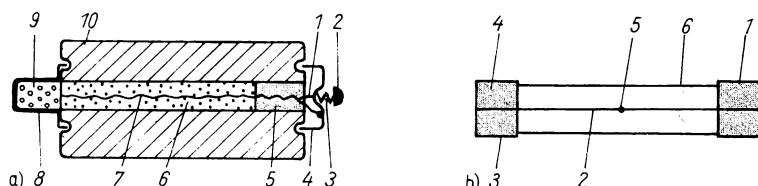


Bild 3.51. Grundsätzlicher Aufbau von

a) Patronenschmelzsicherungen

- 1 Kennmelderdraht;
- 2 Kennmelder;
- 3 Feder;
- 4 Kontaktfläche;
- 5 Asbest;
- 6 Löschsand;
- 7 Schmelzdraht;
- 8 Kontaktfläche;
- 9 Zement;
- 10 Porzellankörper (Patrone)

b) Gerätefeinsicherungen

- 1 Kontaktfläche;
- 2 Schmelzdraht;
- 3 Kontaktfläche;
- 4 Prägung Strom/Spannung;
- 5 Schweiß- oder Lötverbindung;
- 6 Glaszyylinder

## Abschmelzcharakteristik

Nach der Abschmelzdauer unterscheidet man

- flinke Sicherungen (vor allem für den Kurzschlußschutz)
- träge Sicherungen (besonders dort, wo Überströme für eine gewisse Zeit möglich und zulässig sind).

Tafel 3.14. Abhängigkeit der Abschmelzzeit von der die Sicherung durchfließenden Stromstärke

Nennstrom und Art der Sicherung	Abschmelzzeit			
	10 A	25 A	30 A	40 A
10 A flink	$\infty$	0,3 ... 8,5	0,12 ... 2,2	0,04 ... 0,55
10 A träge	$\infty$	16 ... 120	3,5 ... 23	0,9 ... 3,6

In Tafel 3.15 sind wichtige Kenndaten und Unterscheidungsmerkmale von Patronenschmelzsicherungen zusammengestellt.

## Standardisierung

Tafel 3.15. Patronenschmelzsicherungen

Nennstrom	Kennmelderfarbe und Paßringfarbe	Gewinde des Sicherungselementes
(2)	Rosa	Edisongewinde 16
(4)	Braun	E 16
(6)	Grün	E 16 und E 27
10	Rot	E 16 und E 27
16 (15)	Grau	E 16 und E 27
20	Blau	E 16 und E 27
25	Gelb	E 16 und E 27
36 (35)	Schwarz	E 27 und E 33
50	Weiß	E 33
63 (60)	Kupferfarbe	Rohrgewinde $1/4''$ (Zoll)
80	Silber	R $1/4''$
100	Rot	R $2''$
125	Gelb	R $2''$
160	Kupferfarbe	R $2''$
200	Blau	R $2''$

## Arbeits- und Brandschutz

- Sicherungen sind nur von dazu berechtigten Personen zu installieren.
- Bei Reparaturen an elektrischen Anlagen ist durch Entfernen der Sicherungen Spannungsfreiheit herzustellen. Ein Wiedereinschrauben während der Reparatur darf nicht möglich sein.
- Defekte Sicherungen dürfen nicht repariert werden!
- Das Austauschen von Paßringen kleinerer Nennstromstärke gegen solche für höhere Nennströme ist nur Befugten gestattet!

## Bimetallschalter

Der Bimetallstreifen biegt sich wegen der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Metalle bei Temperaturerhöhung und öffnet oder schließt damit einen Kontakt. Durch einen Dauermagneten oder durch vorgespannte Federn wird ein schlagartiges Schalten erreicht.

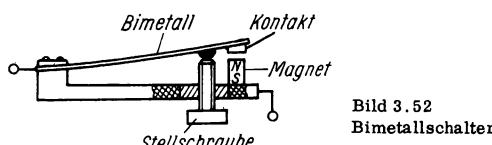


Bild 3.52  
Bimetallschalter

Bimetallschalter werden als Überstromauslöser oder als Reglerschalter (Bild 3.52) verwendet.

### Elektronenstrahl- erwärmung

Im Vakuum beschleunigte Elektronen haben eine hohe kinetische Energie. Diese geben sie beim Aufprall auf feste Stoffe vollständig ab. Durch Bündeln des Elektronenstrahls wird eine örtliche hohe Erwärmung des zu bearbeitenden Werkstoffs erreicht.

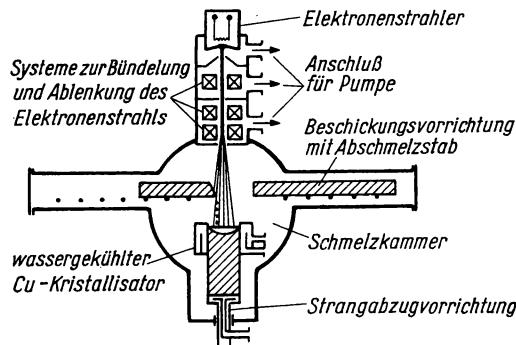


Bild 3.53  
Elektronenstrahlofen

Technisch angewendet wird die Elektronenstrahlerwärmung zur Herstellung von feinen Bohrungen (mit wenigen Mikrometern Durchmesser), zum Schmelzen von Vakuumstählen höchster Reinheit im Elektronenstrahlofen (Bild 3.53) und zum Auslösen chemischer Reaktionen.

### Lichtbogen- erwärmung

Bei Spannungen von etwa 40 ... 50 V erwärmt sich die Berührungsstelle der Elektroden sehr stark. Beim Auseinanderziehen treten aus der Katode Elektronen aus, die sich mit hoher Geschwindigkeit zur Anode bewegen. Die Luftstrecke wird durch Stoßionisation leitend (Strombegrenzung notwendig). Treffen die Elektronen auf die Anode, dann wird ihre kinetische Energie in Wärme umgesetzt.

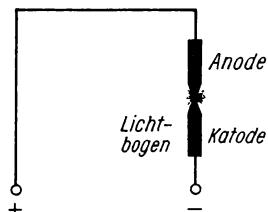


Bild 3.54  
Prinzipskizze der Lichtbogenerscheinung

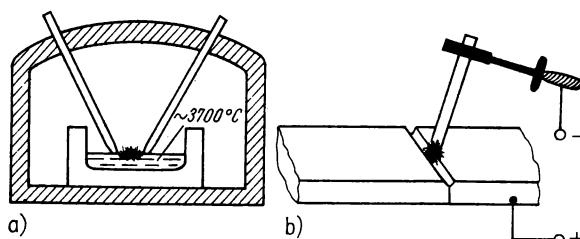
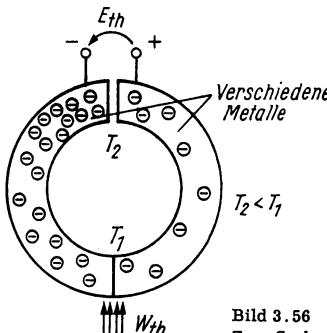


Bild 3.55. Technische Anwendung der Lichtbogenerwärmung  
a) Lichtbogenofen; b) Lichtbogenschweißen (nach Slawjanow)

Elektrolytische Erwärmung	Das Erwärmungsprinzip entspricht dem der metallischen Leiter, nur daß die Ionen den Hauptteil der Erwärmung tragen. Angewendet wird das Prinzip z.B. beim elektroerosiven Trennen und Bohren sehr harter Metalle und beim Flüssighalten von Schmelzflüssen (Aluminiumherstellung).
Unerwünschte elektrische Wärmeentwicklung	Da jeder Stromfluß mit einer Erwärmung des Leiters verbunden ist, können auch unerwünschte Wärmeerscheinungen auftreten (z.B. in Leitungen, Bauelementen, Klemmstellen). Die entstehende Wärme ist Verlustwärme und durch Kühlung oder andere Maßnahmen niedrig zu halten.
Unerwünschte Lichtbogenerscheinungen	Schaltlichtbögen können Abbrand und Festschweißen der Schaltkontakte bewirken. Die damit verbundene erhöhte Brand- und Unfallgefahr verlangt entsprechende Maßnahmen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnellschalten,</li> <li>• Funkenunterdrückung,</li> <li>• Lichtbogenlöschung.</li> </ul>
Umwandlung thermischer Energie in elektrische Energie	Für die thermische Spannungszeugung hat der Seebeck-Effekt die größte Bedeutung. (Thomas Johann Seebeck, 1770-1831, deutscher Naturforscher) Die Unterschiede der Dichten und der Beweglichkeiten freier Elektronen verschiedener Leiter oder Halbleiter führen bei Berührung (z.B. Verlöten, Verschweißen) dieser Stoffe zu einer temperaturabhängigen Urspannung $E_{th}$ (Thermospannung) (Bild 3.56). $E_{th} \sim (T_1 - T_2)$ <p>Die Thermospannung hängt neben der Temperaturdifferenz von der Kombination der Leitermaterialien ab. Sie beträgt nur wenige mV/100 K.</p>
Technische Anwendung	 <p>Bild 3.56 Zum Seebeck-Effekt</p> <p>Der Seebeck-Effekt wird technisch im Thermoelement angewendet. Thermoelemente benutzt man zur Temperaturmessung. Die Prinzipschaltung zeigt Bild 3.57.</p>

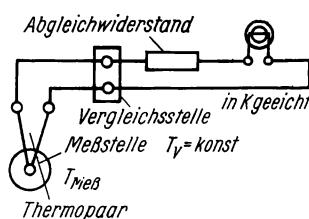


Bild 3.57  
Prinzipschaltplan einer Thermoelement-Meßanlage

Hat die Meßstelle eine andere Temperatur als die Vergleichsstelle (konstante Bezugstemperatur), so entsteht eine Thermospannung, die von einem in Wärmeeinheiten geeichten Meßinstrument gemessen wird.

Umwandlung elektrischer Energie in elektromagnetische Energie und umgekehrt

Dient hauptsächlich als Zwischenstufe der Umwandlung von Elektroenergie in mechanische Energie. Die Umwandlung erfolgt unter Ausnutzung der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes in Elektromotoren und Elektromagneten.

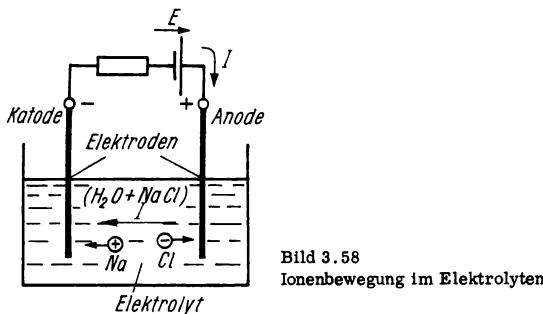
Diese Energieumwandlung ist umkehrbar. Hierzu werden meistens Generatoren benutzt, die z.B. von Dampf- oder Wasserturbinen angetrieben werden.

Hinweis

Vgl. hierzu Abschn. 5.

Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie  
Elektrochemische Vorgänge

Wässrige Lösungen von Säuren, Basen und Salzen haben die Eigenschaft, den elektrischen Strom zu leiten. Diese Fähigkeit beruht auf der elektrolytischen Dissoziation der Stoffe. Die Moleküle gehen in einem bestimmten Umfang (Dissoziationsgrad) als Ionen in Lösung. Unter dem Einfluß einer Spannung wandern positive Ionen zur Katode (Kationen) und die negativen zur Anode (Anionen). Sie nehmen dort Elektronen auf bzw. geben sie ab und werden selbst als elektrisch neutrale Stoffe abgeschieden. Diesen Vorgang nennt man Elektrolyse (Bild 3.58).



Es ist aber auch möglich, daß Sekundärreaktionen mit der Elektrode oder dem Elektrolyten eintreten.

Stofftransport

Der Stromfluß im Elektrolyten ist mit einem Stofftransport verbunden. Die abgeschiedene Masse der Stoffe ist dabei der transportierten Ladungsmenge  $Q$  proportional, und es gilt allgemein

1. Faradaysches Gesetz

$$m = c Q = c I t ; \quad (3.47)$$

$c$  elektrochemisches Äquivalent.

Zur elektrochemischen Umsetzung von 1 Grammäquivalent Stoff sind stets 96 500 As erforderlich.

$$\text{Grammäquivalent} = \frac{\text{relative Atommasse in g}}{\text{Wertigkeit}}$$

## 2. Faradaysches Gesetz

$$m = \frac{1}{96\,500 \text{ A} \cdot \text{s}} \cdot \text{Ä} \cdot I \cdot t; \quad (3.48)$$

m Masse des abgeschiedenen Stoffes in g,  
 Ä Grammäquivalent in g,  
 I Stromstärke in A,  
 t Zeitdauer des Stromflusses in s.

### Technische Anwendung

- Elektrolytische Metallgewinnung (vor allem Reinstmetalle)
- Elektrolytisches Verchromen, Vernickeln, Vergolden u.a.
- Galvanoplastik (Klischeeherstellung)

### Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie

Sie beruht auf der Ladungstrennung an den Grenzflächen Metall/Elektrolyt durch eine nichtelektrische Kraft (Lösungsdruck, osmotischer Druck).

### Wechselwirkung zwischen Elektrode und Elektrolyt

An der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt versucht das Metall in Ionenform in Lösung zu gehen (Lösungsdruck), und der Elektrolyt ist bestrebt, Metallionen an die Elektrode abzugeben (osmotischer Druck).

Überwiegt der Lösungsdruck, so wird die Elektrode negativ, überwiegt der osmotische Druck, wird sie positiv gegenüber dem Elektrolyten aufgeladen. Folge dieses chemischen Vorgangs ist eine elektrische Ursprallung zwischen Elektrolyt und Elektrode.

### Elektrochemische Spannungsreihe

Ordnet man chemische Elemente in einer Reihe nach ihrer Spannung gegenüber einer definierten Lösung des jeweiligen Salzes, wobei als Gegenelektrode eine Wasserstoffelektrode benutzt wird, erhält man die sog. elektrochemische Spannungsreihe (nachfolgend ist eine Auswahl wichtiger Elemente angeführt):

(edel)	(Bezugswert)	(unedel)											
Au	Pt	Hg	Ag	Cu	H	Pb	Sn	Ni	Fe	Cr	Zn	Al	K

### Technische Anwendung

Werden zwei Elektroden aus unterschiedlichem Metall oder aus Graphit und einem Metall in einen Elektrolyten getaucht, so entsteht auf Grund des verschiedenen Lösungsdrucks der Metalle zwischen beiden eine Ursprallung.

### Primärelemente (galvanische Elemente)

Spannungsquellen, in denen durch chemische Vorgänge elektrische Ursprallungen entstehen.

Beispiel:

Taucht man einen Kupferstab und einen Zinkstab in verdünnte Schwefelsäure, so hat das Zink den höheren Lösungsdruck. Es wird gegenüber dem Kupfer negativ. Dieses Element wurde etwa 1800 von Volta gebaut (Bild 3.59). Das technisch bedeutendste Primärelement ist das Kohle-Zink-Element.

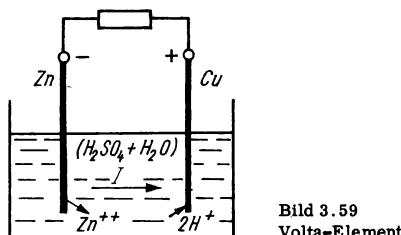


Bild 3.59  
Volta-Element

**Sekundärelemente**  
(Akkumulatoren oder  
Sammelr.)

Sie können erst nach dem Aufladen eine elektrische Urspannung bilden. Beim Aufladen wird die dem Akkumulator zugeführte elektrische Energie in chemische umgewandelt und gespeichert. Während der Entladung wird die chemische Energie wieder in elektrische umgesetzt.

**Bleiakkumulator**

In ihm ist die negative Elektrode Blei, die positive Elektrode Blei-IV-Oxid und der Elektrolyt verdünnte Schwefelsäure. Die Zellenspannung beträgt 2 V.

#### Entladenvorgang

Bei der Entladung wird die negative Elektrode (Pb) zu Bleisulfat ( $\text{PbSO}_4$ ) umgebildet, der frei werdende Wasserstoff wandert zur positiven Elektrode ( $\text{PbO}_2$ ) und bildet hier in Verbindung mit der Schwefelsäure Bleisulfat und Wasser.

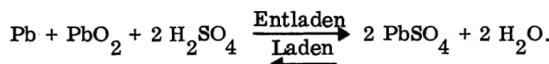
Der Entladenvorgang ist also gekennzeichnet durch das Entstehen von Wasser (Säuredichte verringert).

Die Säuredichte ist ein Maß für den Ladungszustand der Zelle.

#### Ladevorgang

Die Reaktionen werden wieder rückgängig gemacht.

Die Gleichung für die Gesamtreaktion lautet



Bilder 3.60 und 3.61 zeigen den Spannungsverlauf an den Klemmen beim Laden und Entladen.

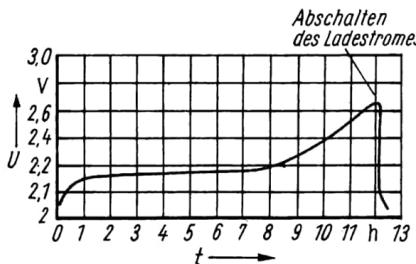
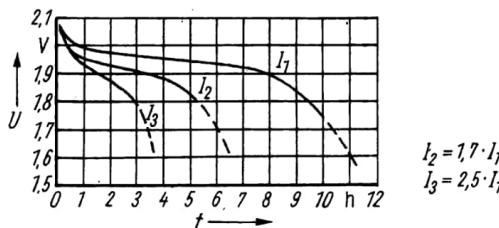


Bild 3.60  
Spannungsverlauf beim Laden



Der Bleiakkumulator gilt als entladen, wenn die Zellenspannung 1,83 V erreicht hat. Der Ladevorgang ist bei 2,7 V beendet.

Neben Bleiakkumulatoren sind Nickel-Eisen-Sammelr. und Nickel-Kadmium-Akkumulatoren die technisch bedeutendsten.

## Speichervorgänge elektrischer Energie

Das Speichervermögen von Akkumulatoren ist je nach Bauart und Größe verschieden. Diejenige Ladungsmenge, die ein geladener Akkumulator wieder abgeben kann, wenn er bis zur unteren zulässigen Zellenspannung entladen wird, bezeichnet man als Kapazität.

## Kapazität eines Akkumulators

Die Kapazität eines Akkumulators ist das Produkt aus Entladestromstärke und Entladedauer.

### Einheit

Amperestunde (A · h)

### Hinweis

Der Begriff „Kapazität“ ist auch ein Maß für die Speicherfähigkeit elektrischer Ladungen eines Kondensators (vgl. Abschn. 4.4.1.).

## Unerwünschte elektrochemische Vorgänge

Die volkswirtschaftlich verlustbringendste Erscheinung ist die elektrochemische Korrosion von Eisen.

## Elektrochemische Korrosion

Ist die von der Oberfläche ausgehende unerwünschte Zerstörung von Werkstoffen (Metallen) durch elektrochemische Reaktion mit ihrer Umgebung.

Die elektrochemische Korrosion wird durch galvanische Elementbildung (Korrosionselement) oder durch Elektrolyse ausgelöst, wobei elektrische Energie in chemische und sekundär in Wärme umgewandelt wird.

### Hinweis

Vgl. „Werkstoffkunde Elektroberufe“.

## Umwandlung elektrischer Energie in Lichtenergie

Licht ist elektromagnetische Strahlung, die einen bestimmten Bereich des elektromagnetischen Spektrums einnimmt und vom menschlichen Auge wahrgenommen sowie nach Helligkeit und Farbe bewertet wird.

Durch Energieaufnahme können Atome, Moleküle oder Ionen Lichtenergie aussenden.

## Technische Anwendung

Nach der Art der Energieumsetzung unterscheidet man

- Temperaturstrahler,
- Lumineszenzstrahler.

## Temperaturstrahler (Glühlampen)

In einem evakuierten Glaskolben wird ein Draht durch die Stromwärme so hoch erhitzt, daß er Licht aussendet. Die Lichtausbeute nimmt dabei mit steigender Temperatur zu. Als Werkstoff mit hoher Temperaturbeständigkeit wird vor allem Wolfram verwendet, das im stark luftverdünnten Raum bei Dauerbetrieb bis 2300 °C erhitzt werden kann, ohne schnell zu verdampfen. Durch bestimmte Füllungen (Edelgas, Jod) wird die Lebensdauer bzw. die Belastbarkeit der Lampe wesentlich erhöht.

Einfache oder doppelte Wendelung (Bild 3.62) verringert die Wärmeabgabe und erhöht die Lichtausbeute.



Bild 3.62  
Glühlampenleuchtdrähte  
a) Einfachwendel; b) Doppelwendel

Lumineszenzstrahler	Leuchtstoffe oder Gase werden durch Energiezuführung unterschiedlicher Art zur Aussendung elektromagnetischer Strahlung bestimmter Wellenlänge angeregt. Im Unterschied zu Temperaturstrahlern ist der Anteil der in Wärme umgesetzten elektrischen Energie gering.
Gasentladungsstrahler	
Primärstrahler	Elektronen stoßen mit Gasatomen oder Molekülen, die sich in einem Quarz- oder Glasegefäß befinden, zusammen und regen diese zur Aussendung von Licht an (Primärstrahler).
Sekundärstrahler	Für Beleuchtungszwecke werden die Strahler meist mit Quecksilberdampf gefüllt. Da die Quecksilberstrahlung nicht im sichtbaren Spektralbereich liegt, wird sie durch einen auf die Innenwand des Gefäßes aufgetragenen Leuchtstoff in sichtbares Licht umgewandelt. Für Sonderzwecke (z.B. Reklamebeleuchtung) werden auch andere Gasfüllungen verwendet, wodurch Licht bestimmter Farbe entsteht (Argon - Grün, Neon - Rot, Helium - Rosa, Natrium - Gelb). Durch die Erhöhung des Gasdrucks (bei Höchstdrucklampen bis etwa $10 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ ) kann die Lichtausbeute wesentlich gesteigert werden. Sie ist bei diesen Lampen wesentlich höher als bei Temperaturstrahlern.
Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie	Lichtenergie kann durch den äußeren und den inneren lichtelektrischen Effekt in elektrische Energie umgewandelt werden. Bauelemente zur Ausnutzung dieser Effekte sind u.a. Fotozelle, Fotoelement und Fotoresistor.
Technische Anwendung	
Äußerer lichtelektrischer Effekt	Aus der Oberfläche von Oxiden der Alkalimetalle, z.B. von Kaliumoxid, Zäsimium, treten bei Lichteinfall Elektronen aus.
Fotozelle	Sie besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in dem sich eine dünne Schicht eines elektronenaussendenden Metalles - die Fotokatode - befindet. Eine weitere Elektrode im Glaskolben, die Anode, liegt an einer positiven Spannung gegenüber der Katode. Bei Lichteinfall werden die aus der Katode austretenden Elektronen von der Anode angesaugt, so daß durch den außen angeschlossenen Stromkreis (Bild 3.63) ein Strom fließt, dessen Stärke dem Lichteinfall proportional ist.

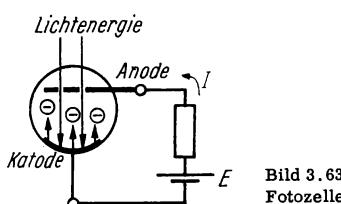
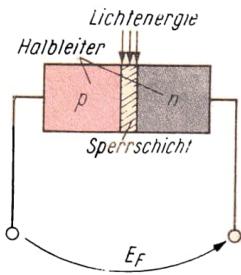


Bild 3.63  
Fotozelle

Innerer lichtelektrischer Effekt	Bei Lichteinwirkung werden in Halbleiterwerkstoffen Ladungsträger freigesetzt.
Fotoelement (Fotodiode)	An der Berührungsstelle zwischen Halbleitern mit verschiedenem Leitfähigkeitscharakter (p bzw. n) entsteht eine sog. Sperrschiicht (Bild 3.64). Bei Lichteinfall werden Ladungsträger durch die Sperr-



schicht getrennt; es entsteht eine Urspannung. Man bezeichnet dies als den Sperrschicht-Fotoeffekt und die Bauelemente als Fotoelemente oder Fotodioden.

Wird an die Klemmen des Fotoelements ein Widerstand angeschlossen, fließt ein Fotostrom.

Die Urspannung  $E_F$  des Fotoelements ist von der Stärke und der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig.

Fotoelemente werden in elektrischen Belichtungsmessern oder Sonnenbatterien verwendet.

Bild 3.64 Fotoelement

Fotowiderstand

Material: Halbleiter (meistens Kadmiumverbindungen).

Durch die aufgenommene Lichtenergie wird im Fotowiderstand die Anzahl der frei beweglichen Ladungsträger größer; der Widerstandswert verkleinert sich.

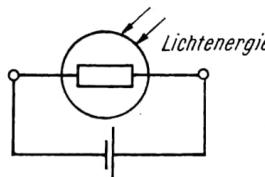


Bild 3.65  
Fotowiderstand

### 3.8.2. Elektrische Leistung

Unabhängig von der spezifischen Energieform gilt

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} .$$

Elektrische Leistung

Für die elektrische Leistung ergibt sich mit Gl. (3.45)

Formelzeichen

P

Physikalischer  
Zusammenhang

$$P = U I$$

(3.49)

oder unter Anwendung der Gl. (3.45 a) und  
(3.45 b)

$$P = \frac{U^2}{R} ; \quad P = I^2 R . \quad (3.50a)$$

(3.50b)

Einheit

Watt

$$[P] = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

- Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ MW} = 1 \text{ Megawatt} = 10^6 \text{ W}$$

$$1 \text{ kW} = 1 \text{ Kilowatt} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 1 \text{ Milliwatt} = 10^{-3} \text{ W}$$

Grundmeßschaltung

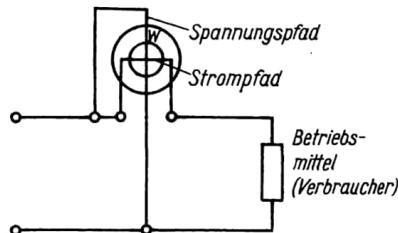


Bild 3.66. Grundschaltung für Leistungsmessung

Tafel 3.16. Größenordnungen der Leistung

Gerät/Bauelement	Leistung W	Gerät/Bauelement	Leistung W
Empfängerröhren	bis 50	Elektrische Haushaltswärmegeräte	$40 \dots 2 \cdot 10^3$
Halbleiterbauelemente	$bis 10^3$	Motor einer E-Lok	$\approx 750 \cdot 10^3$
Glühlampen	$10^{-1} \dots 10^3$	Generatoren in Kraftwerken	bis $10^9$

### 3.8.3. Wirkungsgrad, Leistungsumsatz und Anpassung

#### Wirkungsgrad

Bei der Umwandlung elektrischer Energie in Bauelementen, Geräten, Maschinen und Anlagen treten neben der gewünschten Energieform auch unerwünschte auf.

In der Technik werden diese unerwünschten Energieumwandlungen als „Verlust“ bezeichnet.

Das Verhältnis zwischen Nutzenergie (abgegebener Energie) und aufgewandter (zugeführter) Energie ist der Wirkungsgrad.

Meistens werden nicht die Energien, sondern die Leistungen ins Verhältnis gesetzt.

Formelzeichen

$\eta$

Physikalischer Zusammenhang

$$\eta = \frac{P_N}{P_{zu}} \quad (3.51)$$

$$P_{zu} = P_N + P_V ;$$

$P_{zu}$  zugeführte Leistung (auch  $P_i$ , indizierte Leistung, üblich),

$P_N$  Nutzleistung (auch  $P_e$ , effektive Leistung, üblich),

$P_V$  Verlustleistung.

Tafel 3.17. Technische Richtwerte für Größenordnungen des Wirkungsgrades

Einrichtung/Bauelement	Wirkungsgrad %	Einrichtung/Bauelement	Wirkungsgrad %
Glühlampen	3 ... 15	Elektrolok	etwa 85
Dampflok	etwa 20	Transformatoren	etwa 95
Diesellok	etwa 65	Si-Gleichrichter	etwa 98

Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie ist in einem geschlossenen System die vorzeichenbehaftete Summe aller Leistungen einschließlich der Verlustleistung  $P_V$  gleich Null.

Der Wirkungsgrad kann somit höchstens 1 oder 100 % werden.

Leistungsumsatz in elektrischen Stromkreisen

Man unterscheidet zwei Arten:

- Leistungsumsatz mit maximalem Wirkungsgrad in der Leistungselektrrotechnik,
- Leistungsumsatz mit maximaler Verbraucherleistung in der Informationselektrrotechnik.

Leistungsumsatz mit maximalem Wirkungsgrad

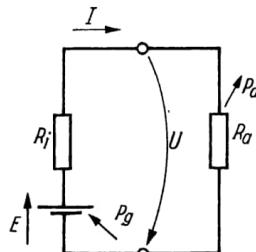


Bild 3.67  
Leistungsumsatz im Grundstromkreis  
P<sub>g</sub> Leistung der Spannungsquelle  
P<sub>a</sub> Leistung des Verbrauchers

Für den Grundstromkreis gilt

$$\begin{aligned}
 P_a &= I^2 R_a; \quad P_g = I^2 (R_i + R_a) \\
 \eta &= \frac{P_a}{P_g} = \frac{R_a}{R_i + R_a} \\
 \eta &= \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_a}}
 \end{aligned} \tag{3.52}$$

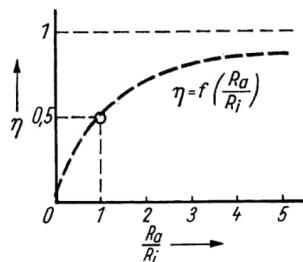


Bild 3.68  
Wirkungsgrad im Grundstromkreis in Abhängigkeit von der Belastung

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erhalten, muß

$$R_a \gg R_i$$

sein.

Im Bereich der Leistungselektrrotechnik wird aus wirtschaftlichen Gründen ein möglichst hoher Wirkungsgrad angestrebt, um die Verluste bei der Erzeugung der Elektroenergie, ihrer Übertragung und rationellen Verwendung klein zu halten.

Leistungsumsatz mit maximaler Verbraucherleistung

Im Bereich der Informationselektrrotechnik werden Informationen meist kleiner Leistungen übertragen. Um Signale unverfälscht an den Empfänger zu übertragen, muß ein möglichst hoher Absolutwert der Leistung abgegeben werden:

$$P_a = \frac{U_a^2}{R_a} = \frac{E^2 R_a}{(R_i + R_a)^2} \rightarrow \max$$

Die Forderung wird erfüllt, wenn

$$R_a = R_i$$

ist. Diesen Fall nennt man **Leistungsanpassung des Außenwiderstandes an den Spannungsquellenwiderstand**. Bei Anpassung beträgt der Wirkungsgrad 50 %.

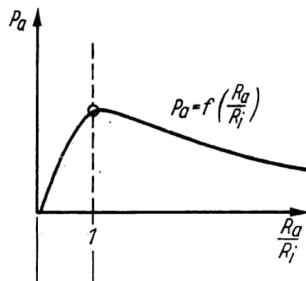


Bild 3.69  
Verbraucherleistung in Abhängigkeit von der Belastung eines aktiven Zweipols

Tafel 3.18. Charakteristische Leistungsumsätze bei verschiedenen Voraussetzungen des aktiven Zweipols

Besonderheiten des aktiven Zweipols	Ziel des Leistungsumsatzes	Dimensionierung des Verbrauchers	Ergebnis
Große Spannungsquellenleistung	hoher Wirkungsgrad	$R_a \gg R_i$	$\eta \rightarrow 1$
Kleine Spannungsquellenleistung	maximale Leistung an Verbraucher	$R_a \approx R_i$ Anpassung	$P_a \max$

Beim Studium älterer Fachliteratur findet man häufig noch Einheiten für physikalische Größen, die nicht den SI-Einheiten entsprechen. Um eine Umrechnung in die Einheiten des Internationalen Einheitensystems durchführen zu können, dient die Tafel 3.19.

Tafel 3.19. Umrechnungsbeziehungen zwischen SI-Einheiten und älteren Einheitenangaben

Energieeinheit	J	kW · h	kcal	PS · h	kp · m
1 J = 1 W · s	1 N · m	$0,28 \cdot 10^{-6}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-6}$	0,102
1 kW · h	$3,6 \cdot 10^6$	1	860	1,36	$0,37 \cdot 10^6$
1 kcal	$4,19 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1	$1,6 \cdot 10^{-3}$	426,9
1 PS · h	$2,65 \cdot 10^6$	0,74	632,4	1	$0,27 \cdot 10^6$
1 kp · m	9,81	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	1
Leistungseinheit	kW	J/s	kcal/h	PS	kp · m/s
1 kW	1	$10^3$	$0,86 \cdot 10^3$	1,36	102
1 J/s	$10^{-3}$	1	0,86	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,102
1 kcal/h	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1,16	1	$1,58 \cdot 10^{-3}$	0,119
1 PS	0,74	736	632,4	1	75
1 kp · m/s	$9,81 \cdot 10^{-3}$	9,81	8,43	$13,3 \cdot 10^{-3}$	1
Krafteinheit	N	kp			
1 N = 1 kp · m/s <sup>2</sup>	1	0,102			
1 kp	9,81	1			

## 4. Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern

### 4.1. Elektrostatisches Feld

Begriffsbestimmung  
„elektrostatisches  
Feld“

Ein elektrostatisches Feld ist ein elektrisches Feld im Nichtleiter.

Wesen und  
Erscheinungen

Der Nichtleiter wird als Dielektrikum bezeichnet.

- Das elektrostatische Feld ist ein räumlicher Zustand der Materie.
- Es ist eine mögliche Erscheinungsform der Materie.
- Die Meßgrößen des elektrostatischen Feldes sind richtungsbehaftet (Vektorfeld).
- Im elektrostatischen Feld entspringen und enden Feldlinien auf Ladungen.
- Ein elektrostatisches Feld ist stets mit ruhenden elektrischen Ladungen verknüpft.
- Zwischen elektrischen Ladungen existiert ein Kraftfeld.

Hinweis

Vgl. hierzu Abschn. 2.1., Elektrostatisches Kraftwirkungsgesetz.

Wirkungen

Das elektrostatische Feld ist nur erkennbar an seinen Richt- bzw. Kraftwirkungen

- auf frei bewegliche Ladungsträger,
- bei Ladungstrennung,
- bei Ladungsverschiebung.

Die Richtwirkung erstreckt sich auf den gesamten Raum eines Feldes; sie ist in Stärke und Richtung ortsabhängig.

### 4.2. Darstellung und Erscheinungen des elektrostatischen Feldes

#### 4.2.1. Feldbilder

Feldlinien

Das elektrostatische Feld kann mit Hilfe von Feldlinien veranschaulicht werden. Sie beschreiben die Kraftwirkungen des Feldes.

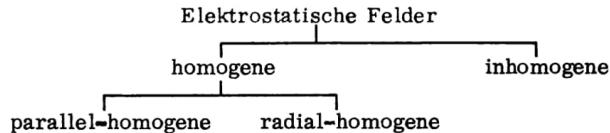
- Die Feldlinien haben eine bestimmte Richtung.
- Die Dichte der Feldlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des elektrostatischen Feldes.
- Feldlinien streben einen energieärmeren Zustand an.  
Eine Folge daraus sind  
Zugkräfte in Richtung längs der Feldlinien,  
Druckkräfte in Richtung quer zu den Feldlinien.
- Feldlinien stehen stets senkrecht auf Metallflächen.
- Feldlinien im elektrostatischen Feld entspringen und enden auf Ladungen. Deshalb wird das elektrostatische Feld auch als Quellenfeld bezeichnet.

## Definition der Richtung der Feldlinien

Die Richtung der elektrostatischen Feldlinien wird definiert:

Die Feldlinien verlaufen im elektrostatischen Feld von positiven zu negativen Ladungen.

## Feldarten



### Parallel-homogene Felder

Elektrostatische Felder sind parallel-homogen, wenn die Feldlinien parallel zueinander verlaufen und überall die gleiche Dichte aufweisen.

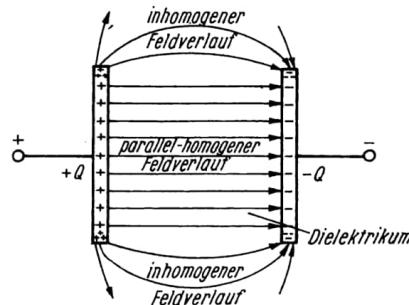


Bild 4.1  
Elektrostatisches Feld zwischen  
zwei parallelen Platten

### Radial-homogene Felder

Bei radial-homogenen Feldern laufen die Feldlinien senkrecht ohne Richtungsänderung von der Oberfläche des geladenen Körpers weg. Die Gegenladung zu  $+Q$  liegt unendlich weit weg.

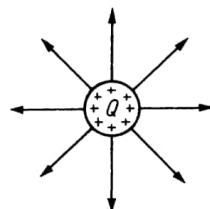


Bild 4.2  
Radial-homogenes elektrostatisches Feld  
eines Zylinderkörpers

### Hinweis

In der Praxis können vollkommen homogene elektrostatische Felder nicht erreicht werden. Homogene Felder sind Idealisierungen der Realität.

Homogene Felder werden deshalb angestrebt, weil sie sich mathematisch leicht beschreiben lassen.

### Inhomogene Felder

Elektrostatische Felder sind inhomogen, wenn eine der Bedingungen für ein homogenes Feld nicht erfüllt ist.

### Beispiele

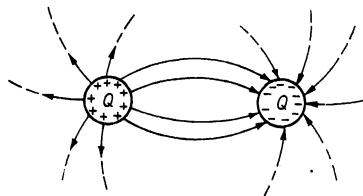


Bild 4.3  
Elektrostatisches Feld zweier ungleichnamig geladener Körper

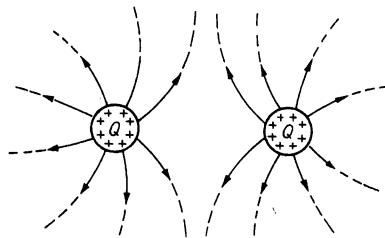


Bild 4.4  
Elektrostatisches Feld zweier gleichnamig geladener Körper

### 4.2.2. Erscheinungen des elektrostatischen Feldes

**Ladungsverschiebung** Unter dem Einfluß des elektrostatischen Feldes treten Ladungsverschiebungen auf. Diese Ladungsverschiebungen können Influenz und dielektrische Polarisation sein.

#### Influenz

Ist die Ladungstrennung in einem Leiter unter dem Einfluß des elektrostatischen Feldes [influere (lat.) hineinfließen].

Bringt man zwischen zwei Metallplatten mit den Ladungen  $+Q$  und  $-Q$  einen Leiter, so werden in diesem auf Grund der Kraftwirkung die frei beweglichen Elektronen verschoben.

Auf der Oberfläche des Leiters entsteht ein Ladungspaar  $+Q$  und  $-Q$ . Die Ladungen werden so ausgerichtet, daß die positiven Ladungen der negativ geladenen Metallplatte gegenüberstehen und umgekehrt.

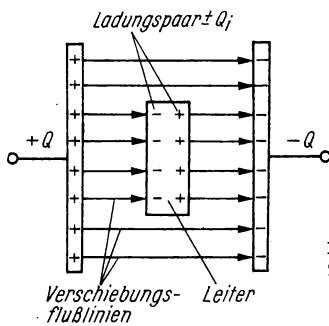


Bild 4.5  
Zur Erläuterung der Influenz

#### Anwendung der Influenzwirkung

Im Inneren eines Hohlraumes, der von einem Leiter vollständig umschlossen ist, befindet sich trotz des Einflusses eines elektrostatischen Feldes ein feldfreier Raum.

#### Elektrische Abschirmung

Der Innenraum ist elektrisch „abgeschirmt“, da durch Ladungstrennung an der Innenwandung keine Ladungen vorhanden sind.

### Beispiel

Die elektrische Abschirmung wird verwendet, um Menschen oder Meßinstrumente vor Hochspannungsfeldern zu schützen oder um elektrische Störfelder fernzuhalten (z.B. Faradayscher Käfig, abgeschilderte Kabel).

Dielektrische Polarisation  
(Dipolbildung)

Dielektrische Polarisation ist die Verschiebung elektrischer Ladungen innerhalb der Moleküle eines Nichtleiters (Dielektrikum).

Unter der Einwirkung des elektrostatischen Feldes tritt eine Verschiebung der elastisch ortsgebundenen Ladungen der Moleküle ein. Die Verschiebung erfolgt entsprechend dem Kraftwirkungsgesetz. Die polarisierten Moleküle erhalten Dipolcharakter.

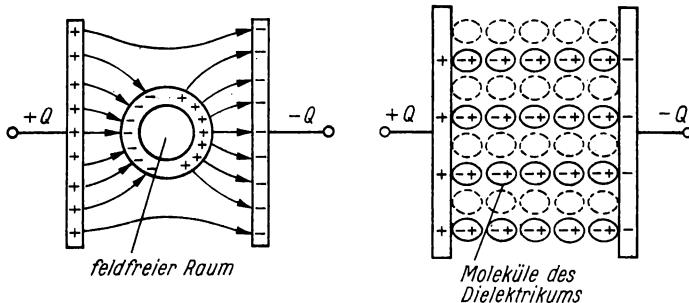


Bild 4.6  
Prinzip des Faradayschen Käfigs

Bild 4.7  
Zur Erläuterung der Dipolbildung

## 4.3. Meßgrößen des elektrostatischen Feldes

Das elektrostatische Feld kann durch physikalische Größen beschrieben und erfaßt werden. Dabei sind zu unterscheiden:

- Wirkungsgrößen,
- Bedingungsgrößen (Vermittlungsgrößen),
- Ursachengrößen.

### 4.3.1. Verschiebungsfluß, Ladung und Verschiebungsflußdichte

Wirkungsgröße  
Verschiebungsfluß

Die Wirkungsgröße des elektrostatischen Feldes ist der Verschiebungsfluß.

Er ist vorstellbar als die Gesamtheit der Verschiebungsflußlinien und kennzeichnet das Vermögen zur Ladungsverschiebung im elektrostatischen Feld.

Verschiebungs-  
flußlinien

Sie stellen die Verschiebung dar, beginnen auf der positiven und enden auf der negativen Ladung.

Verschiebungsfluß

Formelzeichen  $\Psi$

Einheit

Coulomb  
 $[\Psi] = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ C}$

## Verschiebungs- gesetz

Der gesamte Verschiebungsfluß  $\Psi_{\text{ges}}$  ist gleich der Ladung, aus der er entspringt.

$$\begin{aligned}\Psi_{\text{ges}} &= Q \\ \Delta \Psi &= \Delta Q\end{aligned}$$

(4.1)

Der Verschiebungsfluß im Nichtleiter ist die analoge Größe zum Strom im elektrischen Strömungsfeld.

### Hinweis

Strömungslinien unterscheiden sich von Verschiebungsflußlinien dadurch, daß sie immer geschlossen sind.

## Dichtegröße Verschiebungs- flußdichte

Sie dient zum Beschreiben der Verteilung des Verschiebungsflusses in einem Gebiet analog der Stromdichte im elektrischen Strömungsfeld.

Die von Verschiebungslinien durchsetzte Fläche steht senkrecht zu diesen.

### Formelzeichen

D

### Physikalischer Zusammenhang

$$D = \frac{\Delta \Psi}{\Delta A}$$

(4.2)

### Einheit

$$[D] = 1 \frac{A \cdot s}{m^2} = 1 \frac{C}{m^2}$$

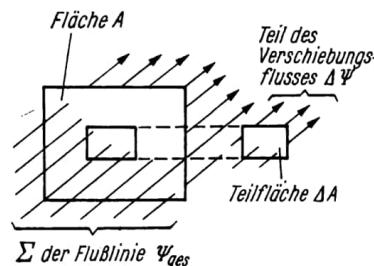


Bild 4.8  
Zur Definition der Verschiebungsfußdichte

### Hinweis

In homogenen elektrostatischen Feldern ist die Flußdichte überall gleich groß. Unter dieser Bedingung gilt

$$D = \frac{\Psi}{A} . \quad (4.2a)$$

## 4.3.2. Spannung und elektrische Feldstärke

### Ursachengröße Elektrische Spannung

Die Ursachengröße des elektrostatischen Feldes ist die elektrische Spannung.

Wird an zwei parallele Metallplatten eine Spannung  $U_{AB}$  angelegt, entsteht durch eine Ladungstrennung über die Leitungen ein Ladungspaar  $+Q$  und  $-Q$ .

Zwischen Anfang und Ende einer Feldlinie liegt der Spannungsabfall  $U_{AB}$ .

Der Spannungsabfall längs der Länge  $\Delta l$  (zwischen den Punkten 1 und 2) beträgt  $\Delta U$ .

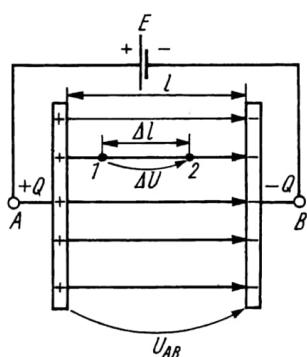


Bild 4.9  
Spannungsabfall im elektrostatischen Feld

Elektrische Feldstärke

Der Quotient aus Spannungsabfall  $\Delta U$  je Längeneinheit  $\Delta l$  wird als elektrische Feldstärke bezeichnet.

Hinweis

Die elektrische Feldstärke ist eine Meßgröße des elektrostatischen Feldes und des elektrischen Strömungsfeldes (vgl. Abschn. 3.3.3.).

Formelzeichen

$E$

Physikalischer Zusammenhang

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta l} \quad (4.3)$$

Einheit

$$[E] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ m}}$$

Für ein homogenes Feld gilt:

$$E = \frac{U}{l}. \quad (4.3 \text{ a})$$

Der Spannungsabfall  $\Delta U$  zwischen zwei Punkten ist definiert als Energie differenz  $\Delta W$  je Ladung  $Q$  zwischen beiden Punkten.

$$\Delta U = \frac{\Delta W}{Q} \quad (4.4)$$

Mit  $\Delta W = F \Delta l$

$$\text{ergibt sich } \Delta U = \frac{F \Delta l}{Q}$$

und daraus

$$\frac{\Delta U}{\Delta l} = \frac{F}{Q}.$$

Man erhält den bereits im Abschn. 3.3.2.1. formulierten

physikalischen Zusammenhang

$$E = \frac{F}{Q}. \quad (4.5)$$

## Darstellung der Kraftwirkung Feldstärkelinien

Die elektrische Feldstärke ist ein Maß für die Größe der Kraftwirkungen. Die Kraftwirkung kann durch Feldstärkelinien dargestellt werden.

Die Dichte der Feldstärkelinien ist dabei ein Maß für die Stärke der Kraftwirkung. Das Auftreten größerer Feldstärken an der „Spitze“ wird bei Blitzableiteranordnungen bewußt genutzt.

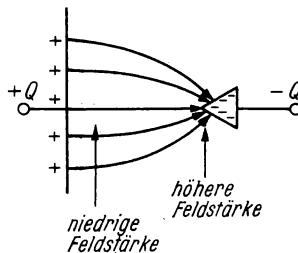


Bild 4.10  
Verlauf der Feldlinien bei einer „Spitze-Platte-Anordnung“

## Elektrischer Durchschlag

Im elektrostatischen Feld erfolgt bei Überschreitung einer bestimmten Feldstärke durch Ionisationserscheinungen der Gase bzw. der Gaseinschlüsse im Isolierstoff ein **elektrischer Durchschlag**, d.h. ein Stromfluß durch den Nichtleiter in einem Durchschlagkanal. Dieser wird hervorgerufen durch die Aufhebung der Bindungskräfte der Ladungen, wobei es zur Bildung einer Bahn höherer Leitfähigkeit kommt. Bei gleichem Abstand der Leiter ist die Höhe der Durchschlagfeldstärke abhängig vom Isolierstoff.

## Elektrische Durchschlagfestigkeit

Ist ein Maß für die Spannungsbelastbarkeit eines elektrischen Feldes.

Die elektrische Durchschlagfestigkeit  $E_D$  (in  $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  oder  $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ) ist die elektrische Feldstärke, die sich als Quotient aus der Durchschlagsspannung  $V_D$  und der Materialdicke  $d$  an der Durchschlagstelle ergibt.

Die Verhinderung von elektrischen Durchschlägen hat neben der Vermeidung von elektrischen Überschlägen eine große Bedeutung bei der Konstruktion und dem Bau von Isolatoren für die Hochspannungstechnik.

Tafel 4.1. Durchschlagfestigkeiten einiger Isolierstoffe

Isolierstoff	Durchschlagfestigkeit $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$	Dicke des Isolierstoffs
Luft ( $20^\circ\text{C}$ , $1,01 \text{ bar}$ )	3,3	1 cm
Papier	10	
Hartpapier, Porzellan	15	
Kondensa, Tempa	15	
Quarz, Glas, Glimmer, Gummi	25	
Paraffin	40	
Polystyrol	50	
Lackpapier	100	sehr gering
Aluminumoxid	100	sehr gering

Tafel 4.2. Isolierstoffe in der Elektrotechnik

Anorganische Isolierstoffe			Organische Isolierstoffe		
natürliche	künstliche		natürliche	veredelte	künstliche
Luft	Mikanit		Bernstein	Gummi	Kunstfasern
Schiefer	Glas		Schellack	Papier	Kunstharze
Glimmer	keramische Isolierstoffe		Kolophonium	Preßspan	Polyvinylchlorid
Marmor			Baumwolle	Fiber	Polystyrol
Asbest	Aluminium-Silikat-Keramik	Magnesium-Silikat-Keramik	Seide	Hartgewebe	Polyäthylen
Speckstein	(Rohstoffe: Kaolin, Feldspat, Quarz)	(Hauptrohstoff: Speckstein)	Jute	Preßstoffe	Polyisobutlen
Wasser (dest.)			Kautschuk		Polyamid
			Öle		Buna
			Holz (trocken)		Benzine
	Porzellane	Calit	Kondensat		
		Frequenta	Tempa		
		Steatit	Kerafar		

### Elektrischer Überschlag

Ist das Auftreten von Kriechströmen an der Oberfläche eines Isolierstoffes unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes und bestimmten äußeren Bedingungen, wie z. B. leitfähige Verunreinigungen, hohe Luftfeuchtigkeit oder Auftreten einer Wasserhaut an der Oberfläche des Isolierstoffes. Ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Isolierstoffes gegen Kriechspurbildung ist die Kriechstromfestigkeit.

### 4.3.3. Dielektrizitätskonstante – Zusammenhang zwischen Feldstärke und Verschiebungsflußdichte

#### Einfluß des Materials

Im Zusammenhang zwischen Feldstärkegröße und Felddichtegröße kommt immer der Einfluß der verwendeten Materialien zum Ausdruck.

Im homogenen elektrostatischen Feld sind die Feldstärke  $E$  und die Verschiebungsflußdichte  $D$  proportional der Ladung  $Q$ .

Analog zur Beziehung im Strömungsfeld gilt

$$D = \text{Materialkonstante} \cdot E .$$

Die Materialkonstante wird als Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  (Epsilon) bezeichnet.

$$\text{Physikalischer Zusammenhang} \quad D = \epsilon E \quad (4.6)$$

#### Absolute Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0$

Die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  setzt sich aus einer Naturkonstanten  $\epsilon_0$  und einer Vergleichszahl  $\epsilon_r$  (für das jeweilige Dielektrikum) zusammen.

$\epsilon_0$  wird als absolute Dielektrizitätskonstante oder Influenzkonstante bezeichnet.

$$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4.7)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

## Relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r$

Die relative Dielektrizitätskonstante ist eine Vergleichszahl (Abkürzung DK).

Sie gibt an, wievielmal besser ein Stoff elektrisierbar ist als Vakuum. Unter Elektrisierbarkeit versteht man die Möglichkeiten zum Aufbau eines elektrostatischen Feldes. Die relativen Dielektrizitätskonstanten einiger Isolierstoffe sind in Tafel 4.3 zusammengestellt.

Tafel 4.3. Relative Dielektrizitätskonstanten einiger Isolierstoffe (Mittelwerte)

Isolierstoff	$\epsilon_r$	Isolierstoff	$\epsilon_r$
Vakuum	1	Schellack	3,1
Luft	1	Pertinax (Hartpapier)	4,8
Papiersorten	1,8 ... 2,6	Porzellan	4,5 ... 6
Paraffin	2 ... 2,3	Hartgewebe	5 ... 6
Polystyrol	2,4	Holz	2,5 ... 6,8
Trafoöl	2,2 ... 2,5	Glas	5 ... 10
Gummi	2,7	Glimmer	5 ... 10
Bernstein	2,9	Wasser (dest.)	80

Für die Bauelementefertigung werden keramische Stoffe als Kondensatormassen verwendet. Die Hauptbestandteile und relativen Dielektrizitätskonstanten einiger keramischer Massen sind in Tafel 4.4 zusammengestellt.

Tafel 4.4. Hauptbestandteile und relative Dielektrizitätskonstanten einiger keramischer Massen

Bezeichnung	Hauptbestandteil	$\epsilon_r$
Frequenta	$\text{MgSiO}_3$	6
Tempa	$2 \text{ MgO TiO}_2$	14- 16
Kondensa	$\text{TiO}_2$	46- 85
Bariumtitantat	$\text{BaTiO}_3$	1500- 2200
Epsilan	$\text{BaTiO}_3 + \text{Zuschläge}$	1 000-10 000

### Hinweis

Die Namen Frequenta, Tempa, Kondensa und Epsilan waren Markenbezeichnungen und sind nicht mehr gebräuchlich. Auch später eingeführte Gruppenbezeichnungen wie KER 320, KER 310 usw. - das ordnende Element bildete die DK - sind nicht mehr üblich.

Entsprechend den IEC-Empfehlungen werden die Kondensatormassen nach ihrem Temperaturbeiwert geordnet und nach den Kurzbezeichnungen dieser Kennwerte benannt (z. B. P  $\geq$  positiv; P 100).

### 4.3.4. Dielektrischer Verschiebungsstrom

Eine zeitliche Veränderung des elektrostatischen Feldes hat einen Ladungstransport zur Folge. Ändern sich die Ladungen  $+Q$  und  $-Q$  eines elektrostatischen Feldes, fließt in den Zuleitungen ein Leistungsstrom.

$$I_L = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (4.8)$$

Solange ein Leistungsstrom fließt, ändert sich die Ladung auf den Platten und somit der Verschiebungsfluß  $\Psi$  im Dielektrikum.

Nach Gl. (4.1) ist

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta \Psi}{\Delta t} . \quad (4.9)$$

Dielektrischer  
Verschiebungsstrom

Die zeitliche Änderung des Verschiebungsflusses wird als dielektrischer Verschiebungsstrom bezeichnet.

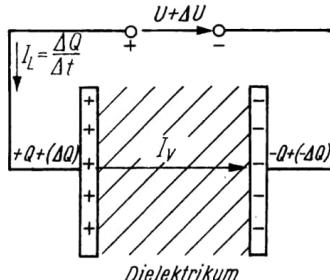


Bild 4.11  
Zur Definition des Leitungs- und  
Verschiebungsstroms

Formelzeichen

$I_v$

Physikalischer  
Zusammenhang

$$I_v = \frac{\Delta \Psi}{\Delta t}$$

Einheit

$$\left[ I_v \right] = \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ A}$$

(4.10)

Der dielektrische Verschiebungsstrom ist die Stromerscheinung im Nichtleiter und kann als Fortsetzung des Leitungsstromes  $I_L$  betrachtet werden.

Es ist

$$I_v = I_L . \quad (4.11)$$

Wie jeder elektrische Strom ist auch der dielektrische Verschiebungsstrom mit einem magnetischen Feld verknüpft.

Hinweis

Vgl. Abschn. 5.3.

## 4.4. Kondensator

### 4.4.1. Kapazität von Kondensatoren

Begriffsbestimmung  
„Kondensator“

Jede beliebige Anordnung „Leiter – Nichtleiter – Leiter“ wird als Kondensator bezeichnet, wenn sie die Eigenschaft hat, elektrische Ladungen zu speichern.

Allgemeines Schaltzeichen:

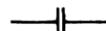


Bild 4.12.

Bedingungsgröße  
des elektro-  
statischen Feldes

Um die Bedingungsgrößen, die zwischen Wirkungs- und Ursachengrößen des elektrostatischen Feldes vorhanden sind, zu erfassen, wird, wie im elektrischen Strömungsfeld, definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

## Eigenschaft Kapazität

Im elektrostatischen Feld wird die Kapazität eines Kondensators als Bedingungsgröße eingeführt.

Formelzeichen

C

Physikalischer Zusammenhang

$$C = \frac{Q}{U}$$

(4.12)

Gültigkeitsbedingung

ebener Plattschnitt

Einheit

Farad

$$[C] = \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ V}} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \text{ F}$$

1 Farad ist eine sehr große, technisch nicht realisierbare Einheit.

- Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F} = 1 \text{ Mikrofarad}$$

$$1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ Nanofarad}$$

$$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F} = 1 \text{ Pikofarad}$$

## Farad

Das Farad ist die Kapazität eines Kondensators, der durch die Elektrizitätsmenge 1 C auf die Spannung 1 V aufgeladen wird.

## Speicherung elektrischer Energie

Die Kapazität C gibt Auskunft darüber, wie groß die Speicherfähigkeit eines Kondensators für elektrische Ladungen ist.  
Die Kapazität entspricht einer Leitwertgröße.

### Hinweis

Vgl. Abschn. 3.4.2.1.

## 4.4.2. Bemessungsgleichung der Kapazität

### Bemessung von Kapazitäten

Die Kapazität C ist eine Konstruktionsgröße, die in der Praxis vorausbestimmt ist. Die Kapazität wird um so größer,

- je größer die dielektrische Durchlässigkeit des Isolierstoffs ist,
- je geringer die Isolierstoffdicke ist,
- je größer die Plattenfläche ist.

### Bemessungs-gleichung

Physikalischer Zusammenhang

$$C = \epsilon \frac{A}{l}$$

(4.13)

C Kapazität in F,

l Abstand der Plattenflächen (Isolierstoffdicke) in m,

A Plattenfläche in m<sup>2</sup>,

ε Dielektrizitätskonstante in A·s/V·m.

## 4.5. Zusammenschaltung von Kondensatoren

Wie alle Zweipole können Kondensatoren mit anderen zusammengeschaltet werden.

### Arten der Zu-sammenschaltung

- Reihenschaltung von Kondensatoren
- Parallelschaltung von Kondensatoren

## Ersatzkapazität

Zur besseren Beschreibung des elektrischen Verhaltens einer Zusammenschaltung von mehreren Kondensatoren wird die Ersatzkapazität  $C_{ers}$  gebildet. Die Ersatzkapazität ist die wirksame Gesamtkapazität einer Kondensatorenzusammenschaltung.

### 4.5.1. Reihenschaltung von Kondensatoren – Ermittlung der Ersatzkapazität

Bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren ist die Ladungsmenge  $Q$  aller Einzelkapazitäten gleich groß.

Für die Reihenschaltung von  $n$  Kondensatoren gilt

$$Q_{ers} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \quad (4.14)$$

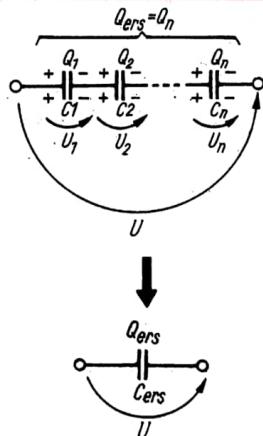


Bild 4.13  
Ersatzkapazität einer Reihenschaltung

Für die Summe der Teilspannungen gilt nach dem Maschensatz [Gl. (3.19)]

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (4.15)$$

Aus  $U = \sum_{k=1}^n U_k$ ;  $Q_{ers} = Q_n$  und

$\frac{1}{C} = \frac{U}{Q}$  ergibt sich

$$\frac{1}{C_{ers}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (4.16)$$

## Ersatzkapazität

$$\frac{1}{C_{ers}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \quad (4.17)$$

Der Kehrwert der Ersatzkapazität ist gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelkapazitäten.

Bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren ist die Ersatzkapazität stets kleiner als die kleinste Einzelkapazität.

Durch eine Reihenschaltung von Kondensatoren wird die Kapazität also stets verkleinert.

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (4.13) der Kapazität gilt:

Die Verringerung der Kapazität bei einer Reihenschaltung von Kondensatoren ist mit der Vergrößerung des Plattenabstandes bzw. der Isolierstoffdicke vergleichbar.

Ersatzkapazität für n Kondensatoren gleicher Kapazität

$$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \frac{n}{C_n}$$

↓

$$C_{\text{ers}} = \frac{C}{n} \quad (4.18)$$

Ersatzkapazität zweier Kondensatoren

$$C_{\text{ers}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (4.19)$$

Hinweis

Da die Kapazität eine Leitwertgröße ist, ergeben sich Analogien zur Berechnung von zusammengeschalteten elektrischen Leitwerten.

Nach den Gln. (4.14), (4.16), (4.17) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad \dots \quad (4.20)$$

Die Teilspannungen über den Kondensatoren verhalten sich bei einer Reihenschaltung umgekehrt wie die dazugehörigen Kapazitäten.

#### 4.5.2. Parallelschaltung von Kondensatoren – Ermittlung der Ersatzkapazität

Bei einer Parallelschaltung von Kondensatoren liegt über jeder Einzelkapazität die gleiche Spannung.

Für die Parallelschaltung von n Kondensatoren gilt

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (4.21)$$

Für die Summe der Ladungsmengen gilt nach dem Knotenpunktsatz [Gl. 3.18]

$$Q_{\text{ers}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (4.22)$$

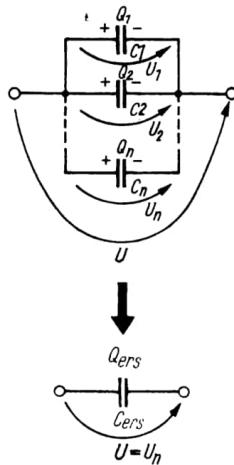


Bild 4.14  
Ersatzkapazität einer Parallelschaltung

$$\text{Aus } U_{\text{ers}} = U_n; \quad Q_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n Q_k \quad \text{und}$$

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{ergibt sich}$$

$$C_{\text{ers}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (4.23)$$

Ersatzkapazität

$$C_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n C_k \quad (4.24)$$

Die Ersatzkapazität ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

Bei einer Parallelschaltung von Kondensatoren ist die Ersatzkapazität stets größer als die größte Einzelkapazität.

Unter Beachtung der Bemessungsgleichung (4.13) der Kapazität gilt:

Die Vergrößerung der Kapazität bei einer Parallelschaltung von Kondensatoren ist mit einer Vergrößerung der Plattenfläche vergleichbar.

Ersatzkapazität von  
n Kondensatoren  
gleicher Kapazität

$$C_{\text{ers}} = n C_n \quad (4.25)$$

Nach den Gl. (4.21), (4.22), (4.23) entsteht durch Verhältnisbildung

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2}. \quad (4.26)$$

Die Ladungsmengen von Kondensatoren in Parallelschaltungen verhalten sich zueinander wie die dazugehörigen Kapazitäten.

## 4.6. Kondensatoranordnungen mit geschichtetem Dielektrikum

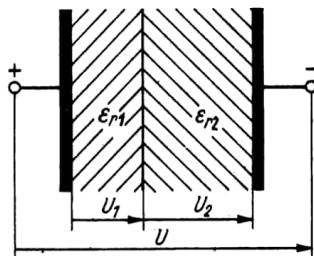


Bild 4.15.  
Kondensatoranordnung mit geschichtetem Dielektrikum

Ein Kondensator mit quergeschichteten Isolierstoffen unterschiedlicher relativer Dielektrizitätskonstanten entspricht einer Reihenschaltung von Kondensatoren mit verschiedener Kapazität.  
Für eine Anordnung mit zwei Schichten gilt

$$\text{Teilkapazität } C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{A}{l_1},$$

$$\text{Teilkapazität } C_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{A}{l_2}.$$

Nach Gl. (4.19) ergibt sich

Kapazität bei  
geschichtetem  
Dielektrikum

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{\frac{l_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{l_2}{\epsilon_{r2}}}. \quad (4.27)$$

Spannungs-  
verhältnisse

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (4.20a)$$

Die Teilspannungen  $U_1$  und  $U_2$  verhalten sich umgekehrt wie die dazugehörigen Teilkapazitäten.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{A}{l_2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{A}{l_1}}$$

↓

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_{r2} l_1}{\epsilon_{r1} l_2} \quad \text{oder} \quad \frac{\frac{U_1}{l_1}}{\frac{U_2}{l_2}} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}.$$

$$\text{Mit } E_1 = \frac{U_1}{l_1} \quad \text{und} \quad E_2 = \frac{U_2}{l_2}$$

ergibt sich

Feldstärke-  
verhältnisse

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}.$$

(4.28)

In einer Kondensatoranordnung mit geschichtetem Dielektrikum verhalten sich die Feldstärken zueinander umgekehrt wie die dazugehörigen relativen Dielektrizitätskonstanten.

Aus dem Feldstärkeverhältnis läßt sich ableiten, daß bei Anwendung zweier verschiedener Dielektrika der Stoff mit den schlechteren Isoliereigenschaften durch eine höhere Feldstärke belastet wird.

Schlußfolgerungen für die Praxis

Die Gefahr einer zu hohen Beanspruchung besteht besonders bei Lufteinschlüssen im Dielektrikum.

Der kleine Wert der Dielektrizitätskonstanten für Luft ( $\epsilon_r \approx 1$ ) führt oft zu unzulässig hohen Feldstärken, die Erwärmung und elektrische Durchschläge hervorrufen können (vgl. Abschn. 4.3.2.).

## 4.7. Erwünschte und unerwünschte Kondensatoranordnungen

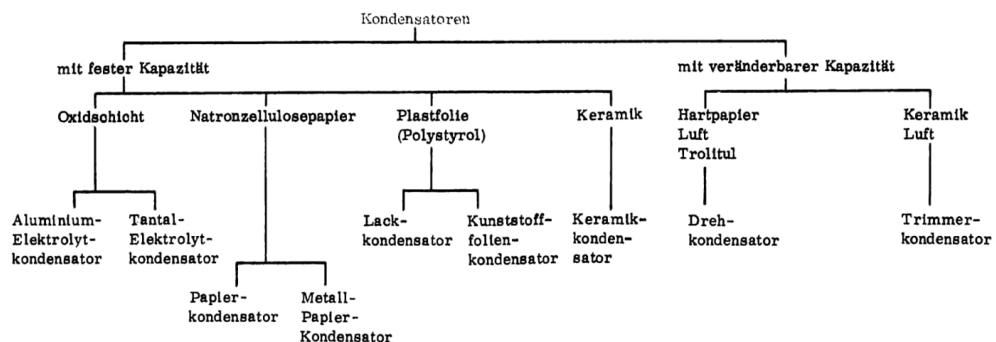
Erwünschte Kon-  
densatoranordnung

Elektrotechnisches  
Grundbauelement  
Kondensator

Der Kondensator ist das Bauelement, das als technisches Objekt auf den Gesetzmäßigkeiten der Erscheinungen im Nichtleiter beruht.

Der Kondensator ist wie der Widerstand und die Spule ein Grundbauelement der Elektrotechnik.

Tafel 4.5. Einteilung der Kondensatoren nach dem Dielektrikum



An Kondensatoren werden technisch notwendige Forderungen gestellt:

- Konstanz der Kapazität,
- veränderbare oder feste Kapazität,

- Spannungsbelastbarkeit,
- Bauform je nach Einsatzzweck.

Diese konstruktiven Eigenschaften bestimmen den Einsatz von Kondensatoren.

Hinweis

Vgl. auch Wissensspeicher „Elektronik-Bauelemente“.

### Unerwünschte Kondensatoranordnung

Aus der Definition eines Kondensators geht hervor, daß voneinander isolierte Leiter oder leitfähige Materialien, zwischen denen eine Spannung anliegt, eine Kondensatoranordnung darstellen. In elektrischen Schaltungen und Anlagen treten unerwünschte Kapazitäten auf

- zwischen parallelaufenden elektrischen Leitungen,
- zwischen Leitungen und benachbarten Metallteilen von Gehäusen oder Gestellen,
- zwischen Windungen von Spulen,
- zwischen Schalterkontakten,
- zwischen Anschlußfahnen von Röhren- und Transistorfassungen,
- zwischen Elektroden elektrischer Bauelemente.

## 4.8. Verlustlose und verlustbehaftete Kondensatoren

### Verlustlose Kondensatoren

Verlustlose Kondensatoren sind idealisierte Kondensatoren. Sie dienen zur besseren theoretischen Erfassung von bestimmten Eigenschaften.

Derartige Kondensatoren sind technisch nicht realisierbar, da die als Dielektrikum verwendeten Stoffe keine absoluten Nichtleiter sind.

Hinweis

Vgl. Abschn. 2.2.

### Verlustbehaftete Kondensatoren

Alle technischen Kondensatoranordnungen sind verlustbehaftet und damit reale Kondensatoren.

In einem Kondensator treten

- Isolationsverluste und
- dielektrische Verluste

auf.

Die in einem Kondensator auftretenden Verluste werden in einem Verlustwiderstand  $R_V$  zusammengefaßt, der im Ersatzschaltplan parallel zu einem verlustlosen Kondensator liegt.

Die Verluste führen zu einer Erwärmung des Kondensators.

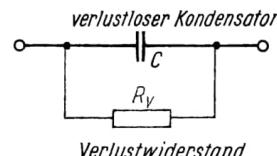


Bild 4.16. Ersatzschaltung eines verlustbehafteten Kondensators

### Isolationsverluste

Durch den endlichen Isolationswiderstand des Dielektrikums fließt ein Isolations- oder Leckstrom.

## 4.9. Verhalten von Kondensatoren bei verschiedenen Betriebsarten

### 4.9.1. Verhalten von Kondensatoren an unveränderlicher Gleichspannung

Das Dielektrikum eines idealen Kondensators ist absoluter Nichtleiter.

Zwischen den Platten fließt kein Strom. Auf den Kondensatorplatten herrscht ein Elektronenüberschuss bzw. -mangel ( $+Q$ ,  $-Q$ ).

Wird ein geladener Kondensator aus dem Stromkreis entfernt, so bleibt das Ladungspaar  $+Q$ ,  $-Q$  auf den Platten bestehen.

(Voraussetzung: Widerstand des Dielektrikums unendlich groß.)

Der ideale Kondensator wirkt als Speicher elektrischer Energie.

Es tritt keine Energie aus dem Stromkreis heraus.

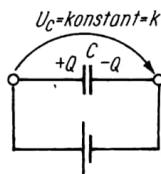


Bild 4.17  
Kondensator an  
unveränderlicher Gleichspannung

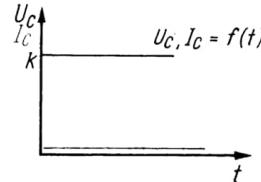


Bild 4.18  
Strom- und Spannungsverlauf bei  
unveränderlicher Gleichspannung

### 4.9.2. Verhalten von Kondensatoren an veränderlicher Gleichspannung

Jede Spannungsänderung am Kondensator führt zu einem Ladungstransport.

Gl. (4.12) erhält die Form

$$\Delta Q = C \Delta U.$$

Mit Gl. (3.1),  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ , wird

$$I = C \frac{\Delta U}{\Delta t}. \quad (4.29)$$

An einem Kondensator fließt nur ein Strom, wenn und solange sich die über dem Kondensator liegende Spannung zeitlich ändert.

Der Strom ist von der richtungsbehafteten zeitlichen Spannungsänderungsgeschwindigkeit abhängig.

$$I \sim \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

Die Stromrichtung ist bei

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} > 0 \quad \text{positiv,}$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} < 0 \quad \text{negativ}$$

definiert.

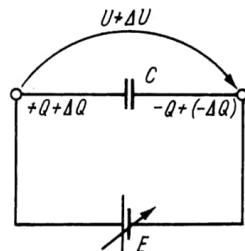


Bild 4.19  
Kondensator an veränderlicher  
Gleichspannung

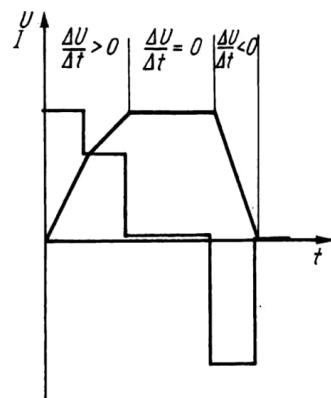


Bild 4.20  
Strom- und Spannungsverlauf bei  
veränderlicher Gleichspannung

### 4.9.3. Verhalten von Kondensatoren bei Schaltvorgängen

#### 4.9.3.1. Begriffsbestimmungen bei Schaltvorgängen

Einschaltvorgang

Einschalten ist das zeitlich sprunghafte Anwachsen einer beliebigen Speisespannung  $U_N$  von Null auf einen bestimmten Wert in der Zeitänderung  $\Delta t = 0$ .

Für allgemeine Betrachtungen ist es unbedeutend, auf welche Weise die Speisespannung  $U_N$  erzeugt wird.

Der Einschaltvorgang wird idealisiert betrachtet, da er praktisch in  $\Delta t = 0$  nicht realisiert werden kann.

Einschaltzeitpunkt

Ist diejenige Zeit  $t_{\text{ein}}$ , in der das sprunghafte Anwachsen der geschalteten Größe stattfindet.

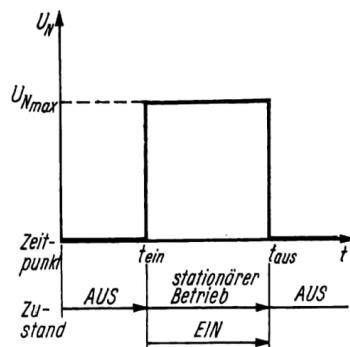


Bild 4.21  
Verhalten eines Kondensators bei  
Einschalt- und Ausschaltvorgängen

Betriebszustand  
oder  
stationärer Betrieb

Kennzeichnet das zeitlich beliebig lange Erhalten einer bestimmten Spannung.

Ausschaltvorgang

Ausschalten ist das zeitlich sprunghafte Sinken einer beliebigen Speisespannung  $U_N$  von ihrem augenblicklichen Wert auf den Wert Null in der Zeitänderung  $\Delta t = 0$ .

Ausschaltzeitpunkt

Der Ausschaltvorgang wird idealisiert betrachtet, da er praktisch in  $\Delta t = 0$  nicht realisiert werden kann.

Ist diejenige Zeit  $t_{aus}$ , in der das sprunghafte Sinken der geschalteten Größe stattfindet.

#### 4.9.3.2. Lade- und Entladevorgänge an Kondensatoren

Laden und Entladen von Kondensatoren

Ein ungeladener Kondensator mit der Kapazität  $C$  wird zum Zeitpunkt  $t = t_{ein}$  mit Hilfe eines Umschalters  $S$  über einen Wirkwiderstand  $R_1$  an eine Gleichspannung  $U_N$  angeschlossen.

Der geladene Kondensator kann über  $R_2$  wieder entladen werden.

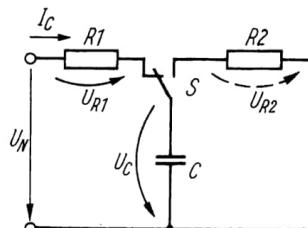


Bild 4.22  
Prinzipschaltplan für das Ein- und Ausschalten eines Kondensators

Hinweis

Für die allgemeine Betrachtung wird ein idealer Kondensator mit einem Verlustwiderstand  $R_V = \infty$  angenommen (vgl. Abschn. 4.8.).

Spannung am Kondensator beim Einschalten und nach dem Einschalten

Einschaltzeitpunkt	$t = t_{ein}$	$U_C = 0$ $U_{R1} = U_N$	$\Delta t = 0$
Nach dem Einschalten	$t = t_1$	$U_C > 0$ $U_{R1} < U_N$	$\Delta t > 0$
	$t = t_2$	$U_C \gg 0$ $U_{R1} \ll U_N$ $U_C \approx U_N$	$\Delta t > 0$

Dem Verlauf von  $U_C$  liegt eine Gesetzmäßigkeit des natürlichen Wachstums zugrunde. Die entsprechenden funktionalen Abhängigkeiten sind Exponentialfunktionen.

Für den Verlauf von  $U_C$  gilt

$$U_C = U_N - \frac{U_N}{t} = U_N \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (4.30)$$

Ein ungeladener Kondensator wirkt beim Einschalten wie ein Kurzschluß, da die Spannung  $U_C$  Null ist.

Die Spannung an einem Kondensator, der auf ein Netz zugeschaltet wird, steigt zeitlich verzögert an.

Der stationäre Betriebszustand an Kondensatoren tritt erst zeitlich verzögert nach dem Einschaltzeitpunkt  $t_{ein}$  ein.

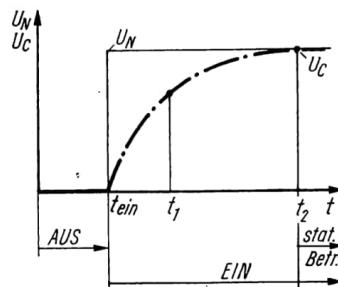


Bild 4.23  
Spannungsverlauf beim Einschalten und  
nach dem Einschalten

Spannung am  
Kondensator beim  
Ausschalten und  
nach dem  
Ausschalten

Ausschaltzeitpunkt	$t = t_{aus}$	$U_C = U_N$ $U_{R2} = U_N$	$\Delta t = 0$
Nach dem Ausschalten	$t = t_3$	$U_C < U_N$ $U_{R2} < U_N$	$\Delta t > 0$
	$t = t_4$	$U_C = 0$ $U_{R2} = 0$ $U_C \ll U_N$	$\Delta t > 0$

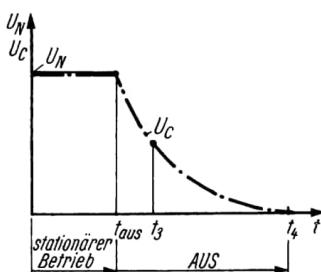


Bild 4.24  
Spannungsverlauf beim Ausschalten und nach  
dem Ausschalten

## Ausschalt- bzw. Entladevorgänge

Über den Entladewiderstand  $R_2$  erfolgt ein Ladungsausgleich. Die Spannung am Kondensator sinkt je nach Größe der Kapazität und des Entladewiderstandes zeitverzögert.

Für den Verlauf von  $U_C$  gilt

$$U_C = \frac{U_N}{e^{\frac{t}{RC}}} = U_N e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.31)$$

Ein geladener Kondensator wirkt beim Ausschalten wie eine Spannungsquelle.

Die Spannung an einem Kondensator, der über einen geeigneten Entladestromkreis entladen wird, geht zeitlich verzögert auf Null zurück.

Strom im Kondensatorstromkreis beim Einschalten und nach dem Einschalten

Nach Gl. (4.29) fließt beim Einschalten ein Strom. Im Einschaltzeitpunkt  $t_{ein}$  ist die Spannungsänderung am größten.

Bei einer zeitlichen Änderung  $\Delta t = 0$  ergibt sich ein Einschalt- oder Ladestromstoß. Je geringer die Spannungsdifferenz zwischen der Kondensatorspannung  $U_C$  und der Speisespannung  $U_N$  wird, desto geringer ist der zur Ladungsspeicherung erforderliche Strom  $I_C$ .

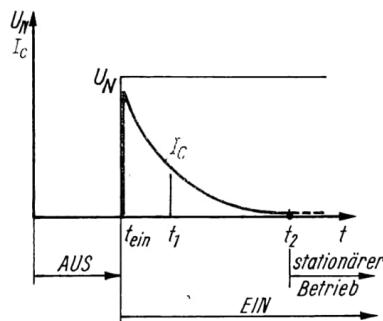


Bild 4.25  
Stromverlauf beim Einschalten und nach dem Einschalten

Für den Verlauf des Einschalt- oder Ladestromes gilt

$$I_C = \frac{U_N}{R} \frac{1}{e^{\frac{t}{RC}}} = \frac{U_N}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.32)$$

Beim Einschalten eines ungeladenen Kondensators entsteht ein hoher Ladestromstoß.

Strom im Kondensatorstromkreis beim Ausschalten und nach dem Ausschalten

Im Ausschaltzeitpunkt  $t_{aus}$  hat ebenfalls die Spannungsänderung ihren größten Wert. Bei einer zeitlichen Änderung  $\Delta t = 0$  ergibt sich wiederum ein großer Abschalt- oder Entladestromstoß, der dem Einschalt- oder Ladestromstoß entgegengerichtet ist (vgl. Abschnitt 4.9.2.).

Für den Verlauf des Abschalt- oder Entladestroms gilt

$$I_C = - \frac{U_N}{R} \cdot \frac{1}{t} = - \frac{U_N}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.33)$$

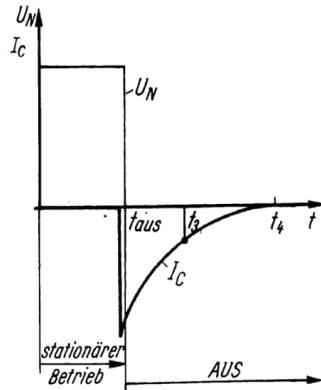


Bild 4.26  
Stromverlauf beim Ausschalten und nach dem Ausschalten

#### Hinweis

$U_N$  vorzeichenbehaftet einsetzen.

Ist der Entladewiderstand  $R = 0$ , fließt ein hoher Kurzschlußstrom, der schädliche Auswirkungen auf den Kondensator haben kann:

- Beschädigung der Zuleitungen zu den Belägen,
- elektrodynamische Kraftwirkungen.

Geladene Kondensatoren dürfen nie kurzgeschlossen und darum nur über geeignete Widerstände entladen werden.

#### Hinweis

Im Gegensatz zu diesem Grundsatz werden Starkstromkabel abgeschaltet, geerdet und kurzgeschlossen.

#### Energiebetrachtungen für den geschalteten Kondensator

#### Energieumwandlung beim Aufladevorgang

Wird ein Kondensator durch eine Speisespannung  $U_N$  aufgeladen, erfolgt ein Energieumsatz. Der Speisespannungsquelle wird Energie entzogen, die zum Aufbau des elektrostatischen Feldes im Kondensator dient und eine Ladungsverschiebung im Dielektrikum bewirkt (vgl. Abschn. 4.3.1.).

#### Kinetische Energie

Beim Aufladen eines Kondensators wird kinetische Energie des elektrischen Strömungsfeldes benötigt. Nach Gln. (3.3) und (3.44) ist die zum Aufbau des elektrostatischen Feldes an den Kondensator abgegebene Energie

$$\Delta W = \Delta Q \cdot U_C \quad \text{oder}$$

$$\Delta W = U_C \cdot I_C \cdot \Delta t$$

## Energiespeicherung Potentielle Energie

Ist das elektrostatische Feld vollkommen aufgebaut, stellt sich ein stationärer Betriebszustand ein, indem die vorher vorhandene kinetische Energie bewegter Ladungen in Form potentieller Energie ruhender Ladungen im Kondensator gespeichert wird.

### Hinweis

Die zugeführte Energie tritt also nicht, wie im Abschn. 3.8.1.2. für Widerstände dargestellt, aus dem Kreis in Form von thermischer, mechanischer oder chemischer Energie heraus.

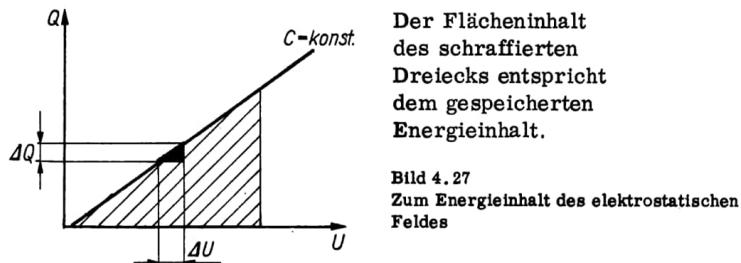
Für die im Kondensator gespeicherte Energie gilt:

$$W_C = \frac{C U^2}{2} \quad (4.34)$$

Eine vollständige Herleitung dieser Beziehung erfordert Kenntnisse der höheren Mathematik.

Eine Möglichkeit für das Verständnis der Gl. (4.34) bietet sich mit Hilfe einer grafischen Konstruktion. Nach vollständiger Aufladung eines Kondensators mit konstanter Kapazität bestehen die Bedingungen (vgl. Bild 4.27):

$$Q = \text{konst.} \quad U_C = U_N = \text{konst.} \quad C = \text{konst.}$$



Aus Bild 4.27 wird gleichfalls deutlich, daß die angegebenen Beziehungen sich auch auf sehr kleine Spannungs- und Ladungsmengen anwenden lassen (kleines schwarzes Dreieck). Das ist dann von Bedeutung, wenn  $Q$  und  $U$  nicht proportional verlaufen. Dann kann der Energieinhalt aus der Summierung kleinsten Flächen ermittelt werden.

## Energieinhalt des elektrostatischen Feldes

Weiterhin gelten

$$W = Q U \quad \text{und} \quad Q = C U$$

Damit ist  $Q \sim U$ .

Aus einer Dreiecksberechnung folgt

$$W_{\text{pot}} = \frac{U Q}{2}$$

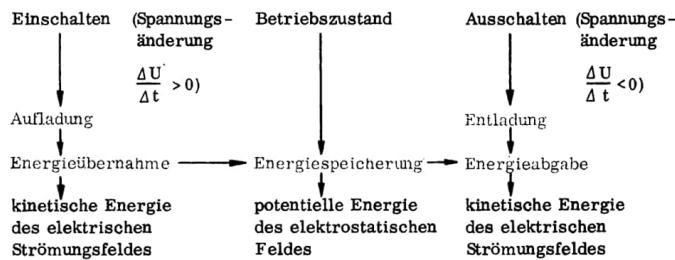
und mit  $Q = C U$  entsteht

$$W_{\text{pot}} = \frac{C U^2}{2} \quad (4.34)$$

Über die Einheiten kann die Richtigkeit der Beziehung überprüft werden.

$$\left[ W_{\text{pot}} \right] = \frac{1 \text{ A} \cdot \text{s} \cdot 1 \text{ V}^2}{1 \text{ V}} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$$

Tafel 4.6. Energiebetrachtung



## 4.10. Zeitkonstante von Kondensatoren

In den Gln. (4.30) bis (4.33) erscheint der mathematische Ausdruck  $RC$ . Das Produkt aus Widerstand  $R$  und Kapazität  $C$  ist eine Konstante, die Bedeutung für alle Schaltvorgänge hat.

Zeitkonstante

Die Konstante hat die Maßeinheit einer Zeit und wird deshalb als Zeitkonstante  $\tau$  bezeichnet.

Physikalischer Zusammenhang

$$\tau = C R$$

(4.35)

Einheit

$$[\tau] = \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} \cdot 1 \text{ V}}{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}} = 1 \text{ s}$$

Die Zeitkonstante  $\tau$  gibt die Zeit an, nach der der Ladestrom auf das  $\frac{1}{e}$ -fache (etwa 37 %) seines Anfangswertes abgeklungen ist bzw. die Kondensatorspannung das  $(1 - \frac{1}{e})$ -fache (etwa 63 %) ihres Endwertes erreicht hat.

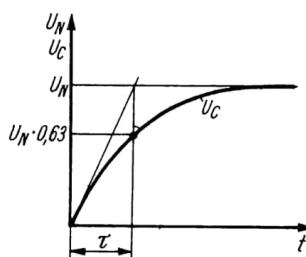


Bild 4.28  
Ermittlung der Zeitkonstanten aus dem Spannungsverlauf

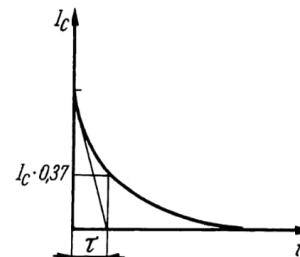


Bild 4.29  
Ermittlung der Zeitkonstanten aus dem Stromverlauf

Halbwertzeit

Als Halbwertzeit  $t_H$  wird die Zeit bezeichnet, nach der die Kondensatorspannung die Hälfte ihres Endwertes erreicht hat.

$$t_H = 0,7 \tau$$

(4.36)

Praktische Bezüge

Die in den Bildern 4.23 bis 4.29 dargestellten Funktionen gelten in der Praxis als abgeklungen, wenn

$$t \approx 5 \tau \text{ ist.}$$

Dieser Richtwert ist insbesondere in der Signalübertragung von Bedeutung.

## 5. Elektromagnetische Erscheinungen

### 5.1. Elektromagnetisches Feld

Begriffsbestimmung  
„elektromagnetisches Feld“

Der physikalische Raum, in dem elektromagnetische Erscheinungen auftreten, wird als elektromagnetisches Feld bezeichnet.

Obwohl das Auftreten magnetischer Felder immer mit bewegten elektrischen Ladungen verknüpft ist, verwendet man in der Fachliteratur häufig nur den Begriff „magnetisches Feld“. Mit dem Begriff „elektromagnetisches Feld“ werden umfassendere Erscheinungen beschrieben. Im Unterrichtsfach „Grundlagen der Elektrotechnik“ soll aus Gründen der Einheitlichkeit der Begriff „elektromagnetisches Feld“ verwendet werden.

Wesen und Erscheinungen

- Das elektromagnetische Feld ist ein räumlicher Zustand der Materie. Es ist eine mögliche Erscheinungsform der Materie.
- Die Maßgrößen des elektromagnetischen Feldes sind richtungsbefestigt (Vektorfeld).
- Die Feldlinien sind in sich geschlossen.
- Das Auftreten elektromagnetischer Felder ist stets mit bewegten elektrischen Ladungen verknüpft.

Wirkungen

Das elektromagnetische Feld ist an seinen Kraftwirkungen

- auf bestimmte Stoffe (besonders Eisen, Nickel, Kobalt),
- auf Ladungsträger (Elektronen, Ionen)

erkennbar und nachweisbar.

Aus der Energie des elektromagnetischen Feldes kann unter bestimmten Bedingungen elektrische Energie zurückgewonnen werden.

### 5.2. Darstellung und Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes

#### 5.2.1. Feldbilder

Feldlinien

Das elektromagnetische Feld kann mit Hilfe von Feldlinien veranschaulicht werden. Diese beschreiben die Kraftwirkungen des Feldes auf magnetisierbare Stoffe.

- Die Feldlinien haben eine bestimmte Richtung.
- Die Dichte der Feldlinien ist proportional der Intensität der Wirkungen des elektromagnetischen Feldes.
- Feldlinien haben das Bestreben, sich zu verkürzen.
- Eine Folge daraus sind Zugkräfte längs zu den Feldlinien und Druckkräfte quer zu den Feldlinien.

Hinweis

Vgl. auch Abschnitte 3.3. und 4.2.

Magnetpole	Sind Stellen der größten magnetischen Wirksamkeit im elektromagnetischen Feld. Es wird zwischen magnetischem Nordpol und Südpol unterschieden.
Magnetisches Kraftwirkungsgesetz	Entgegengesetzte magnetische Pole ziehen einander an, gleichmagnetisierte Pole stoßen einander ab.
Richtung der Feldlinien	Festlegung: Feldlinien verlaufen außerhalb eines Magneten vom magnetischen Nordpol zum magnetischen Südpol, im Magneten vom Südpol zum Nordpol.
Feldarten	<p style="text-align: center;">Elektromagnetische Felder</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>homogene</li> <li>inhomogene</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>parallel-homogene</li> <li>radial-homogene</li> </ul>
Parallel-homogene Felder	Feldlinien laufen parallel zueinander und weisen überall die gleiche Dichte auf.
Radial-homogene Felder	Feldlinien laufen senkrecht ohne Richtungsänderung von der Oberfläche der Polkante weg.
Inhomogene Felder	Erfüllen nicht die Bedingungen für ein homogenes Feld.

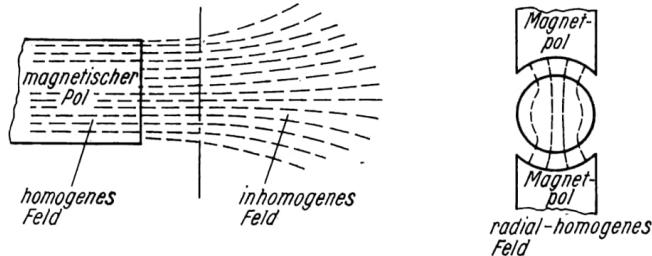


Bild 5.1. Feldlinienverläufe

#### Hinweis

In der Praxis können vollkommen homogene elektromagnetische Felder nicht erreicht werden. Homogene Felder sind Idealisierungen der Realität.

### 5.2.2. Erscheinungen des elektromagnetischen Feldes

Ferromagnetische Werkstoffe (Fe, Co, Ni) im Magnetfeld

Wird ein ferromagnetischer Werkstoff dem Magnetfeld  
 • einer **stromdurchflossenen Spule**  
 • eines **Permanentmagneten**

genähert, erfolgt eine starke Ausrichtung der Weißschen Bezirke im Ferromagnetikum.

Nach dem elektromagnetischen Kraftwirkungsgesetz werden die Elementarmagneten beeinflusst.

Diesen Vorgang bezeichnet man als **magnetische Influenz**.

Bringt man ein ferromagnetisches Material in ein Magnetfeld ein, so ist eine Feldveränderung feststellbar (Bild 5.2).

Ein Ferromagnetikum bündelt elektromagnetische Feldlinien.

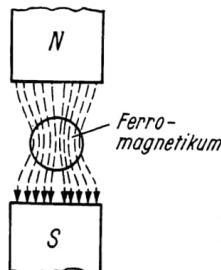


Bild 5.2  
Ferromagnetika im Magnetfeld

Magnetische  
Abschirmung

Die abschirmende Wirkung von ferromagnetischen Ringen (Bild 5.3) wird technisch angewandt

- bei Meßwerkabschirmungen.
- zum Schutz von Einrichtungen gegen störende Magnetfelder.

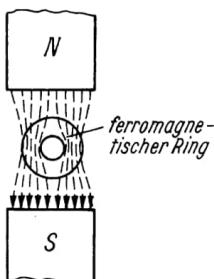


Bild 5.3  
Feldfreier Raum im Inneren eines Eisenringes

### 5.3. Elektromagnetische Felder elektrischer Ströme

Jede Bewegung elektrischer Ladungen erzeugt ein elektromagnetisches Feld.

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem elektromagnetischen Feld „umwirbelt“. Deshalb wird das elektromagnetische Feld auch als **Wirbelfeld** bezeichnet.

Dies bedeutet, daß sowohl das elektrische Strömungsfeld als auch jede Ladungsbewegung im elektrostatischen Feld mit dem Auftreten von elektromagnetischen Feldern verknüpft sind.

Daraus kann geschlußfolgert werden, daß prinzipiell alle drei Felder der Elektrotechnik immer gemeinsam auftreten.

Ihre Wirkungen und damit der Grad der Vernachlässigbarkeit sind unterschiedlich groß.

### 5.3.1. Magnetfelder stromdurchflossener geradliniger Leiter

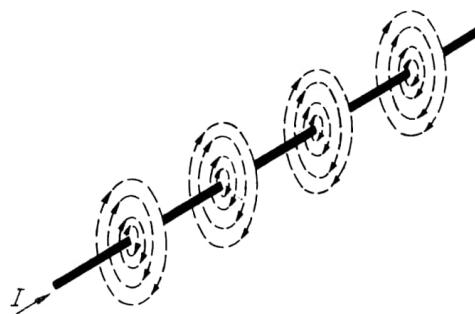


Bild 5.4. Magnetfeld eines geradlinigen stromdurchflossenen Leiters

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben.

Richtungszuordnung:

Die Feldlinienrichtung wird der Richtung des elektrischen Stromes im Sinne der Rechtsschraube zugeordnet.

#### Rechte-Faust-Regel

Umschließt man einen stromdurchflossenen Leiter so mit der rechten Faust, daß der abgespreizte Daumen in Stromflußrichtung zeigt, dann zeigen die gekrümmten Finger in Feldlinienrichtung.

Hinweis

Auf der gleichen Grundlage sind die sog. „Schraubenzieherregel“ und „Korkenzieherregel“ anwendbar.

Bei der praktischen Anwendung dieser Richtungszuordnung wird die positive Stromrichtung (vgl. Abschn. 3.3.1.1.) zugrunde gelegt.

Aus Gründen der praktischen Vereinfachung wird meist eine andere Darstellungsform verwendet.

Der linienhafte elektrische Leiter wird im Schnitt dargestellt.

Der durchfließende elektrische Strom hat dabei zwei mögliche Richtungen:

	Symbolik
auf den Betrachter zufließend	○
vom Betrachter wegfließend	×

Schnitt A-A



Schnitt B-B



Bild 5.5  
Schnittdarstellung stromdurchflossener Leiter

### 5.3.2. Magnetfelder stromdurchflossener Spulen

Spule

Jede beliebige stromdurchflossene Leiteranordnung kann als Spule aufgefaßt werden. Sie ist durch das Vorhandensein des elektromagnetischen Feldes gekennzeichnet.

Eine Spule ist ein aus mehreren Drahtwindungen bestehender Leiter.

Die Energie wird im magnetischen Feld, das sich in der Umgebung der Spule ausbildet, gespeichert.

Allgemeines Schaltzeichen:  Bild 5.6

Hinweis

Ein geradliniger Leiter kann zwischen Anfang und Ende auch als Spule mit der Windungszahl 1 angesehen werden.

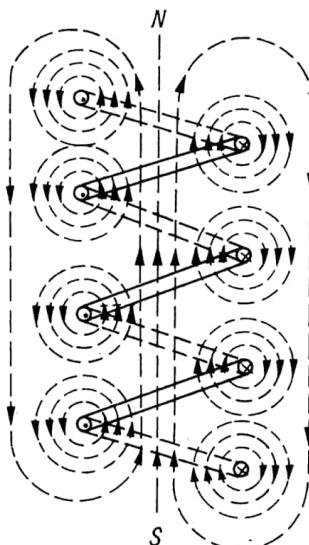


Bild 5.7  
Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

Jede Spule, die vom elektrischen Strom durchflossen wird, erzeugt im Inneren und im Raum um die Spule ein elektromagnetisches Feld.

Dabei ist zu beachten, daß sich die Magnetfelder der einzelnen Windungen zu einem resultierenden elektromagnetischen Gesamtfeld addieren.

Umschließt man eine stromdurchflossene Spule so mit der rechten Faust, daß die gekrümmten Finger in Stromrichtung zeigen, so zeigt der abgespreizte Daumen auf einen Nordpol.

Hinweis

Auf der gleichen Richtungsfestlegung wie im Abschn. 5.3.1. beruht die sog. „Uhrzeigerregel“.

Nutzfeld

Das von den Spulenwindungen umfaßte Magnetfeld.

Streufeld	Das außerhalb der Spule vorhandene Magnetfeld.
Homogenisierung	Je länger zylindrische Spulen gestaltet werden, desto stärker wird das im Inneren der Spulen entstehende elektromagnetische Nutzfeld homogenisiert.

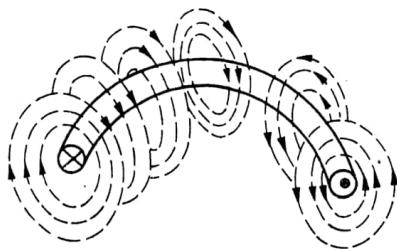


Bild 5.8  
Magnetfeld einer symbolisierten Spulenwindung

## 5.4. Meßgrößen des elektromagnetischen Feldes

### 5.4.1. Magnetischer Fluß und magnetische Flußdichte

Wirkungsgröße  
Magnetfluß

Die Wirkungsgröße des elektromagnetischen Feldes ist der magnetische Fluß.

Hinweis

Der Begriff „Fluß“ ist irreführend, denn in Wirklichkeit ist das elektromagnetische Feld ein Raumzustand. „Fluß“ darf nicht mit „Strom“ gleichgesetzt werden. Allerdings bestehen Vergleichsmöglichkeiten.

Unter dem Magnetfluß versteht man die Gesamtheit der Feldlinien des elektromagnetischen Feldes. Er gibt Aufschluß über die Größe der Wirkungen des Feldes.

Formelzeichen  $\Phi$

Einheit Weber

$$[\Phi] = V \cdot s = 1 \text{ Wb}$$

(Wilhelm Weber, 1804-1891, deutscher Physiker)

Dichtegröße  
Magnetflußdichte

Die Anzahl der Feldlinien innerhalb bestimmter, vom Magnetfluß durchsetzter Flußflächen.

Formelzeichen  $B$

Physikalischer  
Zusammenhang

$$B = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A}$$

(5.1)

Einheit Tesla

$$[B] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ Wb}}{1 \text{ m}^2} = 1 \text{ T}$$

(Nicola Tesla, 1856-1943, serbokroatischer Physiker)

Hinweise

In homogenen magnetischen Feldern ist die Flußdichte überall gleich groß.

Die Berechnung der Dichte elektromagnetischer Streufelder ist relativ kompliziert, weil dort unterschiedliche Feldlinienverteilung vorliegt.

Je größer die Fläche des Magnetmaterials bei vorgegebenem Magnetfeld (z.B. Eisen, aber auch Luft oder andere Medien) ist, desto geringer wird die Dichte des elektromagnetischen Feldes. In der Praxis ist man bemüht, möglichst hohe Magnetflußdichten zu erreichen, um eine Einsparung von Magnetmaterial zu garantieren.

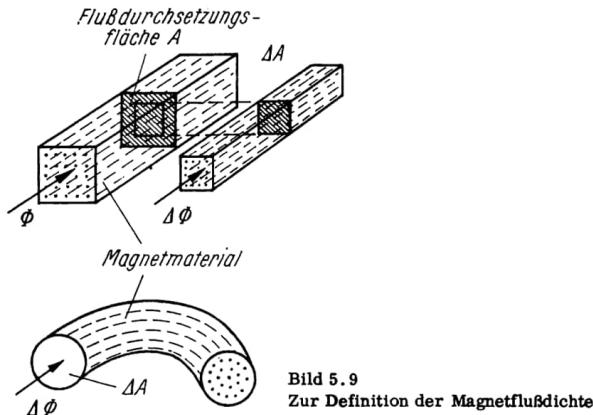


Bild 5.9  
Zur Definition der Magnetflußdichte

#### 5.4.2. Magnetische Durchflutung und magnetische Feldstärke

Ursachengröße

Magnetische Durchflutung Die Ursachengröße des elektromagnetischen Feldes ist die magnetische Durchflutung.

Hinweis

In vergangenen Jahren wurde die Ursachengröße auch als „magnetische Urspannung“ oder als „magnetomotorische Kraft“ bezeichnet. Diese Begriffe werden nicht mehr benutzt, da sie zu Irrtümern führen können.

Formelzeichen  $\Theta$  (Theta)

Einheit  $[\Theta] = 1 \text{ A}$

Die magnetische Durchflutung wird ursächlich durch das Vorhandensein eines elektrischen Stromes hervorgerufen. In dieser Größe muß also die Verknüpfung zwischen der Energie des elektrischen Stromfeldes und der Energie des elektromagnetischen Feldes zum Ausdruck kommen.

Energieumwandlung  
elektrisch/  
magnetisch

Das Energiewandlerelement ist in der Regel eine stromdurchflossene Spule mit der Windungszahl N.

Es gilt

$$\Theta = I N$$

(5. 2)

$$N = 1, 2, 3, \dots, n$$

(vgl. Abschn. 5.5.3.).

## Magnetische Feldstärke

Sie wurde eingeführt, um die Stärke der Kraftwirkungen des elektromagnetischen Feldes noch exakter zu erfassen. Sie beschreibt, in welcher Höhe die magnetische Durchflutung entlang den in sich geschlossenen Feldlinien wirksam werden kann. Je geringer der Weg entlang den Feldlinien wird, desto mehr Energie kann das elektromagnetische Feld entwickeln.

Formelzeichen

H

Physikalischer Zusammenhang

$$H = \frac{\Theta}{l} = \frac{I \cdot N}{l}$$

(5.3)

Einheit

$$[H] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ m}}$$

In der Praxis wird mit mittleren magnetisch wirksamen Feldlinienlängen gerechnet.

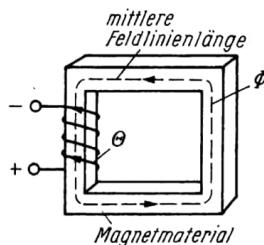


Bild 5.10  
Zur Veranschaulichung der mittleren Feldlinienlänge

### Hinweis

Bei der Berechnung inhomogener Felder sind zusätzliche Überlegungen notwendig, da hier nicht ohne weiteres mit mittleren Feldlinienlängen gerechnet werden kann.

### 5.4.3. Definition des magnetischen Leitwertes

#### Bedingungsgröße des elektromagnetischen Feldes

Um die Bedingungsgrößen, die zwischen Wirkungs- und Ursachengrößen des elektromagnetischen Feldes vorhanden sind, zu erfassen, wird wie im elektrischen Strömungsfeld und im elektrostatischen Feld definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

Ebenso ist der reziproke Wert des Quotienten als Definition möglich. Im elektromagnetischen Feld wird der magnetische Leitwert als Bedingungsgröße eingeführt.

#### Magnetischer Leitwert

Formelzeichen

$\Lambda$

Physikalischer Zusammenhang

$$\Lambda = \frac{\Phi}{\Theta} = \text{konst.}$$

(5.4)

Einheit

Henry

$$[\Lambda] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega \cdot 1 \text{ s} = \frac{1 \text{ s}}{1 \text{ s}} = 1 \text{ H}$$

(Joseph Henry, 1797-1878, amerikanischer Physiker)

Der magnetische Leitwert gibt Auskunft darüber, wie stark sich der magnetische Fluß in einem bestimmten Magnetmaterial im Magnetkreis auswirken kann.

Der magnetische Gesamtleitwert umfaßt alle in einem magnetischen Kreis vorhandenen magnetischen Leitwerte.

#### 5.4.4. Bemessung des magnetischen Leitwertes

In einem geschlossenen magnetischen Kreis wird der magnetische Leitwert als Quotient aus dem gesamten Magnetfluß und der gesamten magnetischen Durchflutung definiert [Gl. (5.4)].

Treten in einem magnetischen Kreis jedoch mehrere magnetische Einzelleitwerte auf, so entfallen auf diese Leitwerte Teile der magnetischen Durchflutung, die jeweils als Ursache für den im Kreis vorhandenen Magnetfluß wirken.

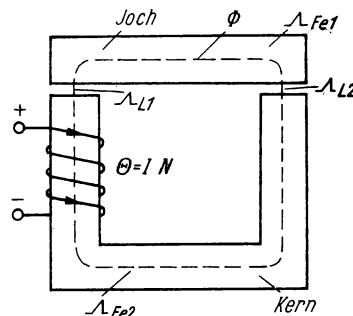


Bild 5.11  
Magnetischer Kreis mit Luftspalten

Magnetische Spannung

Für die einzelnen magnetischen Durchflutungen (magnetische Spannungsabfälle) gilt:

Formelzeichen  $V$

$$\text{Physikalischer Zusammenhang} \quad \Lambda = \frac{\Phi}{V} \quad (5.5)$$

Einheit  $[V] = 1 \text{ A}$

Magnetischer Zweipol

Die magnetische Spannung  $V$  zwischen den Punkten 1 und 2 wird als magnetische Potentialdifferenz längs eines magnetischen Leitwertes  $\Lambda$  definiert.

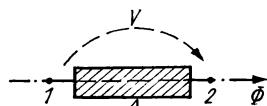


Bild 5.12  
Zur Erläuterung der magnetischen Potentialdifferenz

Der magnetische Leitwert ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- von der Art des verwendeten Magnetmaterials,
- von der magnetisch wirksamen Länge,
- von der Größe des Flußquerschnitts.

$\Lambda$  ist eine Konstruktionsgröße, die in der Praxis vorausbestimmt ist.

Bemessung  
magnetischer  
Leitwerte

Der magnetische Leitwert wird um so größer,

- je kleiner die magnetisch wirksame Flußlinienlänge wird,
- je größer die magnetische Flußdurchtrittsfläche wird,
- je besser sich ein magnetisches Medium magnetisieren lässt.

Bemessungs-  
gleichung

Es gilt für parallel-homogene Felder:

Physikalischer  
Zusammenhang

$$\Lambda = \frac{A}{l} \mu$$

(5.6)

$l$  magnetisch wirksame Länge in m,  
 $A$  Flußdurchtrittsfläche in  $m^2$ ,  
 $\mu$  magnetische Permeabilität in  $\frac{V \cdot s}{A \cdot m}$

Magnetische  
Permeabilität

Ist eine Materialkonstante, die die magnetische Durchlässigkeit kennzeichnet.

### 5.4.5. Magnetischer Widerstand

Magnetischer  
Widerstand

Ist der reziproke Wert des magnetischen Leitwertes.

Formelzeichen

$R_m$

Physikalischer  
Zusammenhang

$$R_m = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{A \mu}$$

(5.7)

Einheit

$$[R_m] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}} = \frac{1}{1 \Omega \cdot 1 \text{ s}} = \frac{1 \text{ S}}{\text{ s}}$$

### 5.4.6. Magnetische Feldkonstante – Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Magnetflußdichte

Einfluß des  
Materials

Im Zusammenhang von Feldstärkegröße und Felddichtegröße kommt immer der Einfluß der verwendeten Materialien zum Ausdruck. Es gilt für ein bestimmtes Stück eines beliebigen magnetischen Kreises

$$R_m = R_m'$$

$$\frac{\Theta}{\Phi} = \frac{1}{\mu A},$$

$$\frac{IN}{\Phi} = \frac{1}{\mu A},$$

$$\frac{IN}{I} = \frac{\Phi}{\mu A}.$$

Physikalischer  
Zusammenhang

$$B = \mu H$$

(5.8)

Die magnetische Permeabilität  $\mu$  setzt sich aus einer Naturkonstanten  $\mu_0$  und einer Vergleichszahl  $\mu_r$  (für das jeweilige Magnetmaterial) zusammen.

Magnetische  
Feldkonstante  
(absolute Permeabi-  
litätskonstante des  
leeren Raumes, In-  
duktionskonstante)

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10} \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

Relative  
Permeabilität  $\mu_r$   
(Permeabilitätszahl)

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

(5.9)

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Die relative Permeabilität ist eine Vergleichszahl. Sie gibt an, wievielmal besser (oder schlechter) als Vakuum sich ein Stoff magnetisieren lässt.

Magnetisierbarkeit  
von Stoffen im  
elektromagnetischen  
Feld

Unter Magnetisierbarkeit versteht man die Aufbaumöglichkeiten für das elektromagnetische Feld.

Tafel 5.1. Relative Permeabilität von Medien

Medium	$\mu_r$	Einschätzung
Vakuum	1	-
Luft	$\approx 1$	schlecht magnetisierbar
Ferromagnetische Materialien	$\gg 1$ (10...10 000) nicht konstant	sehr gut magnetisierbar, verstärken magnetische Wirkungen
Paramagnetische Materialien	$> 1$ (ungefähr 1)	bedingt magnetisierbar
Diamagnetische Materialien	$< 1$ (ungefähr 1)	nicht magnetisierbar, vermindern magnetische Wirkungen

## 5.5. Magnetische Kreise

Begriffsbestimmung  
„magnetischer  
Kreis“

Ein magnetischer Kreis ist jede Verknüpfung von elektromagnetischen Energiequellen mit mehr oder weniger gut magnetisierbaren Medien.

Es sind zu unterscheiden

- unverzweigte magnetische Kreise  
(magnetische Maschen),
- verzweigte magnetische Kreise  
(magnetische Verzweigungen).

### 5.5.1. Maschengesetzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen

Im unverzweigten magnetischen Kreis ist der magnetische Fluß an allen Stellen gleich groß.

Er durchsetzt nacheinander die einzelnen magnetischen Teilwidérstände. Dabei entstehen magnetische Spannungsabfälle.

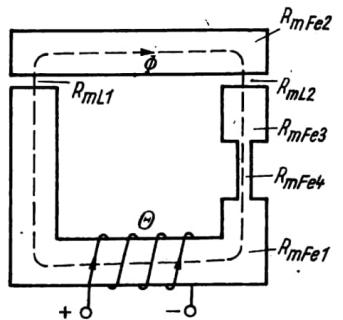


Bild 5.13  
Zur Berechnung magnetischer Maschen

Maschensatz des magnetischen Kreises

$$\begin{aligned}
 \Theta_{\text{ges}} &= V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \\
 \Theta_{\text{ges}} &= \Phi (R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots + R_{mn}) \\
 \Theta_{\text{ges}} &= \sum_{k=1}^n V_k \\
 \Theta_{\text{ges}} &= \sum_{k=1}^n \Phi R_{mk}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

Bei der Berechnung unverzweigter magnetischer Kreise wird die „magnetische Masche“ im Flußumlauf Sinn durchlaufen.

In jedem unverzweigten magnetischen Kreis ist die Summe der magnetischen Spannungsabfälle gleich der magnetischen Gesamtdurchflutung.

## 5.5.2. Verzweigungsge setzmäßigkeiten in magnetischen Kreisen

Im verzweigten magnetischen Kreis ist die Summe der von der elektromagnetischen Quelle erzeugten Magnetflüsse gleich der Summe der auf die einzelnen magnetischen Kreise aufgeteilten.

Knotenpunktsatz

$$\Phi_{ab1} + \Phi_{ab2} + \dots + \Phi_{abn} = \Phi_{zu1} + \Phi_{zu2} + \dots + \Phi_{zun}$$

$$\sum_{k=1}^n \Phi_{ab\,k} = \sum_{k=1}^n \Phi_{zu\,k} \tag{5.11}$$

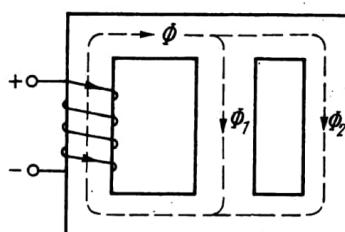


Bild 5.14  
Zur Berechnung magnetischer Knotenpunkte

### 5.5.3. Durchflutungsgesetz

Aus dem Maschensatz des magnetischen Kreises

$$\Theta_{\text{ges}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

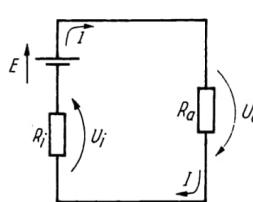
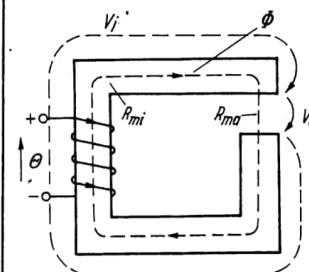
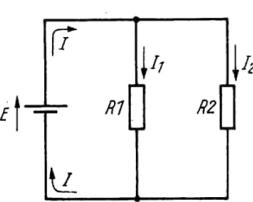
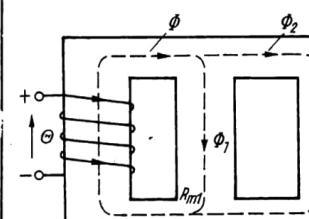
$$\text{und } H = \frac{I}{l} \quad \text{sowie} \quad \Theta = I \cdot N$$

kann entwickelt werden

$$\begin{aligned} I \cdot N &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n \\ \Theta_{\text{ges}} &= \sum_{k=1}^n H_k l_k. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Die Summe der magnetischen Spannungsabfälle entlang geschlossenen Feldlinien ist der Durchflutung der von ihnen umfassten Fläche gleich.

Tafel 5.2. Vergleiche zwischen dem elektrischen Stromkreis und dem elektromagnetischen Kreis

Elektrischer Kreis	Magnetischer Kreis
	
$E = U_i + U_a$	$\Theta = V_i + V_a$
$E = I (R_i + R_a)$	$\Theta = \Phi (R_{mi} + R_{ma})$
	
$I = I_1 + I_2$	$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$
$I = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2}$	$\Phi = \frac{\Theta}{R_{m1}} + \frac{\Theta}{R_{m2}}$

Ganz allgemein gilt:

Da  $\Theta_{\text{ges}} = I \cdot N$  als ein Sonderfall anzusehen ist, in dem die Durchflutung von stromdurchflossenen Wicklungen hervorgerufen wird, kann auch geschrieben werden

Durchflutungsgesetz

$$\Theta_{\text{ges}} = \sum I \cdot \Delta \quad (5.13)$$

Mithin gilt

$$\sum I = \sum H \cdot l.$$

Das bedeutet, daß die magnetische Durchflutung gleich der Stromsumme ist, die das Magnetfeld hervorruft und die die von Feldlinien eingeschlossene Fläche durchsetzt.

#### Hinweis

Vgl. auch Abschnitte 5.1., 5.3., 5.4.2.

## 5.6. Elektromagnetische Kreise mit verschiedenen Magnetmaterialien

Jedes Medium ist mehr oder weniger gut magnetisierbar (vgl. Abschnitt 5.4.6. und Tafel 5.1).

Ferromagnetika

Weisen eine sehr gute Magnetisierbarkeit auf, z.B. Eisen, Nickel und Kobalt.

Paramagnetika

Zeigen bei sehr hohen Feldstärken geringe Magnetisierungswirkungen, z.B. Aluminium, Uran und Zinn.

Diamagnetika

Vermindern die magnetische Wirkung, z.B. Kupfer, Kohlenstoff, Antimon und Wismut.

### 5.6.1. Elektromagnetische Kreise mit Luft bzw. Vakuum als Magnetmedium

Nach der Beziehung

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

ist der funktionale Zusammenhang  $B = f(H)$  für verschiedene Magnetmaterialien unterschiedlich, weil die relative Permeabilität eine materialabhängige Größe ist.

Nur für Vakuum, Luft, Paramagnetika und Diamagnetika ergeben sich Geraden.

Es gilt

$$\tan \alpha \triangleq \frac{B}{H} = \text{konst.} \rightarrow \mu_r = 1 \text{ und } \mu_0 = \text{konst.}$$

Der funktionale Zusammenhang zwischen  $B$  und  $H$  wird als Magnetisierungskennlinie bezeichnet.

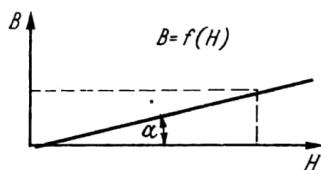


Bild 5.15  
Magnetisierungskennlinie von Luft

## 5.6.2. Magnetisierungskennlinien von Ferromagnetika

Alle Elemente zeigen im inneren Aufbau atomare Magneten, die durch die Bewegung der Schalenelektronen um den Atomkern und um sich selbst (Elektronenspin) entstehen (Bewegung von Ladungen!). Die Achsen dieser Elementarmagneten werden durch elektromagnetische Felder ausgerichtet.

Besonderheiten von Ferromagnetika

Ferromagnetische Stoffe haben die Eigenschaft, daß die Achsen der Elementarmagneten innerhalb bestimmter Bereiche im Kristallgefüge (Weißsche Bezirke) schon eine Vorzugsrichtung ohne äußeres Magnetfeld aufweisen. Das beruht auf einer Unsymmetrie im Schalenaufbau der Atome von Ferromagnetika.

Magnetisierung

Durch elektromagnetische Felder werden die Weißschen Bezirke ausgerichtet. Damit erhöht sich die magnetische Flussdichte.

Sättigung

Bei einer bestimmten elektromagnetischen Feldstärke ist es nicht mehr möglich, noch weitere Weißsche Bezirke auszurichten, weil die überwiegende Anzahl dieser Bezirke schon in einer Richtung ausgerichtet wurde.

Deshalb kann bei weiterer Erhöhung der Feldstärke die Flussdichte nur noch unwesentlich vergrößert werden. Diese Erscheinung wird als Sättigung des Ferromagnetikums bezeichnet.

Remanenz

Nach Wegfall des Einflusses eines äußeren elektromagnetischen Feldes fallen nicht alle Weißschen Bezirke wieder in die vorherige „Unordnung“ zurück. Je nach Art des Ferromagnetikums verbleiben mehr oder weniger Weißsche Bezirke über einen längeren Zeitraum teil-

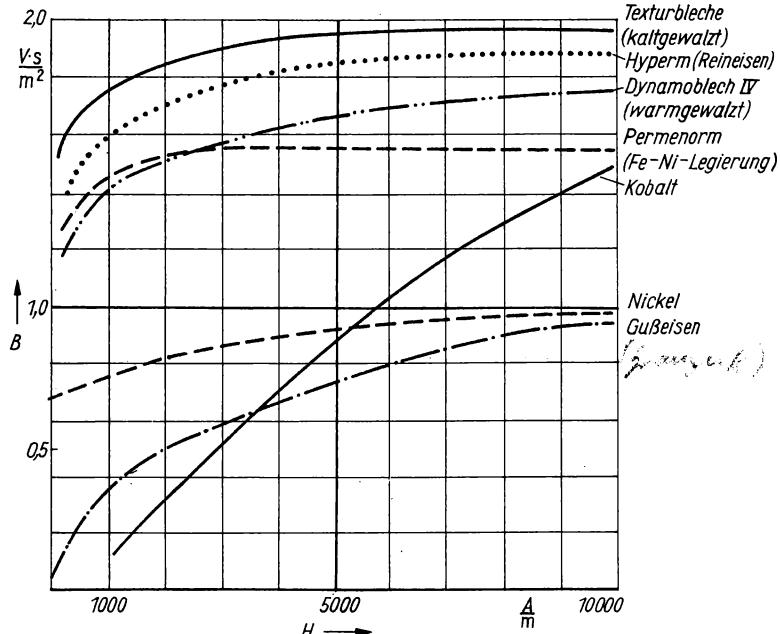


Bild 5.16. Magnetisierungskennlinien verschiedener Ferromagnetika (Mittelwerte)

weise ausgerichtet. Damit ist ein inneres Magnetfeld nachweisbar, das auch nach Aufhören des äußeren Magnetfeldes bestehenbleibt. Diese Erscheinung wird als Remanenz (Restmagnetismus) bezeichnet.

Der Sättigungspunkt für die verschiedenen Ferromagnetika liegt an der Stelle der Kennlinie, wo ein paralleler Verlauf zur Magnetisierungskennlinie von Luft erreicht wird.

Für die Magnetisierungskennlinien von Ferromagnetika gilt (Bild 5.16):

$$\tan \alpha \hat{=} \frac{B}{H} = \text{konst.} \rightarrow \mu_r = \text{konst. und } \mu_0 = \text{konst.}$$

$\mu_r$  von Ferromagnetika ist feldstärkeabhängig.

#### Hinweis

Vgl. „Werkstoffkunde Elektroberufe“.

Magnetisierungskennlinien von Stahlguß, Dynamoblech und Gußeisen

Geringe Feldstärken  
 $H = 0 \dots 1500 \frac{A}{m}$

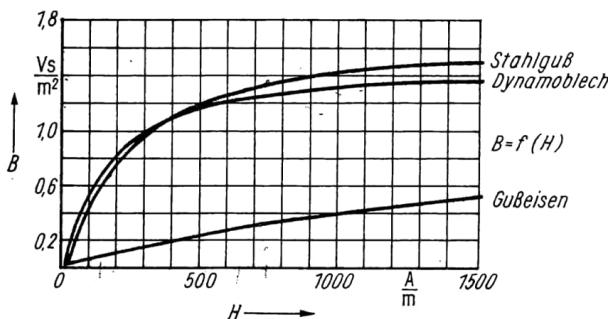


Bild 5.17. Magnetisierungskennlinien bei geringer Feldstärke

Mittlere Feldstärken  
 $H = 2000 \dots 15000 \frac{A}{m}$

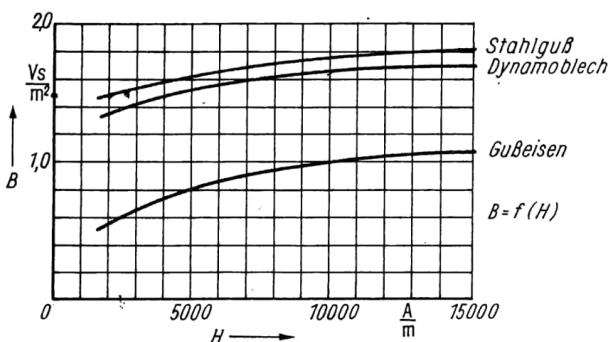


Bild 5.18. Magnetisierungskennlinien bei mittlerer Feldstärke

Große Feldstärken  
 $H = 20\,000 \dots 150\,000 \frac{A}{m}$

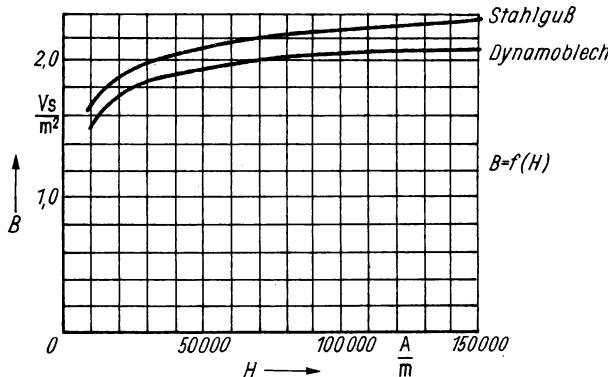


Bild 5.19. Magnetisierungskennlinien bei großer Feldstärke

### 5.6.3. Hystereseschleife – Entstehung und energetische Deutung

#### Entstehung der Hystereseschleife

Wird ein ferromagnetisches Material zunächst aufmagnetisiert und anschließend durch ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld entmagnetisiert und in dieser Richtung erneut magnetisiert, entsteht eine Hystereseschleife, wenn man den funktionalen Zusammenhang von B und H grafisch darstellt.

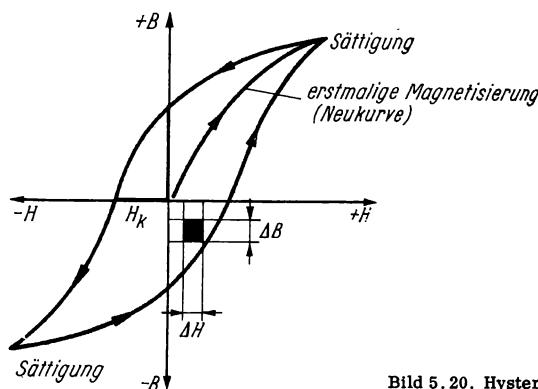


Bild 5.20. Hystereseschleife (allgemein)

#### Koerzitivfeldstärke

Die zur Beseitigung der Remanenz erforderliche Feldstärke ist die Koerzitivfeldstärke  $H_k$ .

#### Energieumsatz

Die von der Hystereseschleife (Bild 5.20) umfaßte Fläche kennzeichnet einen Energieumsatz. Eine bestimmte Fläche  $\Delta A$  der Hystereseschleife kann nach  $\Delta A = \Delta H \Delta B$  berechnet werden. Eine exakte Berechnung der gesamten Fläche kann mit Hilfe der höheren Mathematik erfolgen. Aus den Einheiten von H und B entsteht

$$[H] \cdot [B] = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ m}^2} = \frac{1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ m}^3}.$$

	Damit ist gezeigt, daß beim Ummagnetisieren von Ferromagnetika ein Energieumsatz stattfindet. Dieser ist volumenabhängig.
Ummagnetisierungs-verluste	<b>Harte Ferromagnetika</b> Die Hystereseschleife umschließt eine große Fläche. Zum Ummagnetisieren sind große Energien erforderlich.
	<b>Weiche Ferromagnetika</b> Die Hystereseschleife umschließt eine kleine Fläche. Die Ummagnetisierungsenergie ist gering.
Ferromagnetika für elektrische Maschinen	Als Kernwerkstoffe für Transformatoren, Motoren oder Relais werden weiche Ferromagnetika eingesetzt, um möglichst wenig Verluste durch Ummagnetisierung zu erhalten. Die Größen H und B ändern häufig ihre Richtung.

## 5.7. Permanentmagnetismus als Sonderform des Elektromagnetismus

	Im Abschn. 5.6.2. wurde gezeigt, daß Ferromagnetika auf Grund bestimmter Unsymmetrien im Atomaufbau besondere magnetische Eigenschaften aufweisen.
Werkstoffe für Permanentmagneten	Magnetisch harte Werkstoffe, bei denen schon viele Weißsche Bezirke in einer Vorzugsrichtung ausgerichtet sind, eignen sich besonders für die Herstellung von Permanentmagneten [permanere (lat.) = fortlaufend bestehen].
Aufmagnetisierung	Ist möglich durch <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbringen von Stahl in das Gleichfeld einer stromdurchflossenen Spule,</li> <li>• Bestreichen von Stahl mit anderen Dauermagneten.</li> </ul>
	Die elastische Verformung der inneren Struktur (Ausrichten der Elementarmagneten) wird als Magnetostriktion bezeichnet.
Entmagnetisierung	Kann erfolgen durch <ul style="list-style-type: none"> <li>• fortlaufende starke Erschütterungen,</li> <li>• Ausglühen,</li> <li>• Einbringen in ein zusammenbrechendes Wechselmagnetfeld einer Spule.</li> </ul>

### Hinweis

Neuere Technologien zur Herstellung hochwirksamer Permanentmagneten sind durch die Pulvermetallurgie (Sinterverfahren) möglich.

Tafel 5.3. Vergleichende Betrachtung der Felder in der Elektrotechnik

	Elektrisches Strömungsfeld	Elektrostatisches Feld	Elektromagnetisches Feld
Charakterisierung des Feldes	Raumzustand der Materie	Raumzustand der Materie	Raumzustand der Materie
Energieinhalt und -form	elektrische Energie elektrische Strömungsenergie kinetische elektrische Energie	dielektrische Energie statische elektrische Energie potentielle elektrische Energie	elektromagnetische Energie potentielle Energie
Gesamtursachengrößen	$E$ elektrische Urspannung	$U$ elektrische Spannung	$\Theta$ magnetische Durchflutung
Spannungsabfälle	$U$ elektrischer Spannungsabfall	$U$ elektrischer Spannungsabfall	$V$ magnetischer Spannungsabfall
Feldstärkegrößen	$E = \frac{U}{l}$ elektrische Feldstärke	$E = \frac{U}{l}$ elektrische Feldstärke	$H = \frac{\Theta}{l}$ magnetische Feldstärke
Wirkungsgrößen	$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ elektrische Stromstärke	$\psi = Q$ elektrischer Verschiebungsfluß (Ladung)	$\phi$ magnetischer Fluß
Dichtegrößen	$S = \frac{\Delta I}{\Delta A}$ elektrische Stromdichte	$D = \frac{\Delta \psi}{\Delta A}$ Verschiebungsflußdichte	$B = \frac{\Delta \phi}{\Delta A}$ magnetische Flußdichte
Vermittlungs- (Bedingungs-)Größen	$R = \frac{U}{I}$ elektrischer Widerstand	-	$R_m = \frac{V}{\phi}$ magnetischer Widerstand
Leitwertgrößen	$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ elektrischer Leitwert	$C = \frac{\psi}{U} = \frac{Q}{U}$ Kapazität (allgemein)	$\Lambda = \frac{\phi}{\Theta}$ magnetischer Leitwert (allg.)
Materialgrößen	$\rho$ spezifischer elektrischer Widerstand	-	-
	$\epsilon$ elektrische Leitfähigkeit	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$ absolute Dielektrizitätskonstante	$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ absolute Permeabilitätskonstante
	-	$\epsilon_r$ relative Dielektrizitätskonstante	$\mu_r$ relative Permeabilitätskonstante
		$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$	$\mu = \mu_0 \mu_r$
Beziehungen zwischen Dichtegrößen und Feldstärkegrößen	$S = \epsilon E$	$D = \epsilon E$	$B = \mu H$

## 5.8. Elektromagnetische Induktion

### Wesen

- Zeitliche Änderungen elektromagnetischer Felder um elektrische Leiter  
oder
- relative Bewegungen (Lageveränderungen) elektrischer Leiter in stationären elektromagnetischen Feldern rufen im Leiter elektrische Urspannungen hervor.

Diese Erscheinungen bezeichnet man als Induktion (erstmalig angegeben 1831 von Faraday).

### 5.8.1. Allgemeines Induktionsgesetz

Allgemeines Induktionsgesetz

$$|E| = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

(5.14)

Energiewandlung  
magnetisch/  
elektrisch

In einem elektrischen Leiter entsteht dann eine elektrische Urspannung, wenn und solange sich im Leiter oder um den Leiter der magnetische Fluß zeitlich ändert.

#### Hinweis

Es handelt sich hierbei um die Umkehrung des im Abschn. 5.3. gezeigten Prinzips.

Grundformen  
der Induktion

Das allgemeine Induktionsgesetz gilt für

- Ruheinduktion – ruhender elektrischer Leiter, zeitlich veränderliches Magnetfeld;
- Bewegungs- – bewegter elektrischer Leiter, induktion stationäres Magnetfeld.

Richtung der  
Induktionsspannung

Jede Spannung ist richtungsbehaftet (vgl. Abschn. 3.3.2.1.). Die Richtung einer Induktionsspannung muß festgelegt werden.

Nach dem Energieerhaltungsgesetz kann eine Energieform nur dadurch in eine andere übergeführt werden, daß sich der Betrag der vorhandenen verringert.

Der in einem geschlossenen leitfähigen Kreis fließende Strom wird von einer Ursprungspannung gleicher Richtung angetrieben. Der durch Induktion hervorgerufene Strom und die ihn antreibende Ursprungspannung müssen so gerichtet sein, daß sie die stromerzeugende Ursache zu hemmen versuchen. Beim Vergleich mit den Richtungsfestlegungen im Abschn. 5.3.1. (Rechtsschraube), die auf der positiv definierten Zählrichtung beruhen, ist erkennbar, daß die Induktionsspannung negativ gerichtet sein muß.

$$-E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

(5.15)

**Lenzsches Gesetz**  
(Heinrich Friedrich  
Emil Lenz,  
1804–1865,  
russischer Physiker)

Eine durch Induktion hervorgerufene Ursprungspannung treibt stets einen so gerichteten Induktionsstrom an, daß dessen Magnetfeld der Entstehungsursache entgegenwirkt.

#### Hinweis

Eine positiv gerichtete Induktionsurspannung wird durch eine Flußabnahme, eine negativ gerichtete Induktionsurspannung durch Flußzunahme hervorgerufen.

Ruheinduktion

Wird eine Spule mit  $N$  Windungen von einem veränderlichen Magnetfluß durchsetzt, entstehen in den Einzelwindungen Induktionsurspannungen, die sich zur Gesamturspannung addieren.

Für jede beliebige Spule, in der Induktion auftritt, gilt

$$E = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

(5.16)

Jede Spule, in der eine Induktion stattfindet, wirkt als Spannungs-erzeuger.

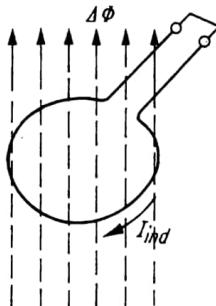


Bild 5.21  
Vom Magnetfeld durchsetzte Leiterschleife

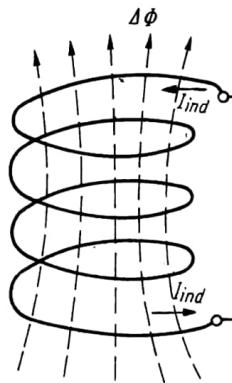


Bild 5.22. Vom Magnet-  
feld durchsetzte Spule

Höhe der Urspannung Ist abhängig

- von der Anzahl der Windungen N,
- von der Größe der Flussänderungsgeschwindigkeit  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .

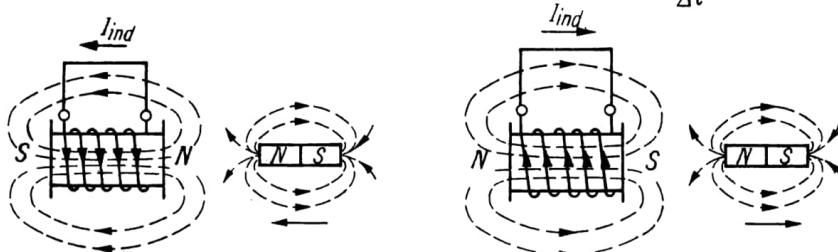


Bild 5.23. Zur Induktion durch Magnetflussänderung

### Bewegungsinduktion

Eine zeitliche Änderung des Magnetflusses kann durch Bewegung von Magneten, aber auch durch Bewegung des elektrischen Leiters in einem konstanten Magnetfeld erreicht werden.

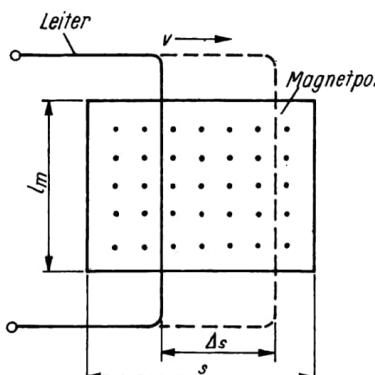


Bild 5.24  
Bewegung eines Leiters im Magnetfeld  
l\_m magnetisch wirksame Länge; s Pol-  
kantenlänge; v Geschwindigkeit der  
Leiterbewegung; s zurückgelegter Weg  
der Leiterschleife

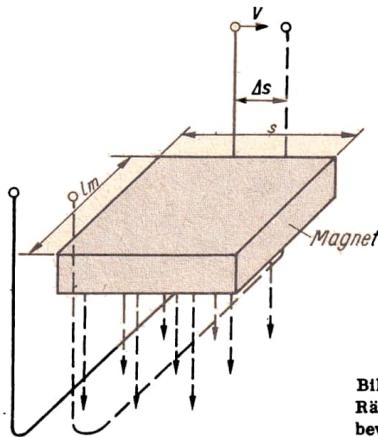


Bild 5.25  
Räumliche Darstellung einer Leiterbewegung im Magnetfeld

### Generatorprinzip

Wird ein elektrischer Leiter senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld bewegt, ist die vom Leiter überstrichene Flussdurchsetzungsfäche

$$\Delta A = l_m \Delta s.$$

Nach  $B = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A}$  ergibt sich

$$\Delta \Phi = B l_m \Delta s.$$

Mit Gl. (5.15) entsteht durch Einsetzen

$$E = - \frac{B l_m \Delta s}{\Delta t}.$$

Weil  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ , gilt

$$|E| = B l_m v. \quad (5.17)$$

Die Induktionsurspannung eines im Magnetfeld bewegten Leiters ist von

- der Magnetflußdichte des Magnetfeldes,
- der magnetisch wirksamen Länge des Magnetfeldes (bzw. des Leiters),
- der Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters abhängig.

### Spule im Magnetfeld

Werden mehrere in Reihe geschaltete Leiter (Spulen) im Magnetfeld bewegt, so gilt

$$|E| = N B l_m v. \quad (5.18)$$

### Stromrichtung

Es wurde vereinbart

Rechte-Hand-Regel (Generatorregel).

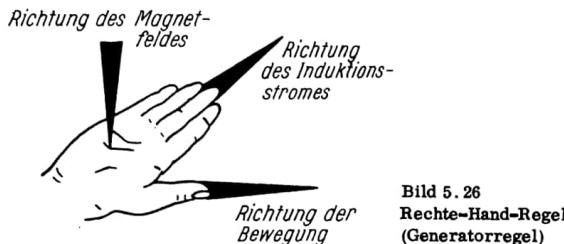
Hält man die rechte Hand so in ein Magnetfeld, daß die Feldlinien in den offenen Handteller eintreten und der abgespreizte Daumen in Bewegungsrichtung des Leiters zeigt, dann zeigen die ausgestreckten

vier Finger in Richtung des durch die induzierte Urspannung angetriebenen Stromes in der Leiterschleife.

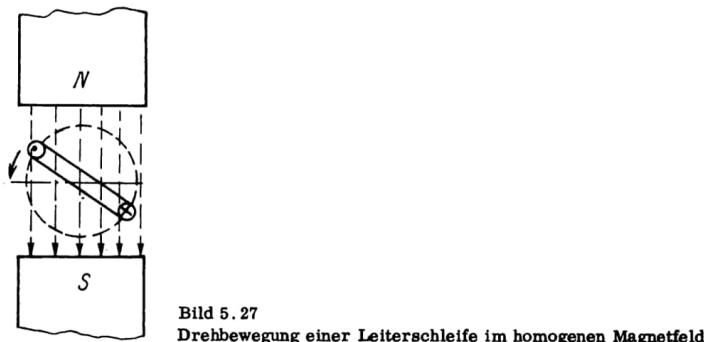
#### Hinweis

Auf den gleichen Grundlagen beruht die U(rsache)-V(ermittlungs)-W(irkungs)-Regel.

Die Regel ist jeweils für eine Hälfte der Leiterschleife anzuwenden (vgl. Bild 5.26).



Die Bewegung von Leitern kann kreisförmig erfolgen. Das ist das Grundprinzip aller rotierenden elektrischen Maschinen (vgl. Bild 5.27).



Aus der Beziehung

$$|E| = \boxed{N} \cdot \frac{\Phi}{\boxed{A}} \cdot \boxed{1} \cdot \boxed{\pi} \cdot \boxed{d} \cdot n$$

ergibt sich, daß für einen bestimmten Generator auch bestimmte konstruktive Größen vorhanden sind.

Deshalb gilt allgemein für jeden Generator

Allgemeine  
Generatorgleichung

$$E = C_1 \Phi n ; \quad (5.18a)$$

$C_1$  Maschinenkonstante (abhängig von der Konstruktion),  
 $n$  Umlauffrequenz der Leiterschleife.

## 5.8.2. Gegeninduktion

### Erscheinung

Wird in einer Leiterschleife (Spule)  $N_1$  ein veränderlicher Magnetfluß erzeugt, der eine zweite magnetisch gekoppelte Leiterschleife (Spule)  $N_2$  durchsetzt, so entsteht in dieser eine Urspannung durch Gegeninduktion (Bild 5.28).

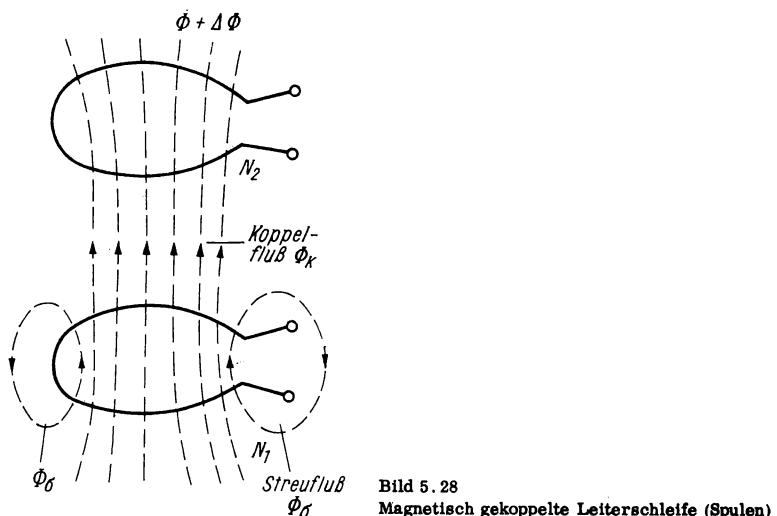


Bild 5.28  
Magnetisch gekoppelte Leiterschleife (Spulen)

Koppelfluß  $\Phi_k$

Streufluß  $\Phi_0$

Ist der beide Spulen durchsetzende Magnetfluß.

Ist der außerhalb der Spulen vorhandene, aber von den Spulen erzeugte Magnetfluß.

Der Koppelfluß muß so groß wie möglich gemacht werden. Das kann mittels magnetisch gut leitfähiger Materialien realisiert werden.

Transformator-  
prinzip

Energiewandlung  
elektrisch  $\longrightarrow$  magnetisch  $\longrightarrow$  elektrisch

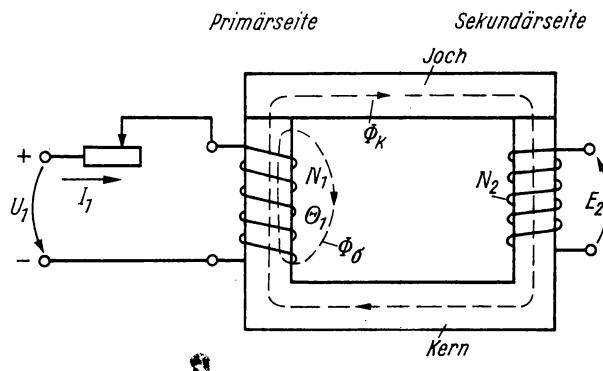


Bild 5.29. Prinzip des Transformators

## Sekundär- urspannung

Es gilt

- Strom in Spule  $N_1$  ändert sich

$$\Delta I_1 \longrightarrow \Delta \theta_1 \longrightarrow \Delta \Phi_1 \longrightarrow -E_2 .$$

In Spule  $N_2$  entsteht dann eine Uspannung, wenn und solange sich der diese Spule durchsetzende Koppelfluß zeitlich ändert.

- Strom in Spule  $N_1$  bleibt konstant

$$I_1 \longrightarrow \theta \longrightarrow \Phi_1 \longrightarrow -E_2 = 0 .$$

Eine Änderung des Primärstromes  $I_1$  kann erreicht werden durch

- Einschalt- und Ausschaltvorgänge an der Primärspule,
- Spannungsänderung an der Primärspule,
- Speisung der Primärspule mit periodisch veränderlicher Spannung.

Der magnetische Fluß der Primärspule ist

$$\Phi_1 = \Phi_k + \Phi_0 .$$

Nicht der gesamte Primärmagnetfluß  $\Phi_1$  durchsetzt die Sekundärspule als Sekundärmagnetfluß  $\Phi_2$ .

Es wird definiert

## Kopplung von Primär- und Sekundärspulen

$$\text{Kopplungsgrad} \quad k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} . \quad (5.19)$$

Man unterscheidet zwischen

- fester Kopplung  $k \approx 1$ ,
- loser Kopplung  $k \ll 1$ .

## Berechnung der Gegeninduktions- urspannung

Es muß gelten

$$E_2 = - \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t} N_2 \quad [\text{vgl. Gl. (5.16)}],$$

$$E_2 = - \frac{\Delta \Phi_1 k}{\Delta t} N_2 ,$$

$$E_2 = - \frac{\Delta \theta k}{\Delta t R_m} N_2 ,$$

$$E_2 = - \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \cdot \frac{N_1 N_2 k}{R_m} .$$

(5.20)

Mit  $M = \frac{N_1 N_2 k}{R_m}$  entsteht

$$E_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} . \quad (5.21)$$

## Gegeninduktivität $M$

Wird auch als Beiwert der Gegeninduktion bezeichnet.  $M$  ist eine konstruktive Größe.

$$\text{Einheit } [M] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \text{ H} \text{ (vgl. Abschn. 5.4.5.)}$$

Die Gegeninduktivität ist eine Leitwertgröße.

## 5.8.3. Selbstinduktion

### Erscheinung

Eine Selbstinduktion tritt dann auf, wenn und solange sich der ein und dieselbe Spule durchfließende Strom zeitlich ändert.

In den Windungen einer Spule werden Urspannungen induziert, die nach dem Lenzschen Gesetz der erzeugenden Ursache entgegenwirken.

### Berechnung

$$E = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad [\text{vgl. Gl. (5.16)}].$$

$$E = -\frac{N}{R_m} \frac{\Delta \Theta}{\Delta t},$$

$$E = -\frac{N}{R_m} \frac{\Delta I}{\Delta t} N,$$

$$E = -\frac{N^2}{R_m} \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (5.22)$$

$$\text{Mit } L = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \Lambda \text{ entsteht}$$

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (5.23)$$

### Selbstinduktivität $L$

Wird auch als Beiwert der Selbstinduktion bezeichnet.  $L$  ist eine konstruktive Größe.

$$\text{Einheit } [L] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \text{ H} \text{ (vgl. Abschn. 5.4.5.)}$$

Die Selbstinduktivität ist eine Leitwertgröße.

Aus Gln. (5.20) bis (5.23) gelten

$$M = \frac{N_1 N_2 k}{R_m} \quad \text{und} \quad L = \frac{N^2}{R_m},$$

$$M = \frac{N_1}{\sqrt{R_m}} \frac{N_2}{\sqrt{R_m}} k.$$

Durch mathematische Verknüpfung ergibt sich

$$M = \sqrt{L_1} \sqrt{L_2} k ,$$

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} .$$

(5.24)

Die Gegeninduktivität zweier magnetisch gekoppelter Spulen ist gleich dem mit dem Kopplungsgrad multiplizierten geometrischen Mittel der Einzelseitinduktivitäten.

Verminderung der Selbstinduktion

Durch induktivitätsarme Wicklungen möglich (Beispiele s. Bilder 5.30 und 5.31).

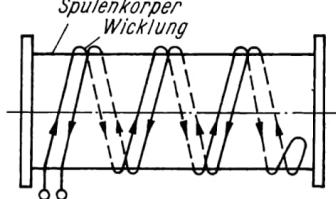


Bild 5.30  
Bifilare Wicklung (Doppeldrahtwicklung)

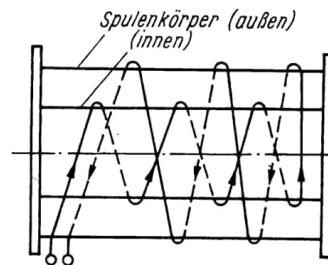
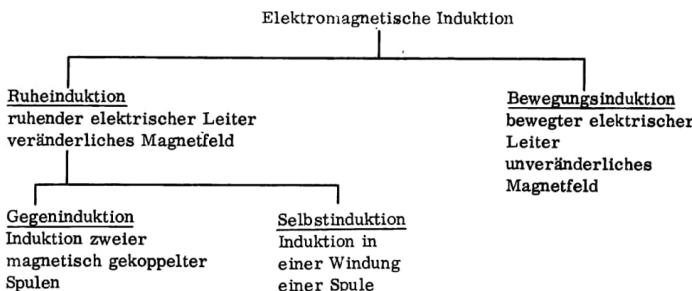


Bild 5.31  
Chaperon-Wicklung

Tafel 5.4. Induktionserscheinungen



#### 5.8.4. Wirbelstrombildung

Durch Bewegungsinduktion

Werden Metallmassen in Magnetfeldern bewegt, entstehen durch Induktion Urspannungen im Metall, die hohe Ströme (Kurzschlußkreise) antreiben können (rotierende elektrische Maschinen).

Wegen ihres scheinbar regellosen Verlaufs im Metall werden sie als Wirbelströme bezeichnet.

Durch Ruheinduktion

Die gleiche Wirkung tritt ein, wenn sich in oder um Metallmassen der magnetische Fluß zeitlich ändert (ruhende elektrische Maschinen).

Wirbelstromverluste

Wirbelströme verursachen wegen ihres Kurzschlußcharakters

- starke Erwärmung,
- hohe Magnetfelder, die nach dem Lenzschen Gesetz der Ursache ihrer Entstehung (z. B. der Bewegung) entgegenwirken.

## Verminderung von Wirbelströmen

Wirbelströme sind in der technischen Praxis unerwünscht.

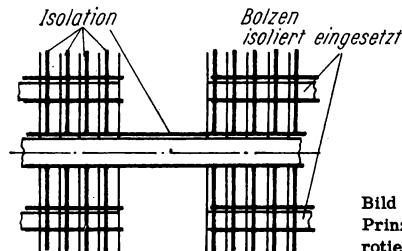


Bild 5.32  
Prinzip des Blehpakets einer  
rotierenden elektrischen Maschine

Sie können vermindert werden durch

- Unterteilung geschlossener Metallmassen - Paketierung (Aufbau von geschichteten Blechpaketen, -Bild 5.32);
- Isolation von Einzelblechen im Blechpaket gegeneinander (Bild 5.33) durch Papierzwischenlagen, Lackierung, Oxidschichten;
- Verminderung der elektrischen Leitfähigkeit unter Beibehaltung magnetischer Eigenschaften - Einlegierung von Halbleitermaterialien (z.B. Silizium in Dynamo- und Transformatorenblechen).

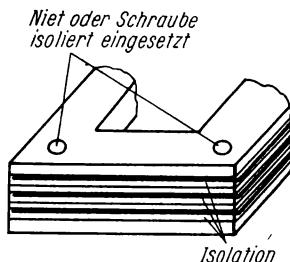


Bild 5.33  
Prinzip eines geschichteten Kerns einer  
ruhenden elektrischen Maschine

## Anwendung der Wirkung von Wirbelströmen

Die Wirbelstrombildung wird technisch genutzt: Bremswirkung des Wirbelstrommagnetfeldes (Bild 5.34)

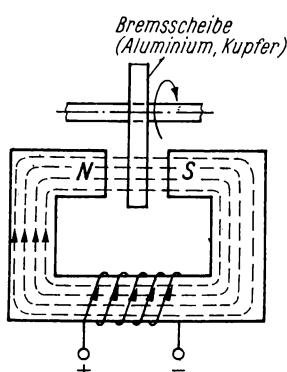


Bild 5.34  
Prinzip einer Wirbelstrombremse

- Verkehrsmittel (z. B. Straßenbahn, Ablaufberge),
- elektrische Meßwerke (z. B. Ausschlagdämpfung),
- Abbremsung elektrischer Maschinen.

## 5.8.5. Spule und elektromagnetisches Feld

### 5.8.5.1. Induktivität von Spulen

Bedingungsgröße des elektromagnetischen Feldes

Wie im elektrischen Strömungsfeld und im elektrostatischen Feld wird im elektromagnetischen Feld definiert:

$$\text{Bedingungsgröße} = \frac{\text{Wirkungsgröße}}{\text{Ursachengröße}}$$

Eigenschaft Induktivität

Im elektromagnetischen Feld wird die Induktivität einer Spule mit N Windungen als Bedingungsgröße eingeführt.

Formelzeichen

L

Physikalischer Zusammenhang

$$L = (N) \frac{\Phi}{I}$$

(5.25)

Einheit

Henry

$$[L] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}} = 1 \text{ H}$$

- Weitere gesetzliche Einheiten:

$$1 \text{ mH} = 1 \text{ Millihenry} = 10^{-3} \text{ H}$$

$$1 \text{ } \mu\text{H} = 1 \text{ Mikrohenry} = 10^{-6} \text{ H}$$

Energiespeicherung

Die Induktivität L gibt Auskunft darüber, wie groß die Speicherfähigkeit einer stromdurchflossenen Spule für elektromagnetische Energie ist.

Die Induktivität entspricht einer Leitwertgröße (vgl. Abschnitte 3.4.1.1. und 5.8.4.).

Bemessungs-  
gleichung

Aus den Abschnitten 5.4.4., 5.4.5. und 5.8.5.1. ergibt sich

$$L = L$$

$$L = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \Lambda$$

$$L = N \frac{\Phi}{I}$$

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

$$L = \frac{N I N \mu A}{l I}$$

$$L = N^2 \frac{\mu A}{l}$$

$$L = N^2 \frac{\mu A}{l}$$

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r A}{l}$$

(5.26)

Gültigkeitsbedingung: lange Zylinderspule

$$l \gg d$$

l magnetisch wirksame Länge  
d Spulendurchmesser

Die Induktivität von Spulen ist als konstruktive Größe vorausbestimmbar.

Ist Eisen im Magnetkreis vorhanden, ist die Induktivität nicht ohne weiteres konstant, sondern von der jeweiligen Magnetisierung abhängig (vgl. Abschnitte 5.6.1. und 5.6.2.).

### 5.8.5.2. Zusammenschaltung von Spulen

Wie alle Zweipole können Spulen mit anderen zusammengeschaltet werden.

Arten der

Zusammenschaltung

- Reihenschaltung von Spulen

- Parallelschaltung von Spulen

Ersatzinduktivität

Zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens einer Zusammenschaltung von mehreren Spulen wird die Ersatzinduktivität  $L_{ers}$  gebildet.

Die Ersatzinduktivität ist die wirksame Gesamtinduktivität einer Spulen zusammenschaltung.

Reihenschaltung

Beim Durchfluß eines unveränderlichen Stromes entsteht über einer idealen Spule kein Spannungsabfall. Bei einer Spule wirkt die induzierte Selbstinduktionsurspannung  $E$  der stromerzeugenden Ursache, also der Spulenklemmenspannung entgegen.

Es gilt, wenn keine anderen Verluste auftreten,

$$U_L = -E_s \quad (5.27)$$



$$U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [\text{vgl. Gl. (5.23)}].$$

$$U_1 = L_1 \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U_2 = L_2 \frac{\Delta I}{\Delta t} \longrightarrow U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$



$$U_n = L_n \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta I_1}{\Delta t} = \frac{\Delta I_2}{\Delta t} = \frac{\Delta I_n}{\Delta t} = \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$L_{ers} \frac{\Delta I}{\Delta t} = \sum_{k=1}^n L_k \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

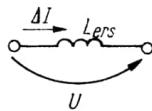
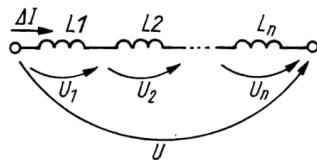


Bild 5.35  
Ersatzinduktivität einer Reihenschaltung

Ersatzinduktivität

$$L_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n L_k$$

(5.28)

Die Ersatzinduktivität  $L_{\text{ers}}$  einer Reihenschaltung von Spulen setzt sich aus den Einzelinduktivitäten zusammen.

Hinweis

Die Einzelspulen dürfen magnetisch nicht gekoppelt sein, da sich sonst Veränderungen der magnetisch wirksamen Länge ergeben.

Bei Reihenschaltung magnetisch nicht gekoppelter Spulen ist die Ersatzinduktivität stets größer als die größte Teilinduktivität.

Ersatzinduktivität von n Spulen gleicher Induktivität

$$L_{\text{ers}} = n L_n$$

(5.29)

Parallelschaltung

$$\frac{\Delta I_1}{\Delta t} = \frac{U_{L1}}{L_1}$$

$$\frac{\Delta I_2}{\Delta t} = \frac{U_{L2}}{L_2} \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I_1}{\Delta t} + \frac{\Delta I_2}{\Delta t} + \dots + \frac{\Delta I_n}{\Delta t}$$

⋮

$$\frac{\Delta I_n}{\Delta t} = \frac{U_{Ln}}{L_n}$$

$$U = U_{L1} = U_{L2} = U_{Ln}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U_{L1}}{L_1} + \frac{U_{L2}}{L_2} + \dots + \frac{U_{Ln}}{L_n}$$

$$\frac{U}{L_{\text{ers}}} = \frac{U_{L1}}{L_1} + \frac{U_{L2}}{L_2} + \dots + \frac{U_{Ln}}{L_n}$$

$$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

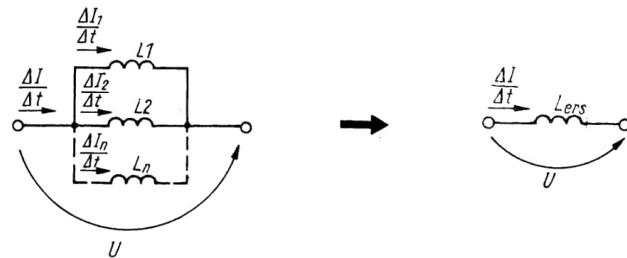


Bild 5.36  
Ersatzinduktivität einer Parallelschaltung

Ersatzinduktivität

$$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k} \quad (5.30)$$

Bei Parallelschaltung magnetisch nicht gekoppelter Spulen ist die Ersatzinduktivität stets kleiner als die kleinste Einzelinduktivität.

Ersatzinduktivität  
von n Spulen  
gleicher Induktivität

$$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \frac{n}{L_n}$$

$$L_{\text{ers}} = \frac{L_n}{n} \quad (5.31)$$

Ersatzinduktivität  
zweier Spulen

$$L_{\text{ers}} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (5.32)$$

#### Hinweis

Die Einzelspulen dürfen magnetisch nicht gekoppelt sein, da sich sonst Veränderungen des wirksamen Flußquerschnitts ergeben.

### 5.8.5.3. Erwünschte und unerwünschte Spulenanordnungen

Elektrotechnisches  
Grundbauelement  
Spule  
Erwünschte  
Spulenanordnung

Die Spule ist das Bauelement, das als technisches Objekt auf den Gesetzmäßigkeiten des elektromagnetischen Feldes beruht. Sie ist wie der Widerstand und der Kondensator ein Grundbauelement der Elektrotechnik.

An Spulen werden technisch notwendige Forderungen gestellt:

- Größe und Konstanz der Induktivität,
- Variation der Induktivität,
- Strombelastbarkeit,
- Bauform je nach Einsatzzweck.

Diese konstruktiven Eigenschaften bestimmen die Einsatzmöglichkeiten von Spulen.

Konstruktive  
Besonderheiten

Siehe Wissensspeicher „Elektronik-Bauelemente“.

## Unerwünschte Spulenanordnung

Au<sup>s</sup> der Definition einer Induktivität geht hervor, daß jeder beliebige stromdurchflossene Leiter eine Induktivität aufweist.

In elektrischen Schaltungen und Anlagen treten unerwünschte Induktivitäten auf

- bei langen, stromdurchflossenen elektrischen Leitungen,
- an stromdurchflossenen Anschlüssen elektronischer Bauelemente,
- zwischen stromdurchflossenen Leitungen.

Besonders in Schaltungen der Hochfrequenztechnik können derartige Störinduktivitäten nicht mehr vernachlässigt werden.

### 5.8.5.4. Verlustlose und verlustbehaftete Spulen

#### Verlustlose Spulen

Verlustlose Spulen sind idealisierte Spulen. Sie dienen zur besseren theoretischen Erfassung von bestimmten Eigenschaften. Solche Spulen sind technisch nicht realisierbar, da jeder elektrische Leiter einen bestimmten Widerstand hat, der außer magnetischen Wirkungen auch Wärmewirkungen zeigt.

#### Hinweis

Vgl. Abschnitte 3.3.1.2. und 3.4.2.

#### Verlustbehaftete Spulen

Alle technischen Spulen sind verlustbehaftet (reale Spulen).

#### Verluste

Bei einer Spule treten auf:

- Erwärmungsverluste („Kupfer“verluste),
- Wirbelstromverluste (Erwärmung des Eisenkerns),
- Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste),
- bei hohen Frequenzen (zwischen den Wicklungen) kapazitive Verluste.

Die bei technischen Spulen auftretenden Erwärmungsverluste werden in einem Verlustwiderstand  $R_{Cu}$ , die kapazitiven Verluste in einem Verlustkondensator  $C_v$  dargestellt.

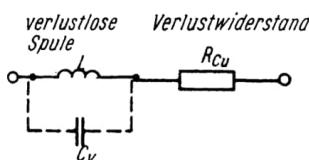


Bild 5.37  
Ersatzschaltplan einer verlustbehafteten Spule

#### Hinweis

Die im Eisenkern von technischen Spulen auftretenden Wärmeverluste können in einem parallel zur Spule liegenden Widerstand  $R_{Fe}$  dargestellt werden.

## 5.9. Verhalten von Spulen bei verschiedenen Betriebsarten

### 5.9.1. Spule an unveränderlicher Gleichspannung

Eine ideale Spule ist ein absoluter Leiter. Zwischen Wicklungsanfang und -ende fließt ein unendlich hoher Strom, weil der Drahtwiderstand der Wicklung Null ist. Damit ist auch der Spannungsabfall Null. Es findet eine Umwandlung elektrischer Energie in elektromagnetische Energie statt.

Die ideale Spule wirkt als Speicher elektromagnetischer Energie.

Es tritt keine Energie aus dem Kreis heraus.

Hinweis

Einschalt- und Ausschaltvorgänge werden hier vernachlässigt.

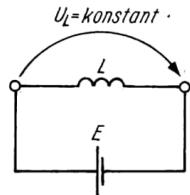


Bild 5.38. Spule an unveränderlicher Gleichspannung

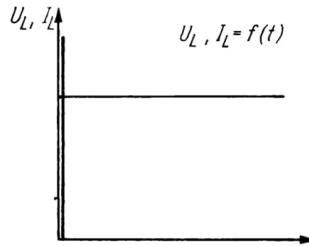


Bild 5.39  
Strom- und Spannungsverlauf bei unveränderlicher Gleichspannung

### 5.9.2. Spule an veränderlicher Gleichspannung

Nach den Gln. (5.23) und (5.27) ergibt sich:

Über einer Spule entsteht nur dann Spannung, wenn und solange sich der die Spule durchfließende Strom zeitlich ändert.

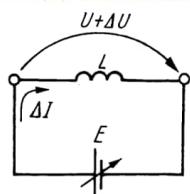


Bild 5.40. Spule an veränderlicher Gleichspannung

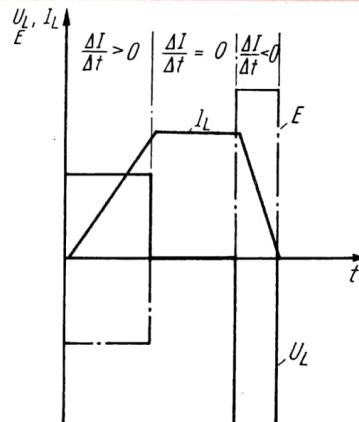


Bild 5.41  
Strom- und Spannungsverlauf bei veränderlichem Strom

Die über der Spule liegende Spannung  $U_L$  und die in der Spule induzierte Urspannung  $E$  sind bei einer idealen Spule entgegengesetzt gleich groß.

$$U_L; E \sim \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Die Spannung über der Spule ist um so größer, je größer die Stromänderungsgeschwindigkeit ist.

Ein Strom in positiver Richtung kann nur durch eine positiv gerichtete Klemmenspannung an der Spule hervorgerufen werden.

Die Selbstinduktionsurspannung versucht, nach dem Lenzschen Gesetz, diesen Vorgang zu verhindern.

### 5.9.3. Verhalten von Spulen bei Schaltvorgängen

Vgl. hierzu Abschn. 4.9.3.1.

Es werden die gleichen grundsätzlichen Ansätze verwendet.

Eine Spule mit der Induktivität  $L$  wird zum Zeitpunkt  $t = t_{\text{ein}}$  mit dem Umschalter  $S$  über einen Widerstand  $R_1$  an eine Gleichspannung  $U_N$  angeschlossen. Die aufmagnetisierte Spule kann über  $R_2$  abgeschaltet werden (Bild 5.42). Dabei kann  $R_2$  auch einen Kurzschluß darstellen.

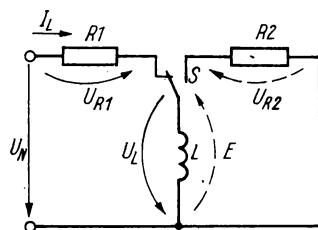


Bild 5.42  
Prinzipschaltung für das Ein- und  
Ausschalten einer Spule

#### Hinweis

Für die allgemeine Betrachtung wird eine ideale Spule mit einem Drahtwiderstand  $R = 0$  angenommen (vgl. Abschn. 5.8.5.4.).

Strom einer Spule  
beim Einschalten  
und nach dem Ein-  
schalten

Sprungartige Änderungen des Stromes in einer Spule sind nicht möglich, weil die Selbstinduktion jeder Veränderung des Stromes entgegenwirkt.

Da die Spannung über der Spule erst schnell und dann immer lang-

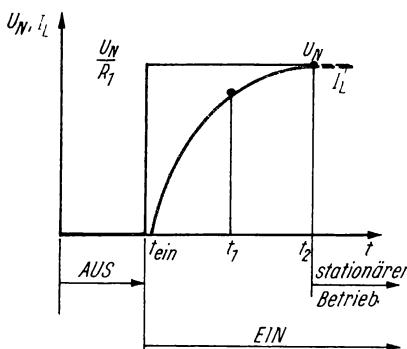


Bild 5.43  
Einschaltvorgang an einer Spule

samer sinkt, muß der Strom erst schnell, dann langsamer ansteigen. Das erfolgt, bis keine Spannung mehr an der Spule anliegt. Für das Zeitverhalten des Stromes gilt

$$I_L = \frac{U_N}{R_1} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{t_R}}} \right) = \frac{U_N}{R_1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_R}} \right) \quad (5.33)$$

Der Strom in einer Spule, die auf ein Netz geschaltet wird, steigt zeitlich verzögert an.

Strom einer Spule beim Ausschalten und nach dem Ausschalten

Dem Ausschalten des Stromes in einer Spule wirkt die Selbstinduktion entgegen, so daß auch nach dem Ausschalten der Netzspannung noch Strom fließen kann. Die Selbstinduktionsspannung wirkt dem Abschalten entgegen.

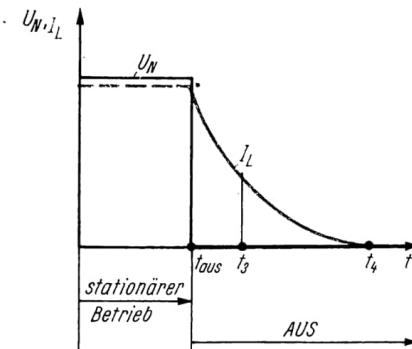


Bild 5.44  
Ausschaltvorgang an einer Spule

Für das Zeitverhalten des Stromes gilt

$$I_L = \frac{U_N}{R_2} e^{-\frac{t}{t_R}} \quad (5.34)$$

Der Strom in einer Spule, die vom Netz getrennt wird, fällt zeitlich verzögert ab.

Spannung einer Spule beim Einschalten und nach dem Einschalten

Bei jedem Schaltvorgang ändert sich der die Spule durchfließende Strom. Es tritt deshalb stets die Selbstinduktion auf. Die Spule wirkt beim Einschalten als Verbraucher. Dem Kreis wird die zum Aufbau des magnetischen Feldes benötigte Energie entzogen.

Für den zeitlichen Verlauf der Spannung gilt

$$U_L = \frac{U_N}{\frac{t}{t_R}} = U_N e^{-\frac{t}{t_R}} \quad (5.35)$$

Eine Spule, die auf eine Spannungsquelle geschaltet wird, wirkt wie ein Verbraucher.

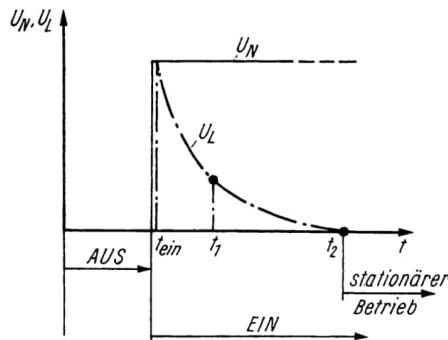


Bild 5.45. Einschalten einer Spule

Spannung einer Spule beim Ausschalten und nach dem Ausschalten

Beim Ausschalten wird die gespeicherte magnetische Energie plötzlich frei und bewirkt durch Selbstinduktion eine Urspannung über der Spule, die in Richtung der (abgeschalteten) ursprünglichen Spannung wirkt.

Eine Spule, die von einer Spannungsquelle getrennt wird, wirkt kurzzeitig selbst wie eine Spannungsquelle.

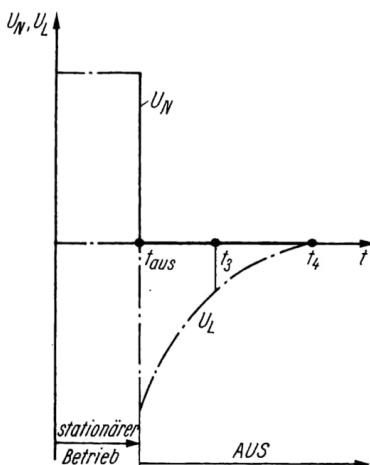


Bild 5.46  
Ausschalten einer Spule

Für den Zeitverlauf der Spulenspannung gilt

$$U_L = U_N e^{-\frac{t R}{L}} \quad (5.36)$$

$U_N$  vorzeichenbehaftet einsetzen.

Wird eine Spule an eine Speisespannung angeschlossen, erfolgt ein Energieumsatz.

**Energiebetrachtungen für die geschaltete Spule**  
**Energieumwandlung beim Aufbau des Magnetfeldes**

Wird eine Spule an eine Speisespannung  $U_N$  angeschlossen, erfolgt ein Energieumsatz. Dem speisenden Netz wird kinetische Energie des elektrischen Strömungsfeldes entzogen, die den Aufbau des elektromagnetischen Feldes bewirkt. Mit Hilfe dieser Energie werden z. B. die Weißschen Bezirke im Ferromagnetikum ausgerichtet.

Diese Energieaufnahme erfolgt nach den Beziehungen

$$\Delta W = \Delta \Phi I_L \quad \text{oder}$$

$$\Delta W = U_L I_L \Delta t. \quad (3.44)$$

**Energiespeicherung (potentielle Energie)**

Ist das elektromagnetische Feld vollständig aufgebaut, tritt ein stationärer Betriebszustand ein, indem die vorher vorhandene kinetische Energie des Strömungsfeldes in potentieller Form im Elektromagneten gespeichert wird.

#### Hinweis

Damit kann diese Energie nicht mehr in Form von thermischer, mechanischer oder chemischer Energie, sondern nur noch als magnetische Energie aus dem Kreis heraustreten.

Für die gespeicherte Energie in der Spule gilt:

$$W_L = \frac{L I^2}{2} \quad (5.37)$$

Diese Beziehung kann nur mit Hilfe der höheren Mathematik vollständig abgeleitet werden.

Durch eine grafische Konstruktion kann das Verständnis für Gl. (5.37) gefördert werden.

Nach dem vollständigen Aufbau des elektromagnetischen Feldes in einer Spule und um eine Spule herum, die eine konstante Induktivität aufweist (das setzt ein konstantes  $\mu_r$  voraus! - vgl. Abschn. 5.8.5.1.), gelten die Bedingungen:

$$\Phi = \text{konst.}; \quad I_L = I = \text{konst.}; \quad L = \text{konst.}$$

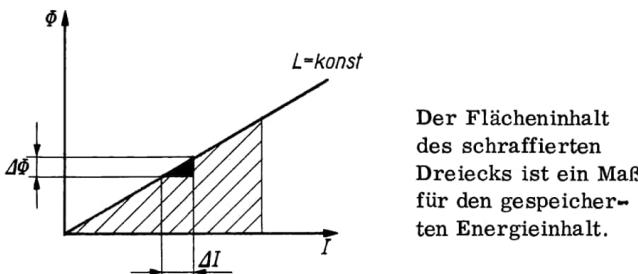


Bild 5.47  
Zum Energieinhalt des elektromagnetischen Feldes

Es gilt weiterhin

$$W_{\text{pot}} = \Phi I \quad \text{und} \quad \Phi = L I$$

Damit ist  $\Phi \sim I$  (außerhalb der Sättigung).

Aus der Dreiecksbeziehung folgt:

$$W_{\text{pot}} = \frac{I \Phi}{2}$$

und mit  $\Phi = L I$  entsteht

$$W_{\text{pot}} = \frac{L I^2}{2}$$

Mit Hilfe der schon früher abgeleiteten Einheiten der angegebenen Größen kann die Richtigkeit der Beziehung überprüft werden:

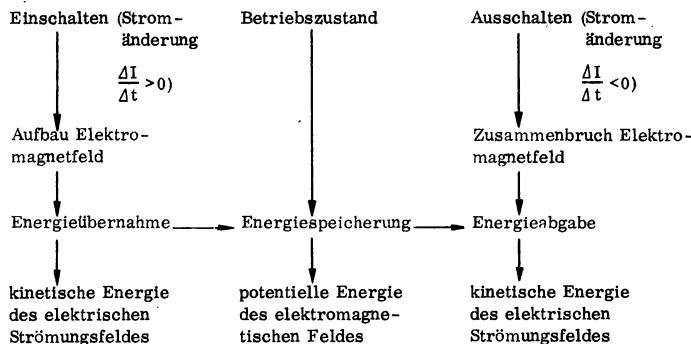
$$[W_{\text{pot}}] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s} \cdot 1 \text{ A}^2}{1 \text{ A}} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}$$

Aus Bild 5.47 wird ersichtlich, daß die dargestellten Beziehungen auch auf sehr kleine Strom- und Magnetflußänderungen anwendbar sind. So muß vorgegangen werden, wenn  $\Phi$  und  $I$  nicht proportional verlaufen. Der Energieinhalt des Feldes ergibt sich dann aus einer Summe kleinster Einzeldreieckflächen.

**Energieumsatz beim Zusammenbrechen des Magnetfeldes**

Beim Zusammenbrechen des Magnetfeldes wird diese Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt (Tafel 5.5).

Tafel 5.5. Energiebetrachtung



Das ist beim Abschalten großer Induktivitäten (z. B. Feldwicklungen, Hebemagnetspulen) von Gleichspannungsquellen zu beachten.

Lichtbögen, Überschläge, Durchschläge sind Folgen des Abschaltens induktiver Kreise ohne geeignete Schaltmittel.

Um einen starken Kontaktbrand durch Lichtbögen zwischen Schaltkontakten zu vermindern, wendet man **Funkenlöschschaltungen** an.

**Funkenlöschung an Schaltkontakten**

Dabei wird von der Überlegung ausgegangen, daß die im elektromagnetischen Feld gespeicherte Energie ganz oder teilweise zum Aufbau eines elektrostatischen Feldes verwendet und nicht mehr in Form von thermischer Energie an den Schaltkontakten wirksam wird (vgl. Bild 5.48).

Damit muß

$$W_L = W_C$$

sein. Aus Gl. (5.37) und (4.34) folgt:

$$\frac{L I_L^2}{2} = \frac{C U_C^2}{2}.$$

Durch Verhältnisbildung entsteht

$$\frac{L}{C} = \frac{U_C^2}{I_L^2}.$$

Für die Bemessung des Kondensators gilt:

$$C = L \frac{I_L^2}{U_C^2} \quad (5.38)$$

**Prinzip**

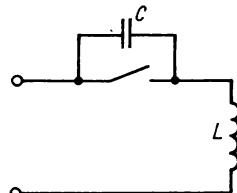


Bild 5.48  
Prinzip der Funkenlöschung an Schaltkontakten

Der dem Kontakt parallelzuschaltende Kondensator kann nur eine bestimmte Kapazität haben, weil sonst eine zu hohe Spannung an ihm entsteht, die sich als Durchschlag am Schalter äußern würde. Um den Entladestrom des Kondensators beim Schließen des Kontaktes zu begrenzen, wird ein Schutzwiderstand zum Kondensator in Reihe geschaltet. Andere Möglichkeiten bestehen in der Parallelschaltung von spannungsrichtungsabhängigen (z. B. Halbleitergleichrichter) oder spannungsabhängigen (z. B. Varistoren) Bauelementen (vgl. Abschnitt 3.4.2.2.).

**Hinweis**

Vgl. „Grundschaltungen der Elektronik“.

## 5.10. Zeitkonstante von Spulen

In den Gln. (5.33) bis (5.36) erscheint der mathematische Ausdruck  $\frac{L}{R}$ .

Der Quotient aus der Induktivität L und ihrem Drahtwiderstand R ist eine Konstante mit der Maßeinheit einer Zeit, die für Schaltvorgänge bedeutsam ist.

Tafel 5.6. Grundbauelemente der Elektrotechnik

Bauelement	Elektromagnetisches Feld Spule	Elektrisches Strömungsfeld Widerstand	Elektrostatisches Feld Kondensator
Schaltzeichen (allgemein)			
Eigenschaft	Induktivität	ohmscher Widerstand	Kapazität
Formelzeichen	$L$	$R$	$C$
Einheit	$[L] = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega \cdot \text{s} = 1 \text{ H}$	$[R] = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega$	$[C] = \frac{1 \text{ A} \cdot \text{s}}{1 \text{ V}} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} = 1 \text{ F}$
Bemessung der Konstruktionsgröße	$L = \frac{\mu A}{1} (N^2)$	$G = \frac{A}{\varrho 1} = \frac{zA}{1}$ $R = \frac{\varrho 1}{A} = \frac{1}{zA}$	$C = \frac{\epsilon A}{1}$
Idealisierung	$L \neq 0 \quad R_L = 0 \quad C_L = 0$	$R \neq 0 \quad L_R = 0 \quad C_R = 0$	$C \neq 0 \quad L_C = 0 \quad R_C = 0$
Vereinfachte Ersatzschaltung für die Praxis			

Tafel 5.7. Elektrisches Verhalten der elektrotechnischen Grundbauelemente

	L	R	C
Ideales Bauelement an Gleichspannung (ohne Betrachtung von Veränderungen)			
Kennzeichnung des Strom-Spannungs-Verhaltens	$E_s = -L \frac{\Delta I_L}{\Delta t}$ $U_L = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t}$	$I = \frac{U}{R} = \text{konst.}$	$I_C = C \frac{\Delta U_C}{\Delta t}$
Ideales Bauelement bei veränderlichen Gleichgrößen			
Ideales Bauelement beim Schaltvorgang			
Zeitkonstante	$\tau = \frac{L}{R}$		$\tau = C R$
Charakterisierung	Energiespeicher	Energiewandler	Energiespeicher

Zeitkonstante	Formelzeichen	$\tau$	
Physikalischer Zusammenhang		$\tau = \frac{L}{R}$	(5.39)
Einheit		$[\tau] = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s} \cdot 1 \text{ A}}{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ V}} = 1 \text{ s}$	

Die Zeitkonstante  $\tau$  gibt die Zeit an, nach der die Spulenstromstärke auf das  $(1 - \frac{1}{e})$ -fache (etwa 63 %) ihres Endwertes angewachsen bzw. die Spulenspannung auf das  $\frac{1}{e}$ -fache (etwa 37 %) ihres Anfangswertes gesunken ist.

Halbwertzeit	Als Halbwertzeit $t_H$ wird die Zeit bezeichnet, nach der der Strom in der Spule auf die Hälfte des Anfangswertes gesunken ist. Es gilt
Praktische Bezüge	$t_H = 0,7\tau$ . (5.40)

Die in den Bildern 5.43 bis 5.46 dargestellten Funktionen gelten in der Praxis als abgeklungen, wenn  $t \approx 5\tau$  ist.

Dieser Richtwert ist insbesondere in der Signalübertragung von Bedeutung.

## 5.11. Kraftwirkungen elektromagnetischer Felder

### 5.11.1. Kraftwirkungen auf magnetisierbare Materialien

Elektromagneten sind in der Lage, magnetisierbare Materialien (vor allem Eisen) auf Grund der magnetischen Influenz anzuziehen bzw. festzuhalten oder zu bewegen (Bild 5.49).

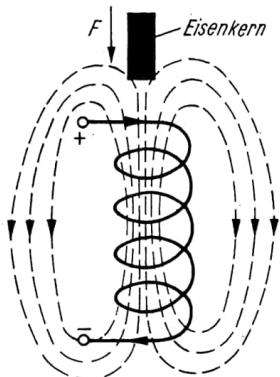
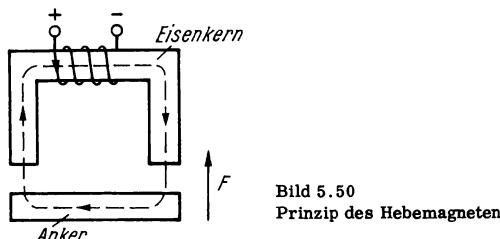
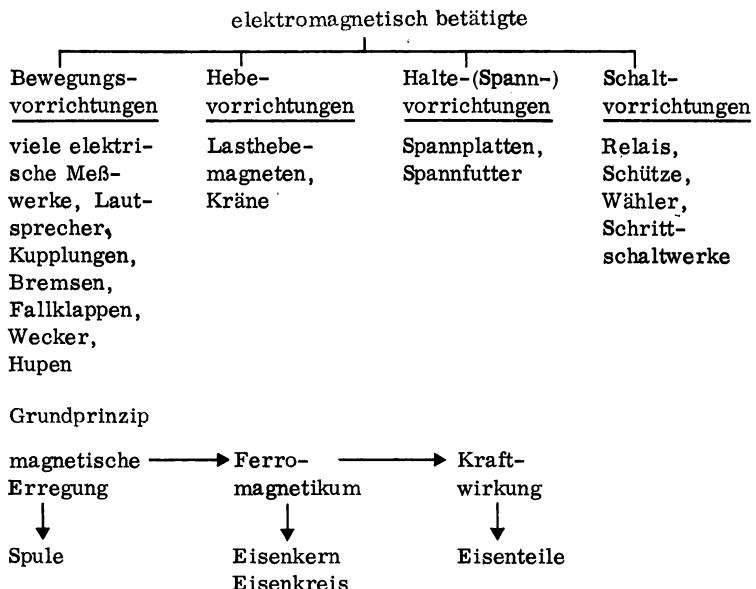


Bild 5.49  
Prinzip elektromagnetischer Bewegungsvorrichtungen

Mit relativ geringem elektrischem Energieaufwand lassen sich hohe Magnetflußdichten erreichen. Damit können auch große Kraftwirkungen erreicht werden.

Typische Anwendungen sind:



Berechnung der Kraftwirkungen

Die Kraftwirkungen können überschlägig berechnet werden.

Physikalischer Zusammenhang

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (5.41)$$

F Zugkraft in N

B Magnetflußdichte in  $\frac{V \cdot s}{m^2}$ ,

A wirksame Polfläche in  $m^2$ ,

$\mu_0$  absolute Permeabilität  $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$

Die Kraftwirkungen auf Ferromagnetika sind bei Lasthebmagneten dem Quadrat des Magnetflusses (bzw. der Magnetflußdichte) proportional.

### 5.11.2. Kraftwirkungen auf stromdurchflossene Leiter

Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben (Rechtsschraubenregel).

Wird dieser Leiter in ein vorhandenes Magnetfeld gebracht, überlagern sich die Einzelmagnetfelder (Bild 5.51).

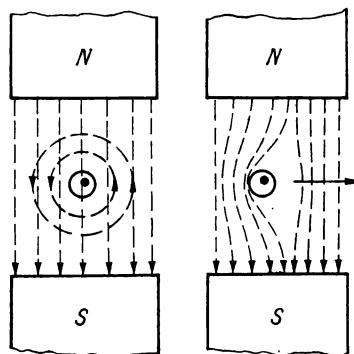


Bild 5.51  
Stromdurchflossener Leiter im  
Magnetfeld

Die Überlagerung führt zu einem resultierenden Magnetfluß. Dabei entstehen seitenbehaftet räumlich

- Flußverstärkung,
- Flußschwächung.

Der resultierende Magnetfluß übt eine Kraftwirkung auf den Leiter aus (Verkürzungsbestreben der Feldlinien).

Für die Richtung der Kraftwirkung gilt

Linke-Hand-Regel (Motorregel).

Hält man die linke Hand so in ein Magnetfeld, daß die Feldlinien in den offenen Handtellerr eintreten und die ausgestreckten vier Finger in Leiterstromrichtung zeigen, zeigt der abgespreizte Daumen in Richtung der Kraft auf den Leiter (Bild 5.52).

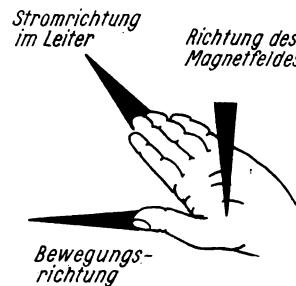


Bild 5.52  
Linke-Hand-Regel (Motorregel)

Hinweis

Auf den gleichen Grundlagen beruht die U(rsache)-V(ermittlungs)-W(irkungs)-Regel.

Die Regel ist jeweils für den betrachteten Teil des Leiters anzuwenden.

Energiewandlung  
elektrisch  $\longrightarrow$  magnetisch  $\longrightarrow$  mechanisch

Die am Leiter angreifende Kraft ist um so größer,

- je größer die Magnetflußdichte,
- je größer die Stromstärke im Leiter,
- je größer die magnetisch wirksame Länge

ist.

Für die am Leiter angreifende Kraft gilt

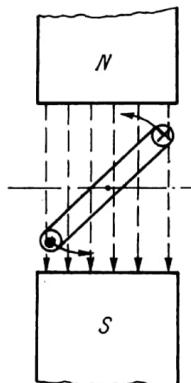
$$F = B I l_m ; \quad (5.42)$$

**F** Kraft auf den Leiter in N,

**B** Magnetflußdichte in  $\frac{V \cdot s}{m^2}$ ,

**I** Stromstärke im Leiter in A,

**$l_m$**  magnetisch wirksame Länge in m.



Die Kraftwirkung wird durch Verwendung mehrerer in Reihe geschalteter Leiter (Spulen) vervielfacht.

$$F = B I l_m N \quad (5.43)$$

Der stromdurchflossene Leiter kann auch drehbar im Magnetfeld angeordnet sein (Bild 5.53).

Bild 5.53  
Drehbare stromdurchflossene Leiterschleife  
im homogenen Magnetfeld

#### Motorprinzip

Da die Kraft an entsprechenden Kraftarmen angreift (Radius der Leiterschleife), gilt

$$M_d = F 2 r ,$$

$$M_d = B I l_m N 2 r . \quad (5.44)$$

Aus der Beziehung

$$M_d = \frac{\Phi}{[A]} \cdot I \cdot \boxed{1 \frac{m}} \cdot \boxed{N} \cdot \boxed{2 r}$$

erkennt man, daß für einen bestimmten Motor auch bestimmte konstruktive Größen vorhanden sind.

Deshalb gilt allgemein für jeden Motor

#### Allgemeine Motorengleichung

$$M_d = C_2 \Phi I ; \quad (5.45)$$

**$C_2$**  Maschinenkonstante (abhängig von der Konstruktion).

### 5.11.3. Elektromagnetische Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern

Parallele Stromleiter	Zwischen parallel verlaufenden stromdurchflossenen Leitern entstehen durch Überlagerung von Magnetfeldern Kraftwirkungen.		
Gegensinnig stromdurchflossen	Abstoßende Kraftwirkung	Gleichsinnig stromdurchflossen	Anziehende Kraftwirkung

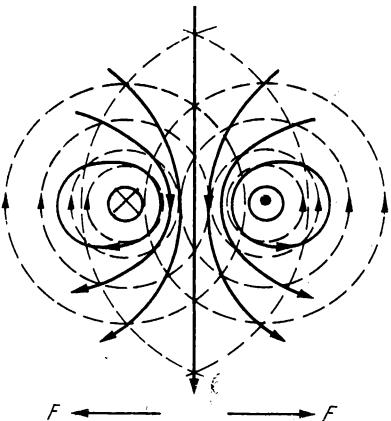


Bild 5.54  
Parallele, gegensinnig stromdurchflossene Leiter

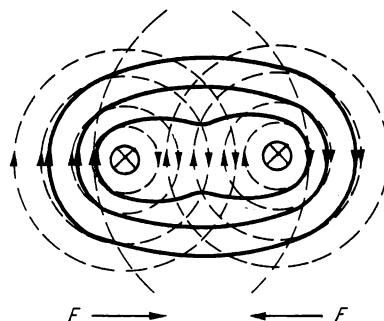


Bild 5.55  
Parallele, gleichsinnig stromdurchflossene Leiter

Elektrodynamische Kraftwirkungen	Treten vor allem bei hohen Stromstärken (z. B. bei Kurzschlüssen) auf. Deshalb müssen Sammelschienensysteme, Hochleistungswicklungen (Transformatoren, Kurzschlußdrosseln) mechanisch verstift und mit hoher Sicherheit befestigt werden. Die zwischen parallelen stromdurchflossenen Leitern auftretende Kraft kann berechnet werden.
----------------------------------	--

Berechnung der Kraftwirkungen

Physikalischer Zusammenhang

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2 \pi a} \quad (5.46)$$

F Kraft zwischen den Leitern in N,  
 $\mu_0$  absolute Permeabilität in  $\frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ ,  
 $I_1$  Leiterstrom 1 in A,  
 $I_2$  Leiterstrom 2 in A,  
a Abstand der Leiter in m,  
l Länge der Leiter in m.

Definition der Grundeinheit Ampere	Mit Hilfe der elektrodynamischen Kraftwirkungen wird die Einheit der elektrischen Stromstärke definiert: 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.
------------------------------------	--

## 6. Wechselstromerscheinungen

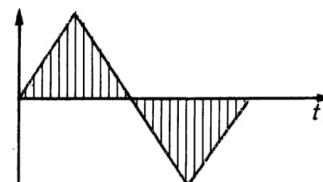
Begriffsbestimmung  
„Wechselgrößen“

Unter Wechselgrößen versteht man Größen, deren Augenblickswerte  $u(t)$  oder  $i(t)$  zeitlichen Änderungen in Betrag und Richtung unterliegen.

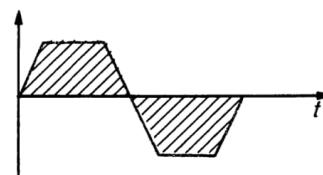
Wechselgrößen sind also schwankende Größen. Ein über einen längeren Betrachtungszeitraum gebildeter linearer Mittelwert hat den Wert Null.

Formen von  
Wechselgrößen

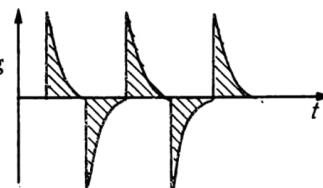
Dreieckgröße  
Impulstechnik



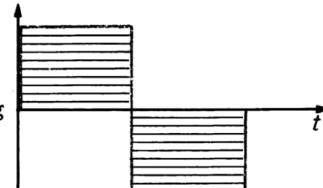
Trapezförmige Größe  
Impulstechnik  
elektrische Maschinen



Nadelförmige Größe  
Informationsverarbeitung  
Impulstechnik



Rechteckförmige Größe  
Impulstechnik  
Informationsverarbeitung  
(ohne zeitliche Betragsänderung)



Sinusförmige Größe  
Leistungselektrrotechnik  
Informations-  
elektrotechnik

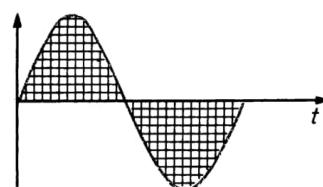


Bild 6.1  
Formen von Wechselgrößen

## 6.1. Sinusförmige Wechselspannung

Begriffsbestimmung  
„sinusförmige Wechselspannung“

Eine sinusförmige Wechselspannung ist eine Spannung, deren Augenblickswert periodisch nach einer Sinusfunktion der Zeit verläuft.

Vorzüge

Die Sinusform hat gegenüber anderen Formen bedeutende Vorzüge:

- Spannungen und Ströme ändern sich stetig ohne Spitzen oder Sprünge (vgl. Bild 6.1).
- Das Prinzip der Gegeninduktion (Transformatoren) ist günstig einsetzbar (vgl. Abschn. 5.8.3.).
- Die Sinusform wird durch die Grundbauelemente R, L, C nicht verändert (vgl. Abschn. 6.2.1.1.).
- Die Leistungsübertragung kann gleichmäßig und verlustarm erfolgen.
- Die Spannungserzeugung kann in mehreren parallelgeschalteten Generatoren verhältnismäßig einfach erfolgen, ohne daß große Ausgleichsströme fließen.
- Die Verläufe von Spannung, Strom und Leistung sind grafisch und mathematisch einfach erfaßbar.

Erzeugung

Technische Wechselspannungen dürfen nur geringfügig von der idealen Sinusform abweichen.

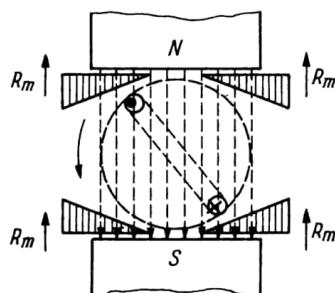


Bild 6.2  
Prinzip der Erzeugung sinusförmiger Spannungen

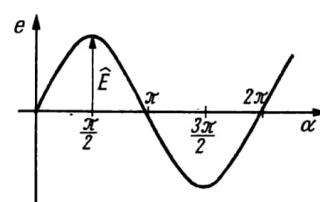


Bild 6.3  
Sinusspannung in Abhängigkeit von einer Drehbewegung

Bei Drehung einer Leiterschleife im parallel-homogenen Magnetfeld entsteht eine sinusförmige Wechselspannung

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (\text{vgl. Bilder 6.2 und 6.3}).$$

Die Drehbewegung liefert unter diesen Bedingungen sinusförmige Wertänderungen. Die Anordnung kann in der Praxis nicht zur Spannungserzeugung genutzt werden, da der magnetische Widerstand sehr groß ist (vgl. Bild 6.2).

Man baut deshalb Generatoren mit sehr kleinem Luftspalt. Die Feldlinien treten dabei immer senkrecht in die Polschuhe ein, d.h., die Drehbewegung liefert keine sinusförmige Änderung mehr.

Um eine sinusförmige Spannung zu erhalten, müssen die Generator-Polschuhe besonders konstruiert und die Wicklungen des Generators in geeigneter Form angeordnet sein.

Sinusförmige Spannungen entstehen nicht zwangsläufig durch Drehbewegung von Leiterschleifen im Magnetfeld, sondern durch geeigneten konstruktiven Aufbau.

### 6.1.1. Bestimmungsgrößen sinusförmiger Wechselspannungen und -ströme

Spitzenwert

Nach Bild 6.3 gilt für einen sinusförmigen Verlauf

$$e = \hat{E} \sin \alpha ; \quad (6.1)$$

$\hat{E}$  Spitzenwert der erzeugten Umspannung.

Positive und negative Halbwelle der Sinusspannung ergeben einen vollen Durchlauf (eine Periode, eine Welle, eine Schwingung).

Periodendauer

Die Periodendauer  $T$  ist die kleinste Zeitdauer, nach der sich eine periodische Größe wiederholt.

Einheit  $[T] = 1 \text{ s}$

Frequenz

Die Anzahl der entstehenden Perioden in der Zeiteinheit ist die Frequenz. Die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer.

Formelzeichen

$f$

Physikalischer Zusammenhang

$$f = \frac{1}{T} \quad (6.2)$$

Einheit

Hertz

$$[f] = \frac{1}{s} = 1 \text{ Hz}$$

(Heinrich Hertz, 1857-1894, deutscher Physiker)

Tafel 6.1. Richtwerte für technische Frequenzen

Bereich Hz	Anwendung
16 2/3	Bahnfrequenz der Deutschen Reichsbahn
50	technischer Wechselstrom
16...20 000	Hörbarkeitsbereich Niederfrequenz
bis $3 \cdot 10^5$	Langwelle LW AM-Rundfunk
$3 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$	Mittelwelle MW AM-Rundfunk
$3 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^7$	Kurzwelle KW AM-Rundfunk
$3 \cdot 10^7 \dots 3 \cdot 10^8$	Ultrakurzwelle UKW FM-Rundfunk
$(48 \dots 230) \cdot 10^6$	Fernsehbänder VHF
$(470 \dots 630) \cdot 10^6$	Fernsehbänder UHF

Hochfrequenz

Die Frequenz eines rotierenden Generators ist von der Drehzahl und von der Polpaarzahl abhängig.

Es gilt

$$f = \frac{n p}{60} ; \quad (6.3)$$

$f$  Frequenz in Hz

$n$  Drehzahl in  $\text{min}^{-1}$

$p$  Polpaarzahl

Tafel 6.2. Reihe der synchronen Drehzahlen bei  $f = 50$  Hz

Polpaar- zahl	1	2	3	4	...	10	...	32
Drehzahl $\text{min}^{-1}$	3000	1500	1000	750	...	300	...	94

Winkel-  
geschwindigkeit

Für Drehbewegungen ist eine besondere Geschwindigkeitsangabe zweckmäßig. Um von Abmessungen unabhängig zu sein, verwendet man dazu die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

Beim Durchlaufen eines Vollkreises ist

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Mit  $T = \frac{1}{f}$  entsteht

Formelzeichen  $\omega$   
Physikalischer Zusammenhang  $\omega = 2\pi f$

Einheit  $[\omega] = \frac{1}{s} = 1 \text{ Hz}$

Kreisfrequenz

In der Elektrotechnik bezeichnet man  $\omega$  als Kreisfrequenz. Sie gibt an, wievielmal in  $2\pi$  Sekunden der Radius einen Vollkreis beschreibt.

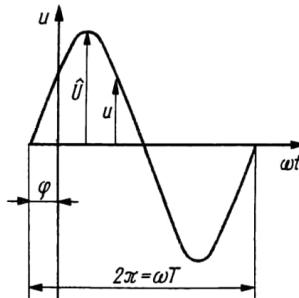


Bild 6.4  
Maximalwert und Momentanwert einer Sinusspannung

Augenblicks- oder Momentanwerte

Die in jedem Augenblick entstehenden Werte von Sinusgrößen.

Maximalwert, Spitzenwert

Der größte Momentanwert einer Sinusgröße.

Grundgesetz der Wechselstromtechnik

$$u = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi)$$

(6.5)

Sinuszeitgesetz. Es gilt analog für andere sinusförmige Größen, z.B. auch für sinusförmige Ströme.

$$i = \hat{I} \sin(\omega t + \varphi)$$

(6.5 a)

Zu einem Zeitpunkt  $t$  ist ein bestimmter Bewegungszustand vorhan-

den, der sich in periodischen Abständen  $T$  wiederholt. Der Phasenwinkel  $\varphi$  ist notwendig, um Sinusgrößen mit unterschiedlicher Phasenlage zu kennzeichnen. Der zur Zeit  $t = 0$  vorhandene Phasenwinkel heißt **Nullphasenwinkel**.

Mittelwerte

Zur Beschreibung der Wirkungen von Wechselgrößen werden meist Mittelwerte verwendet.

### Effektivwert

Der Mittelwert einer Wechselgröße, der die gleichen Wirkungen wie ein Gleichstrom hervorruft, ist deren **Effektivwert**.

Die verrichtete Wärmearbeit kann nach dem Jouleschen Gesetz als Flächeninhalt

$$W = P t$$

dargestellt und berechnet werden.

Für sinusförmigen Wechselstrom gilt

$$W = \hat{I}^2 \sin^2 \omega t R t .$$

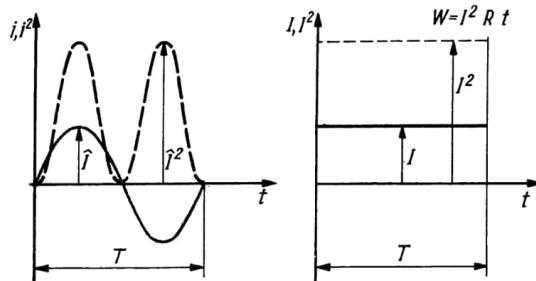


Bild 6.5. Vergleich zwischen der Wärmearbeit von Wechselstrom und Gleichstrom

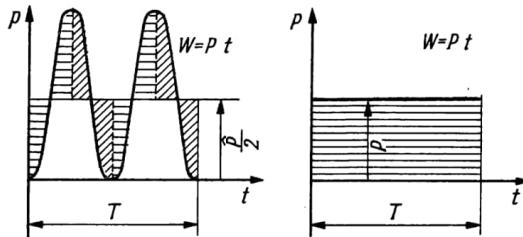


Bild 6.6. Darstellung der Wärmearbeit als Fläche

Es gilt

$$W_{\sim} = W_{-} ,$$

$$\frac{\hat{P}}{2} T = P T ,$$

$$\frac{\hat{I}^2}{2} R T = I^2 R T ,$$

$$\frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = I_{\text{(eff)}}, \quad (6.6)$$

$$\frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = U_{\text{(eff)}}. \quad (6.7)$$

Der Effektivwert einer sinusförmigen Wechselgröße beträgt 70,7 % des Spitzenwertes.

Üblich ist es in der technischen Praxis, den Effektivwert von Spannungen und Strömen ohne Index anzugeben.

(z. B.  $U = 220 \text{ V} \longrightarrow \hat{U} = 311 \text{ V}$ ).

#### Arithmetischer Mittelwert

Werden gleichgerichtete Wechselstromhalbwellen für elektrolytische Anlagen benutzt, wird ein Mittelwert verwendet, der während einer Halbwelle die gleiche Elektrizitätsmenge ergibt wie ein sinusförmig verlaufender Strom. Man bezeichnet diesen Wert als **arithmetischen oder elektrolytischen Mittelwert**.

Es gilt

$$\bar{I} = 0,637 \hat{I}, \quad (6.8)$$

$$\bar{U} = 0,637 \hat{U}. \quad (6.9)$$

Der arithmetische Mittelwert einer sinusförmigen Wechselgröße beträgt etwa 64 % des Spitzenwertes.

#### 6.1.2. Grafische Darstellung und Darstellungshilfen

Periodische Vorgänge, wie z.B. die Sinusspannung, werden in der Technik zur besseren Übersicht in Diagrammen dargestellt.

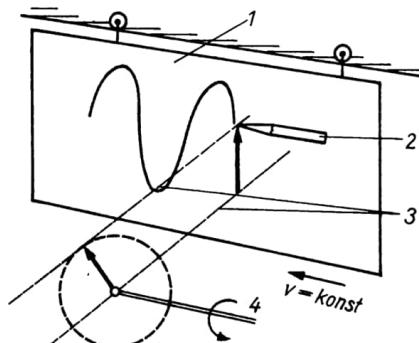


Bild 6.7  
Modell zur Entstehung eines Liniendiagramms aus einem rotierenden Zeiger  
1 Projektionsfläche; 2 Zeichengerät; 3 Lichtstrahleinfall  
4 Antrieb

Bewegt man entsprechend Bild 6.7 einen Zeiger durch einen Antrieb mit konstanter Winkelgeschwindigkeit und bildet ihn durch parallel verlaufende Lichtstrahlen auf einer Projektionsfläche als Schatten ab, so ändert sich die Länge des Zeigerschattens sinusförmig mit der Zeit. Wird die Projektionsfläche senkrecht zum Lichtstrahleinfall gleichförmig bewegt, zeichnet das Zeichengerät eine Sinuslinie (Liniendiagramm).

## Liniendiagramm

Die Darstellung einer sinusförmigen Wechselgröße wird aus der zeitlichen Abwicklung der Projektion eines als rotierenden Zeiger dargestellten Scheitelwertes gewonnen.

Als **Bewegungsrichtung** wird der Gegenuhrzeigersinn festgelegt.

Die **Augenblickswerte** sind über dem Drehwinkel  $\alpha = \omega t$  (vgl. Winkelgeschwindigkeit) als Strecken aufgetragen. Ihre Endpunkte liegen auf einer Linie, die das Bild der Zeitfunktion ist.

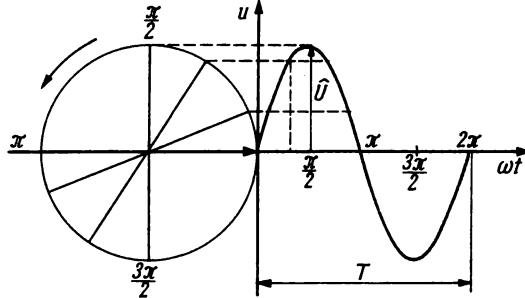


Bild 6.8. Konstruktion eines Liniendiagramms aus einem rotierenden Zeiger

## Hinweis

Die Arbeit mit dem Liniendiagramm ist umständlich, da die gesamte Sinuslinie gezeichnet werden muß. Bei der Darstellung von mehr als vier Sinusgrößen ist das Liniendiagramm nicht mehr brauchbar.

## Zeigerdiagramm

Ein **umlaufender Zeiger** ist eine Strecke, die mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um einen Endpunkt rotiert. Die Länge des Zeigers entspricht dem Scheitelwert der Sinusfunktion.

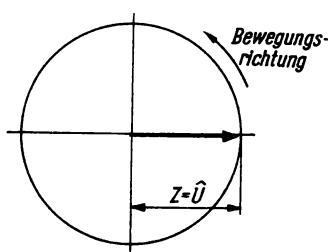


Bild 6.9  
Darstellung der Wechselspannung bzw. des Wechselstroms als Zeiger

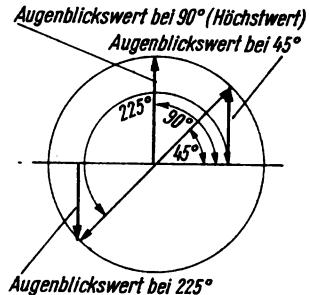


Bild 6.10  
Konstruktion der Augenblickswerte aus dem Zeigerdiagramm

Bei der Erarbeitung der Konstruktion des Zeigerdiagramms wird vom Liniendiagramm ausgegangen. Die horizontale Achse wird als **Bezugsachse** für die umlaufende Strecke gewählt. Der Umlauf erfolgt in **mathematisch positivem Drehsinn**.

Die Zeit für einen Umlauf ist der **Schwingungsdauer T** gleich.

Um für eine beliebige Zeigerstellung den ihr entsprechenden Augenblickswert der Spannung oder der Stromstärke zu ermitteln, fällt man

das Lot von der Zeigerspitze auf die durch den Mittelpunkt des Kreises gehende waagerechte Achse. Die Lotlänge entspricht dem jeweiligen Augenblickswert.

Kennzeichnende Bestimmungsstücke bei der Zeigerdarstellung sind

- Amplitude oder Betrag der sinusförmigen Größe

Die Länge des Zeigers ist ein Maß für die Amplitude. Dabei wird der gewählte Längenmaßstab (z. B. V/mm oder A/mm) auf den Effektivwert der Wechselgröße bezogen.

- Frequenz der sinusförmigen Größe

Tritt beim Zeigerdiagramm nicht in Erscheinung. Also können in einer Zeigerdarstellung nur Größen mit gleicher Frequenz dargestellt werden.

Hinweis

In der Leistungselektrrotechnik ist diese Einschränkung meist garantiert. Besonders in der Hochfrequenztechnik werden bei Größen unterschiedlicher Frequenz andere geeignete Darstellungsverfahren angewendet.

- Phasenlage der sinusförmigen Größen untereinander

Sind zwei oder mehrere sinusförmige Größen zeitlich verschoben, so wird das durch den Winkel zwischen den Größen verdeutlicht.

Zeiger sind durch Betrag, Lage (Winkel) und Kreisfrequenz eindeutig gekennzeichnet.

In der technischen Praxis werden meist ruhende Zeiger zur Veranschaulichung von Vorgängen verwendet.

Haben die darzustellenden Sinusgrößen die gleiche Kreisfrequenz, so kann man auf den Umlauf verzichten. Aus diesem „in Ruhe“ befindlichen Zeigerdiagramm bei  $t = 0$  können die Scheitelwerte (Betrag des Zeigers) und die Phasenlage (Winkel) der Sinusfunktionen leicht abgelesen werden. In der Regel stellt man mittels ruhender Zeiger Effektivwerte dar (z. B.  $U$ ,  $I$ ).

Beispiel:

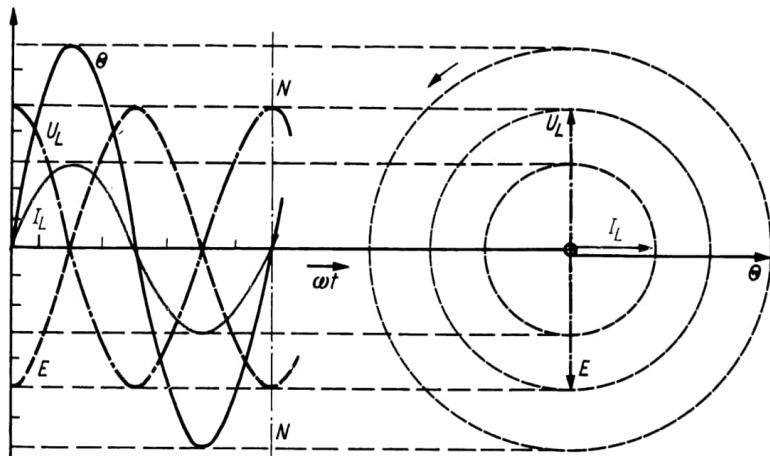


Bild 6.11. Darstellung verschiedener Größen an einer mit sinusförmiger Wechselspannung gespeisten idealen Spule

Im Bild 6.11 wird die Zuordnung der Zeiger der Größen zueinander beispielsweise nicht bei  $\omega t = 0$ , sondern bei  $\omega t$  an der Stelle N-N dargestellt. Es ist also möglich, Zeiger von sinusförmigen Größen zu beliebigen Zeitpunkten darzustellen.

Hinweis

Das Arbeiten mit Linien- und Zeigerdiagrammen wird in den Abschnitten 6.2. und 6.3. an vielen Beispielen ausführlich gezeigt und erläutert.

## 6.2. Wechselstromerscheinungen bei passiven und aktiven Zweipolen

### 6.2.1. Passive Zweipole im Wechselstromkreis

Elemente des Wechselstromkreises

Jeder Wechselstromkreis besteht aus **Spannungsquelle(n)** mit den typischen zugeordneten Eigenschaften und aus angeschlossenen **Betriebsmitteln**. Damit entspricht jeder Wechselstromkreis im Aufbau dem Grundstromkreis (vgl. Abschn. 3.6.1.).

Betriebsmittel

- Widerstand
- Kondensator
- Spule
- Kombinationen von Widerstand, Kondensator und (oder) Spule

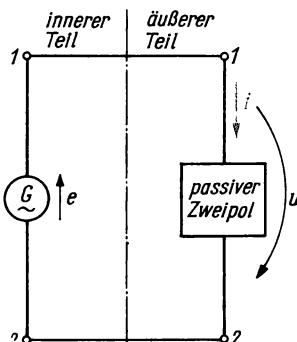


Bild 6.12  
Wechselstromkreis (allgemein)

#### 6.2.1.1. Ideale Widerstände, Spulen und Kondensatoren

Idealer Widerstand Es muß gelten

$$R \neq 0, C_R = 0, L_R = 0.$$

Ein idealer Widerstand hat keine Kapazität und keine Induktivität.

Ideale Spule Es muß gelten

$$L \neq 0, R_L = 0, C_L = 0.$$

Eine ideale Spule hat keinen Widerstand und keine Kapazität (vgl. dazu Abschn. 5.8.5.4.).

## Idealer Kondensator

Es muß gelten

$$C \neq 0, \quad L_C = 0, \quad R_C = \infty.$$

Ein idealer Kondensator hat keine Induktivität und einen unendlichen Widerstand.

Elemente des Wechselstromkreises

Verhalten  
Widerstand

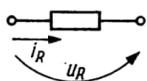


Bild 6.13. Strom und Spannung am Widerstand

Für den Widerstand mit der Eigenschaft ohmscher Widerstand gilt

$$R = \frac{u_R}{i_R} = \frac{U_R}{I_R} = \text{konst.}; \quad (6.10)$$

$$u_R = i_R R \quad \text{oder} \quad i_R = u_R \frac{1}{R}.$$

Strom und Spannung am Widerstand sind einander direkt proportional.

Spannung und Strom erreichen also zur gleichen Zeit Nulldurchgänge, proportionale Momentanwerte und Höchstwerte.

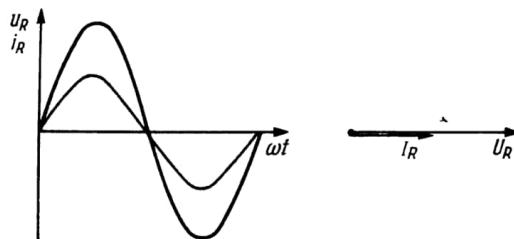


Bild 6.14. Strom- und Spannungsverlauf am Widerstand

Beim idealen Widerstand liegen Spannung und Strom phasengleich („in Phase“).

Es gilt

$$\varphi_u = \varphi_i.$$

## Spule

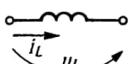


Bild 6.15. Strom und Spannung an der Spule

Für die Spule mit der Eigenschaft Induktivität gilt der Zusammenhang

$$u_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \quad [\text{vgl. mit Gln. (5.23) und (5.27)}].$$

An den Stellen der größten Stromänderungsgeschwindigkeit (d. h. an den Nulldurchgängen) muß die Spannung über der Spule ihre Höchstwerte erreicht haben. An den Stellen der geringsten zeitlichen Stromänderung (Höchstwerte) muß die Spannung gering oder Null sein (vgl. Abschn. 5.8.5.5. und Bild 5.41).

Nulldurchgänge, Momentan- und Höchstwerte von Spannung und Strom sind also nicht zu den gleichen Zeitpunkten vorhanden.

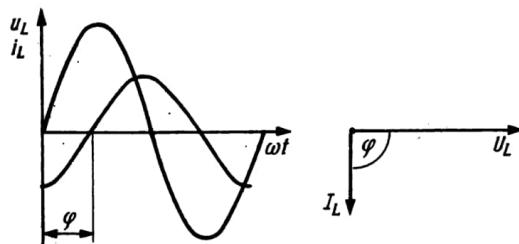


Bild 6.16. Strom- und Spannungsverlauf an der Spule

Bei der idealen Spule liegen Spannung und Strom um  $90^\circ = \frac{\pi}{2}$  phasenverschoben. Der Strom eilt der Spannung nach.

Es gilt

$$\varphi_u \neq \varphi_i ;$$

$$\varphi_i = \varphi_u - 90^\circ = \varphi_u - \frac{\pi}{2}.$$

Kondensator

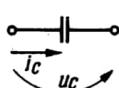


Bild 6.17  
Strom und Spannung  
am Kondensator

Für den Kondensator mit der Eigenschaft Kapazität gilt

$$i_C = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t} \quad [\text{vgl. mit Gl. (4.29)}].$$

Tritt die größte zeitliche Spannungsänderung (Nulldurchgänge) auf, fließt der größte Strom am Kondensator.

Der Strom wird Null, wenn sich die Spannung zeitlich nicht ändert (am Höchstwert) (vgl. Abschn. 4.9.2. und Bild 4.20).,

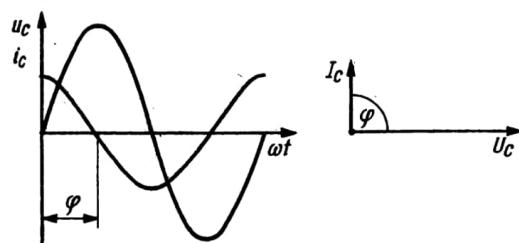


Bild 6.18. Strom- und Spannungsverlauf am Kondensator

Am idealen Kondensator liegen Spannung und Strom um  $90^\circ = \frac{\pi}{2}$  phasenverschoben. Der Strom eilt der Spannung voraus.

$$\varphi_u \neq \varphi_i$$

$$\varphi_i = \varphi_u + 90^\circ = \varphi_u + \frac{\pi}{2}.$$

Widerstands-  
beziehungen

Idealer Widerstand R  
(Resistanz) Der ohmsche Widerstand eines idealen Widerstandes ist nicht von der jeweiligen Stromart abhängig.  
Es gilt

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \quad \hat{U} = U \sqrt{2}; \quad \hat{I} = I \sqrt{2};$$

$$R = \frac{U}{I} \quad [\text{vgl. Gl. (3.11)}] . \quad (6.11)$$

Idealer Leitwert G

Für den Leitwert gilt

$$G = \frac{I}{U} = \frac{1}{R} \quad [\text{vgl. Gln. (3.9), (3.10)}] . \quad (6.12)$$

Idealer induktiver  
Blindwiderstand  $X_L$   
(Induktanz)

Für die Induktivität einer idealen Spule besteht zwischen Spannung und Strom der Zusammenhang

$$u_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} .$$

Für sehr kleine Winkel kann die Gleichung für den Strom

$$i_L = \hat{i}_L \sin \omega t \quad \text{umgeformt werden in} \\ i_L \approx \hat{i}_L \omega t .$$

Die maximale Stromänderungsgeschwindigkeit tritt beim Nulldurchgang auf

$$(\Delta i_L)_{\max} = \hat{i}_L \omega \Delta t ,$$

$$\left( \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \right)_{\max} = \hat{i}_L \omega ,$$

Einsetzen in die Ausgangsgleichung ergibt:

$$L \left( \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \right)_{\max} = \hat{U}_L ,$$

$$\hat{U}_L = \hat{i}_L \omega L ;$$

$$\frac{\hat{U}_L}{\hat{i}_L} = \frac{U_L}{I_L} = \omega L .$$

Der Quotient aus Spulenspannung und Spulenstrom wird als induktiver Blindwiderstand definiert.

$$X_L = \omega L \quad (6.13)$$

Ein Blindwiderstand hat nicht den physikalischen Charakter eines Widerstandes.

Der induktive Blindwiderstand ist ein Maß für die strombehindernde Eigenschaft einer Spule bei Wechselstrom.

Im Blindwiderstand wird die Spannungsabhängigkeit des induktiven Stromes dargestellt.

Idealer induktiver Blindleitwert  $B_L$

Für den induktiven Blindleitwert wird definiert

$$B_L = \frac{I_L}{U_L} = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L} . \quad (6.14)$$

Idealer kapazitiver Blindwiderstand  $X_C$  (Kondensanz)

Analog gilt für die Kapazität des idealen Kondensators

$$i_C = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t} .$$

$u_C = \hat{U}_C \sin \omega t$  geht am Nulldurchgang (bzw. bei sehr kleinen Winkeln  $\omega t$ ) in

$$u_C = \hat{U}_C \omega t \quad \text{über.}$$

Analog zur idealen Spule kann abgeleitet werden

$$\frac{\hat{U}_C}{I_C} = \frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{\omega C} . \quad (6.15)$$

Der Quotient aus Kondensatorspannung und Kondensatorstrom wird als kapazitiver Blindwiderstand definiert.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (6.16)$$

Hinweis

Es wird unter dem Begriff kapazitiver Blindwiderstand nur die Spannungsabhängigkeit des Stromes verstanden. Der kapazitive Blindwiderstand ist ein Maß für die strombehindernde Eigenschaft eines Kondensators bei Wechselstrom.

Idealer kapazitiver Blindleitwert  $B_C$  (Kapazitanz)

Für den kapazitiven Blindleitwert wird definiert

$$B_C = \frac{I_C}{U_C} = \frac{1}{X_C} = \omega C . \quad (6.17)$$

Frequenzverhalten

Idealer Widerstand

$$R = \frac{U}{I}$$

Ideale ohmsche Widerstände sind frequenzunabhängig.

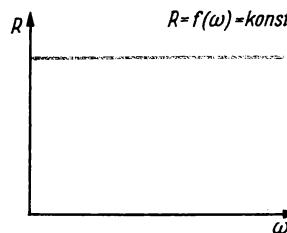


Bild 6.19  
Frequenzverhalten von Widerständen

Idealer induktiver  
Blindwiderstand

$$X_L = \omega L$$

Induktive Blindwiderstände  
sind frequenzabhängige Größen.

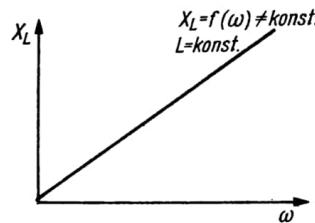


Bild 6.20  
Frequenzverhalten von induktiven Blindwiderständen

Idealer kapazitiver  
Blindwiderstand

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Kapazitive Blindwiderstände  
sind frequenzabhängige Größen.

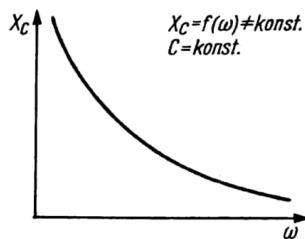


Bild 6.21  
Frequenzverhalten von kapazitiven Blindwiderständen

Leistungsbetrachtung  
Leistungsumsatz am  
idealen Widerstand

Für die Leistung gilt in jedem Augenblick

$$p = u i \quad (6.18)$$

Durch Multiplikation der Momentanwerte von Spannung und Stromstärke ergibt sich stets eine positive Leistung.

Diese elektrische Leistung tritt aus dem Stromkreis z.B. als gewandelte Leistung (Wärme) heraus (Wirkleistung).

Die mittlere Leistung an einem Widerstand tritt als abgegebene Leistung, die Wirkungen außerhalb des Stromkreises hervorruft, auf.

Das Grundbauelement Widerstand wird wegen dieser Eigenschaft als Wirkwiderstand bezeichnet.

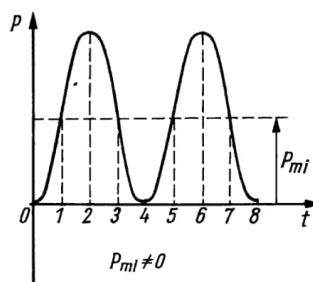


Bild 6.22  
Leistungsverlauf am Wirkwiderstand

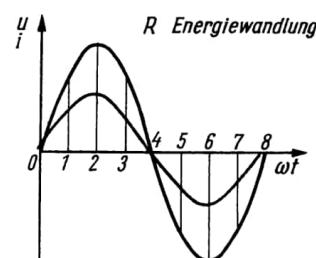


Bild 6.23  
Strom- und Spannungsverlauf am Wirkwiderstand

Leistungsumsatz am idealen induktiven Blindwiderstand

Induktive Blindleistung

Durch den zur Spannung phasenverschoben nacheilenden Strom ergibt sich durch Multiplikation eine ständig pendelnde Leistung.

Es tritt beim idealen induktiven Blindwiderstand keine Leistung aus dem Kreis heraus.

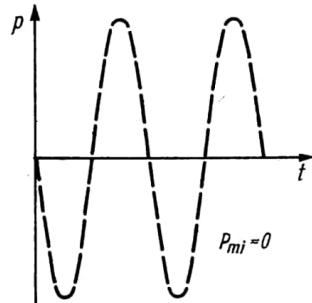


Bild 6.24  
Leistungsverlauf am induktiven Blindwiderstand

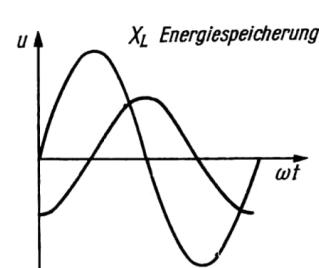


Bild 6.25  
Strom- und Spannungsverlauf am induktiven Blindwiderstand

Beim idealen induktiven Blindwiderstand findet eine ständige Leistungspendelung zwischen der Spannungsquelle und dem induktiven Betriebsmittel statt (Aufbau und Zusammenbruch des elektromagnetischen Feldes).

Leistungsumsatz am idealen kapazitiven Blindwiderstand

Kapazitive Blindleistung

Auch beim idealen kapazitiven Blindwiderstand tritt wegen der Phasenverschiebung des Stromes zur Spannung keine Leistung aus dem Kreis heraus.

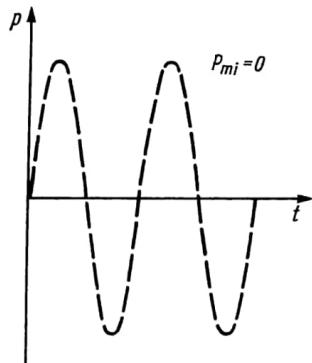


Bild 6.26  
Leistungsverlauf am kapazitiven Blindwiderstand

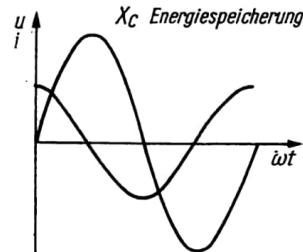


Bild 6.27  
Strom- und Spannungsverlauf am kapazitiven Blindwiderstand

Die Leistungspendelung am idealen kapazitiven Blindwiderstand tritt wie beim induktiven Blindwiderstand zwischen Spannungsquelle und Betriebsmittel auf (Aufbau und Zusammenbruch des elektrostatischen Feldes).

Induktive und kapazitive Blindleistung verlaufen entgegengesetzt.

### 6.2.1.2. Zusammenschaltungen von idealen Widerständen, Spulen und Kondensatoren

Wie alle Zweipole können die Wechselstromwiderstände schaltungstechnisch miteinander verknüpft werden.

Man unterscheidet

- Reihenschaltungen,
- Parallelschaltungen,
- Gemischtschaltungen

von Wechselstromwiderständen.

Hinweis

Die letztgenannten Schaltungen werden in der Berufsausbildung nicht oder selten berechnet.

Für die Berechnung von Wechselstromkreisen gelten die gleichen Grundgesetze wie bei der mathematischen Erfassung von Gleichstromkreisen.

Es gelten

- Knotenpunktsatz (1. Kirchhoffsches Gesetz),
- Maschensatz (2. Kirchhoffsches Gesetz).

Bei der Anwendung dieser Gesetze ist in Wechselstromkreisen die Phasenlage von Strömen und Spannungen zu berücksichtigen.

#### 6.2.1.2.1. Reihenschaltungen

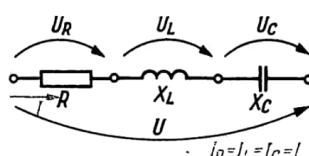


Bild 6.28  
Reihenschaltung von Wirkwiderstand, induktivem und kapazitivem Blindwiderstand

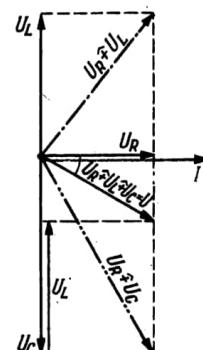


Bild 6.29  
Geometrische Addition der Teilspannungen in der Reihenschaltung

Die Teilspannungen in einer Reihenschaltung von  $R$ ,  $X_L$  und  $X_C$  sind zu dem sie hervorrufenden Strom und zueinander phasenverschoben. Deshalb sind sie geometrisch zu addieren.

Spannungen und  
Ströme

Berechnung der  
Teilspannungen

Für die Teilspannungen gilt

$$U_R = I R \quad \text{Wirkspannung,} \quad (6.19)$$

$$U_L = I X_L = I \omega L \quad \text{induktive Blindspannung,} \quad (6.20)$$

$$U_C = I X_C = I \frac{1}{\omega C} \quad \text{kapazitive Blindspannung.} \quad (6.21)$$

Gesamtspannung

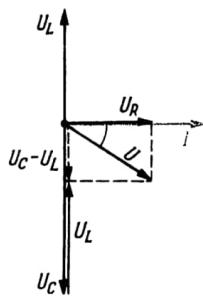


Bild 6.30

Zur Berechnung einer  
Reihenschaltung ( $U_C > U_L$ )

Mit Hilfe der geometrischen Addition ergibt sich die Gesamtspannung

$$\bullet U = \sqrt{U_R^2 + (U_C - U_L)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

daß  $U_C > U_L$ , d.h., wenn  $X_C > X_L$ , oder

$$\bullet U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

daß  $U_L > U_C$ , d.h., wenn  $X_L > X_C$ .

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_{bl}^2} \quad (6.22)$$

Zur Berechnung einer  
Reihenschaltung ( $U_L > U_C$ )

$U_{bl}$  resultierende Blindspannung.

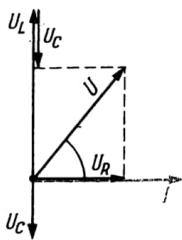


Bild 6.31

Zur Berechnung einer  
Reihenschaltung ( $U_L > U_C$ )

$$U = \sqrt{I^2 R^2 + (I X_L - I X_C)^2}$$

$$U = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (6.23)$$

Hinweis

In Reihenschaltungen von Wirk- und Blindwiderständen kann die Gesamtspannung durchaus kleiner sein als einzelne Teilspannungen. Das ist bei Berechnungen zu beachten.

Phasenverhältnisse

Phasenverschiebung

Je nach den in Reihenschaltungen verwendeten Bauelementen treten zwischen den Teilspannungen und dem Strom Phasenverschiebungen auf.

Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$

Die Größe dieser Phasenverschiebung kann als Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$  angegeben werden.

Es wird definiert:

Der Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$  zwischen zwei sinusförmigen Wechselgrößen gleicher Frequenz ist die Differenz ihrer Nullphasenwinkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$ .

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (6.24)$$

Folgende Fälle sind möglich:

$\varphi_1 > \varphi_2 \rightarrow \varphi > 0 \rightarrow$  Voreilen der Größe 1,

$\varphi_1 = \varphi_2 \rightarrow \varphi = 0 \rightarrow$  Phasengleichheit,

$\varphi_1 < \varphi_2 \rightarrow \varphi < 0 \rightarrow$  Nachheilen der Größe 1.

(Vgl. dazu Abschn. 6.2.1.1.)

Berechnung der Phasenverschiebung

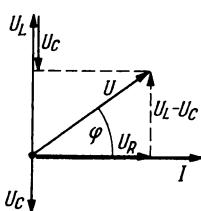


Bild 6.32. Zur Berechnung der Phasenverschiebung

Kann nach folgenden Beziehungen erfolgen:

$$\sin \varphi = \frac{U_L - U_C}{U} \quad \text{oder} \quad \sin \varphi = \frac{X_L - X_C}{\frac{U}{I}},$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} \quad \text{oder} \quad \cos \varphi = \frac{R}{\frac{U}{I}},$$

$$\tan \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} \quad \text{oder} \quad \tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

$$\left( \cot \varphi = \frac{U_R}{U_L - U_C} \right)$$

Tafel 6.3. Berechnungsgrundlagen für Sonderfälle von Wechselstromreihenschaltungen

R und $X_L$ in Reihe	$X_L$ und $X_C$ in Reihe	R und $X_C$ in Reihe
$X_C = 0 \Rightarrow U_C = 0$	$R = 0 \Rightarrow U_R = 0$	$X_L = 0 \Rightarrow U_L = 0$
$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$	$U = U_L - U_C$ $U = U_C - U_L$	$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$
$\frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$	$\frac{U}{I} = X_L - X_C$ $\frac{U}{I} = X_C - X_L$	$\frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$
$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{\frac{U}{I}}$	$\cos \varphi = 0$	$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{\frac{U}{I}}$

Grundtypen von Wechselstromreihenschaltungen

Nicht immer sind alle drei Grundbauelemente R, L und C in einer Reihenschaltung vorhanden.  
Folgende Grundkombinationen sind möglich:

Sonderfälle

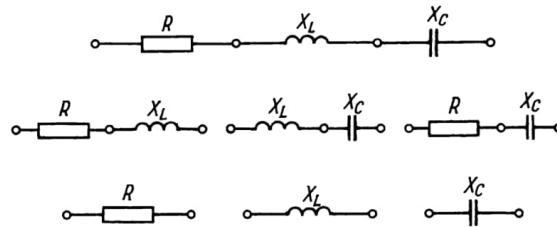


Bild 6.33. Varianten von Wechselstromreihenschaltungen

Erweitertes Ohmsches Gesetz

Aus Gl. (6.23) geht hervor, daß in Wechselstromreihenschaltungen ein Gesamtwiderstand definiert werden kann.

Es gilt

Scheinwiderstand Z (Impedanz)

$$\frac{U}{I} = Z \quad (6.25)$$

Der Quotient aus Gesamtspannung und Gesamtstrom in Wechselstromkreisen wird als Scheinwiderstand bezeichnet.

Das Ohmsche Gesetz wird damit auch auf die Zusammenschaltung von Wirk- und Blindwiderständen erweitert.

Scheinleitwert Y

Er wird definiert

$$\frac{I}{U} = Y \quad (6.26)$$

#### 6.2.1.2.2. Parallelschaltungen

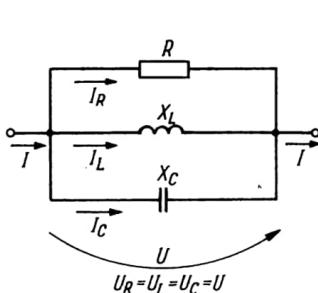


Bild 6.34  
Parallelschaltung von Wirkwiderstand, induktivem und kapazitivem Blindwiderstand

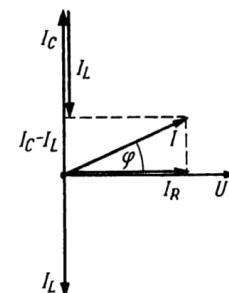


Bild 6.35  
Geometrische Addition der Teilströme in der Parallelschaltung

Die Teilströme in einer Parallelschaltung von  $R$ ,  $X_L$  und  $X_C$  sind zu der sie hervorruenden Spannung und zueinander phasenverschoben. Deshalb sind sie geometrisch zu addieren.

Ströme und Spannungen

### Berechnung der Teilströme

$$I_R = \frac{U}{R} \rightarrow I_R = U G$$

Wirkstrom, (6.27)

$$I_L = \frac{U}{X_L} \rightarrow I_L = U B_L$$

induktiver Blindstrom, (6.28)

$$I_C = \frac{U}{X_C} \rightarrow I_C = U B_C$$

kapazitiver Blindstrom. (6.29)

Gesamtstrom

Aus Bild 6.35 ist ableitbar

$$\oplus I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

$$\text{daß } I_C > I_L \rightarrow X_C < X_L \rightarrow B_C > B_L,$$

oder

$$\oplus I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \quad \text{für den Fall,}$$

$$\text{daß } I_L > I_C \rightarrow X_L < X_C \rightarrow B_L > B_C.$$

Für den Gesamtstrom gilt

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_{bl}^2}; \quad (6.30)$$

$I_{bl}$  resultierender Blindstrom.

$$I = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L} - \frac{U}{X_C}\right)^2},$$

$$I = U \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}, \quad (6.31)$$

$$I = U \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}. \quad (6.32)$$

Der Gesamtstrom einer Wechselstromparallelschaltung setzt sich aus der geometrischen Summe der Teilströme zusammen.

Hinweis

In Parallelschaltungen von Wirk- und Blindwiderständen kann der Gesamtstrom kleiner als einzelne Teilströme sein.

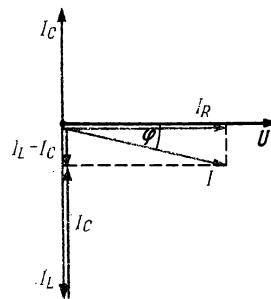


Bild 6.36  
Zur Berechnung der Phasenverschiebung

Berechnung der Phasenverschiebung

$$\sin \varphi = \frac{I_L - I_C}{I} \quad \text{oder} \quad \sin \varphi = \frac{B_L - B_C}{Y},$$

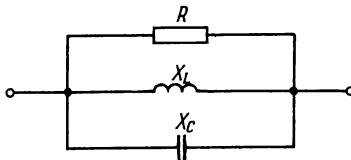
$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} \quad \text{oder} \quad \cos \varphi = \frac{G}{Y},$$

$$\tan \varphi = \frac{I_L - I_C}{I_R} \quad \text{oder} \quad \tan \varphi = \frac{B_L - B_C}{G}.$$

Tafel 6.4. Berechnungsgrundlagen für Wechselstromparallelschaltungen

R und $X_L$ parallel	$X_L$ und $X_C$ parallel	R und $X_C$ parallel
$X_C = \infty \Rightarrow B_C = 0 \Rightarrow I_C = 0$	$R = \infty \Rightarrow G = 0 \Rightarrow I_R = 0$	$X_L = \infty \Rightarrow B_L = 0 \Rightarrow I_L = 0$
$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$	$I = I_C - I_L$ $I = I_L - I_C$	$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$
$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$	$Y = B_C - B_L$ $Y = B_L - B_C$	$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$
$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{G}{Y}$	$\cos \varphi = 0$	$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{G}{Y}$

## Grundtypen von Wechselstrom-parallelenschaltungen



### Sonderfälle

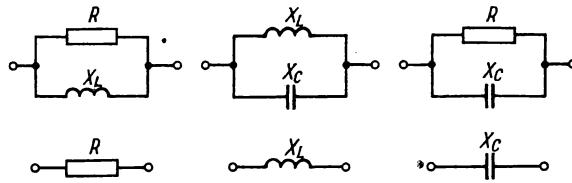


Bild 6.37. Varianten von Wechselstromparallelenschaltungen

### 6.2.1.3. Reale Widerstände, Spulen und Kondensatoren

#### Reale Wechselstrombauelemente

Technisch reale Wechselstrombauelemente zeigen neben den ihnen typischen Eigenschaften ohmscher Widerstand, Induktivität und Kapazität störende unerwünschte Nebeneigenschaften (vgl. dazu Abschnitte 4.7. und 5.8.5.).

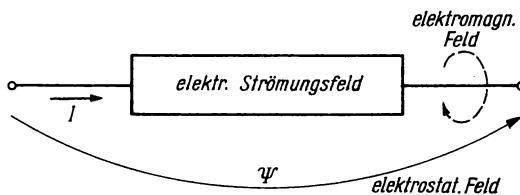


Bild 6.38. Verknüpfung der elektrotechnischen Felder

- |                    |  |                 |
|--------------------|--|-----------------|
| $I \rightarrow$    | Vorhandensein des Strömungsfeldes            | $\rightarrow R$ |
| $\Psi \rightarrow$ | Vorhandensein des elektrostatischen Feldes   | $\rightarrow C$ |
| $\Phi \rightarrow$ | Vorhandensein des elektromagnetischen Feldes | $\rightarrow L$ |

Aus Bild 6.38 kann ein vereinfachter Ersatzschaltplan eines passiven Zweipols angegeben werden (Bild 6.39).

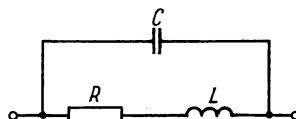


Bild 6.39  
Vereinfachter Ersatzschaltplan eines beliebigen passiven Zweipols

Die neben den gewünschten Eigenschaften auftretenden unerwünschten werden technisch vermindert oder können vernachlässigt werden (z. B. im NF-Bereich, in Gleichstromtechnik).

Skineffekt  
[skin (engl.)  
Haut, Deckfläche]

In den Abschnitten 5.3. und 5.8. wurde gezeigt, daß

- jeder stromdurchflossene Leiter von einem Magnetfeld umwirbelt wird,
- bei Flußänderungen Selbstinduktionsvorgänge auftreten.

Bei sehr schnellen Änderungen des Magnetflusses (z. B. bei Hochfrequenz) wird der Strom an die Oberfläche des Leiters verdrängt, weil im Inneren die Selbstinduktionsspannung höhere Werte erreicht als an der Oberfläche des Leiters. Diese Erscheinung wird als Skin-Effekt bezeichnet.

#### Hinweis

Verwendung von Hohlleitern in der Höchstfrequenztechnik.

Es wird definiert:

Der Widerstand, der den Skin-Effekt einschließt, ist ein Wirkwiderstand.

Es sind zu unterscheiden:

#### Reale Wirkwiderstände

- niederohmige Wirkwiderstände

Wegen der relativ geringen Spannungsabfälle gilt

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \ll R \\ \frac{1}{\omega C} \approx 0 \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \omega L \text{ und } \frac{1}{\omega C} \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

- hochohmige Wirkwiderstände

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \ll \frac{1}{\omega C} \\ \omega L \ll R \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \omega L \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

#### Reale induktive Blindwiderstände

- geringe Induktivitäten (eisenlose Spulen)

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \gg R \\ \frac{1}{\omega C} \approx 0 \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} R \text{ und } \frac{1}{\omega C} \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

- große Induktivitäten (Eisendrosselspulen)

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \gg R \\ \frac{1}{\omega C} \approx 0 \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} R \text{ und } \frac{1}{\omega C} \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

#### Spulengüte

Für reale Spulen wird die Spulengüte angegeben:

$$\tan \delta_L = \frac{R}{\omega L}. \quad (6.33)$$

#### Reale kapazitive Blindwiderstände

- geringe Kapazität

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \ll R \\ \frac{1}{\omega C} \gg R \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} R \text{ und } \omega L \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

- große Kapazität

$$\left. \begin{array}{l} \omega L \approx 0 \\ \frac{1}{\omega C} \gg R \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} R \text{ und } \omega L \\ \text{vernachlässigbar im NF-Bereich.} \end{array}$$

#### Verlustfaktor

Für reale Kondensatoren wird der Verlustfaktor definiert:

$$\tan \delta_C = \frac{1}{R \omega C}. \quad (6.34)$$

Reale Grundbauelemente des Wechselstromkreises sind stets verlustbehaftet. Das elektrische Verhalten realer Bauelemente lässt sich durch eine Schaltkombination idealer Grundbauelemente beschreiben.

### 6.2.2. Leistung und Energie in Wechselstromkreisen

Die umgesetzte Leistung in einem Wechselstromkreis ist aus der Spannung und dem Strom definierbar:

Leistungsarten im Wechselstromkreis

**Wirkleistung**

Formelzeichen  $P$

Physikalischer Zusammenhang  $P = U_R I = I_R U$

(6.35)

Einheit  $[P] = 1 \text{ W}$

Wirkleistung ist diejenige Leistung des Generators, die tatsächlich an den Betriebsmitteln nutzbar wird (z.B. Wärme, mechanische Leistung).

**Blindleistung**

Formelzeichen  $Q$

Physikalischer Zusammenhang  $Q = U_{bl} I = I_{bl} U$

(6.36)

Einheit  $, \text{Var (Volt-Ampere - reaktiv)}$   
 $[Q] = 1 \text{ var}$

Blindleistung ist die für den Aufbau elektromagnetischer und elektrostatischer Felder benötigte Leistung.

**Scheinleistung**

Formelzeichen  $S$

Physikalischer Zusammenhang  $S = U I = I U$

(6.37)

Einheit  $[S] = 1 \text{ V A}$

$$S^2 = P^2 + (Q_L - Q_C)^2$$

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \quad (6.38)$$

Weiterhin kann definiert werden:

**Leistungsfaktor**

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (6.39)$$

**Blindfaktor**

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S} \quad (6.40)$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (6.41)$$

Energieumsatz im Wechselstromkreis

Wirkarbeit

$$W_W = U I t \cos \varphi$$

(6.42)

Blindarbeit

$$W_{bl} = U I t \sin \varphi$$

(6.43)

Scheinarbeit

$$W_s = U I t$$

(6.44)

Hinweis

In Wechselstromkreisen ist es von hoher volkswirtschaftlicher Bedeutung, den Anteil der Wirkarbeit an der Scheinarbeit wesentlich zu erhöhen.

Wirkleistung

$$P = U I \cos \varphi$$

(6.45)

Blindleistung

$$Q = U I \sin \varphi$$

(6.46)

Scheinleistung

$$S = U I$$

(6.47)

### 6.2.3. Elektrische Schwingkreise

Begriffsbestimmung  
„elektrischer  
Schwingkreis“

Verknüpfung von Wechselstromwiderständen, die eine ständige Energiependelung von Blindenergie des elektromagnetischen und elektrostatischen Feldes nach ein- oder mehrmaliger Zufuhr von Energie garantiert.

Derartige Schaltungen sind LC-Schwingkreise.

Wird ein Schwingkreis mit seiner Eigenfrequenz erregt (bauelemente-abhängig), treten große Amplituden von Spannung oder Stromstärke auf. Man spricht in diesem Fall von Resonanz.

#### 6.2.3.1. Reihenschwingkreise

Resonanzfall und  
Resonanzbedingung

Bei Resonanzfrequenz gilt

$$U_L = U_C ;$$

$$I X_L = I X_C ,$$

$$I \omega_r L = I \frac{1}{\omega_r C} ,$$

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} ,$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{LC} ,$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} ,$$

Thomsonsche  
Schwingungs-  
gleichung  
[Sir William Thom-  
son (1892 Lord Kel-  
vin), 1824-1907,  
englischer Physiker]

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

(6.48)

Resonanzfrequenz

Frequenz, bei der induktiver und kapazitiver Blindwiderstand gleich groß sind.

Nur in diesem Fall kann eine Energiependelung zwischen den Blind- schaltelementen stattfinden.

Die Größe der Resonanzfrequenz des Kreises ist von den Bemessungs- größen von Spule und Kondensator abhängig.

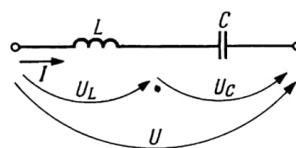


Bild 6.40  
Ideal Reihenresonanzkreis

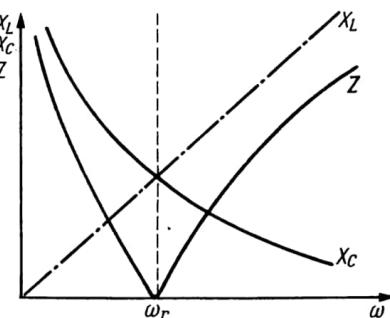


Bild 6.41  
Widerstandsverläufe im idealen  
Reihenresonanzkreis

Idealer Reihen-  
schwingkreis

Ein idealer Reihenschwingkreis benötigt zu seinem Betrieb keine Energie, denn

$$Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2},$$

$$Z = X_L - X_C.$$

Wegen  $X_L = X_C$  gilt bei Resonanz

$$\begin{array}{ccccccc} Z & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & U & \longrightarrow & 0 \\ & & & & \longrightarrow & I & \longrightarrow \infty \end{array}$$

Ein idealer Reihenresonanzkreis wirkt stromüberhörend. Man spricht von einem **Saugkreis**.

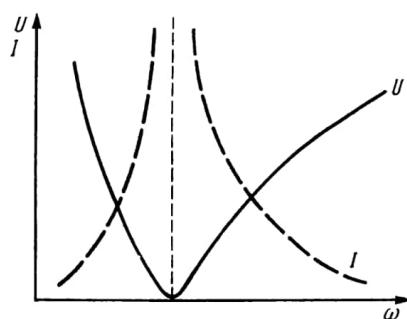


Bild 6.42  
Strom- und Spannungsverlauf beim  
ideal Reihenresonanzkreis

## Realer Reihenschwingkreis

In der Praxis sind alle Reihenschwingkreise verlustbehaftet, z.B. durch den Wirkwiderstand von Spulen, durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle.

Damit ergeben sich folgende Beziehungen:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Wegen  $X_L = X_C$  bei Resonanzfrequenz gilt

$$Z = \sqrt{R^2 + (0)}$$

$$Z = R$$

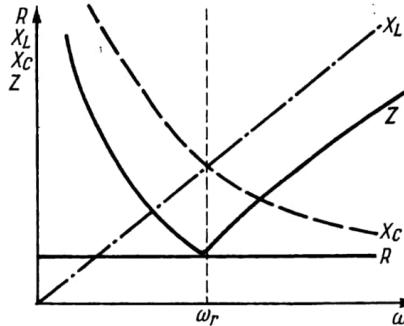


Bild 6.43  
Widerstandsverläufe im realen Reihenschwingkreis

## Verhalten bei Resonanz

Ein realer Reihenresonanzkreis verhält sich bei der Resonanzfrequenz wie ein Wirkwiderstand.

Damit fließt in den Zuleitungen des Kreises nur Wirkstrom, der von der Größe des Wirkwiderstandes abhängt.

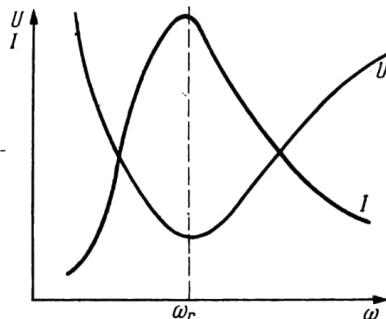


Bild 6.44  
Strom- und Spannungsverlauf beim realen Reihenresonanzkreis

## Kenngrößen von Reihenresonanzkreisen

In der Hochfrequenztechnik kommt es auf ausgeprägte Resonanzeigenschaften an.

### Kreisgüte

Formelzeichen

Q

Physikalischer Zusammenhang

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U}$$

(6.49)

$$Q = \frac{I X_L}{I Z} = \frac{I X_C}{I Z}$$

Bei Resonanz gilt  $Z = R$ ,

$$\varrho = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r C R}.$$

Mit Gl. (6.48) ergibt sich

$$\varrho = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6.50)$$

Die Kreisgüte wird um so besser, je geringer der Wirkwiderstand des Kreises, je größer die Kreisinduktivität und je kleiner die Kapazität des Resonanzkreises ist.

Dämpfung

Formelzeichen

d

Physikalischer Zusammenhang

$$d = \frac{1}{\varrho}$$

(6.51)

$$d = R \sqrt{\frac{1}{\frac{L}{C}}}; \quad d = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Die Dämpfung von Reihenresonanzkreisen wird geringer, wenn

- der Wirkwiderstand kleiner,
- die Kreiskapazität geringer,
- die Kreisinduktivität größer wird.

### 6.2.3.2. Parallelschwingkreise

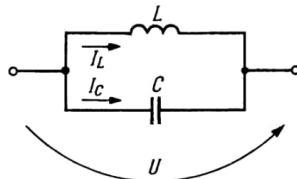


Bild 6.45  
Ideal Parallelresonanzkreis

Resonanzfall und Resonanzbedingung

Bei Resonanzfrequenz gilt

$$I_L = I_C.$$

Thomson'sche Schwingungsgleichung

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (6.52)$$

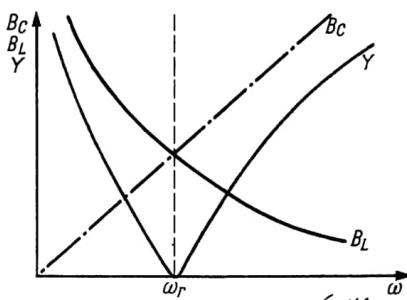


Bild 6.46  
Leitwertverläufe im idealen Parallelresonanzkreis

### Idealer Parallel-schwingkreis

Ein idealer Parallelenschwingkreis benötigt zu seinem Betrieb keine Energie, denn

$$Y = \sqrt{(B_L - B_C)^2},$$

$$Y = B_L - B_C.$$

Da  $B_L = B_C$ , ist  $Y$  bei Resonanz Null.

$$\begin{aligned} Y &\rightarrow 0 \rightarrow Z \rightarrow \infty \rightarrow I \rightarrow 0 \\ &\rightarrow U \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Ein idealer Parallelresonanzkreis wirkt stark stromvermindernd. Dieses Verhalten kennzeichnet einen **Sperrkreis**.

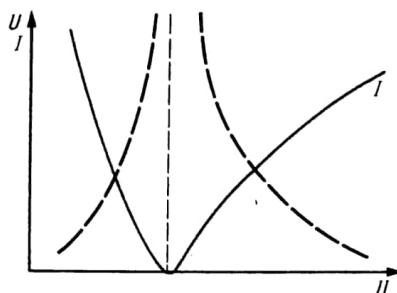


Bild 6.47  
Strom- und Spannungsverlauf  
beim idealen Parallelresonanz-  
kreis

### Realer Parallel-schwingkreis

In der Praxis sind alle Parallelenschwingkreise verlustbehaftet.

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

Mit  $B_L = B_C$  bei Resonanzfrequenz gilt

$$Y = G.$$

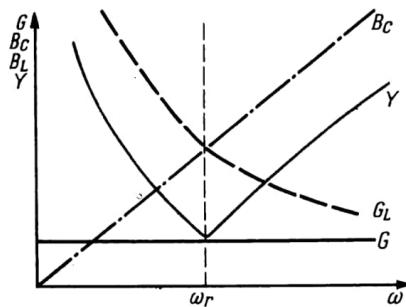


Bild 6.48  
Leitwertverläufe im realen  
Parallelenschwingkreis

### Verhalten bei Resonanz

Ein realer Parallelresonanzkreis verhält sich bei der Resonanzfrequenz wie ein Wirkleitwert.

Auf den Zuleitungen zum Schwingkreis fließt nur Wirkstrom, der von der Größe des Wirkwiderstandes abhängig ist.

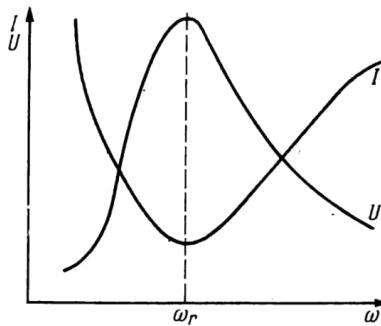


Bild 6.49  
Strom- und Spannungsverlauf beim  
realen Parallelresonanzkreis

Kenngrößen von  
Parallel-  
resonanzkreisen

Kreisgüte

$$Q = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I} \quad (6.53)$$

$$Q = \frac{U_B L}{U Y} = \frac{U_B C}{U Y}$$

Bei Resonanz ergibt sich  $Y = G$ ,

$$Q = \frac{R}{\omega_r L} = \omega_r C R .$$

Damit entsteht

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} . \quad (6.54)$$

Dämpfung

Die Dämpfung des Schwingkreises ergibt sich mit

$$d = \frac{1}{Q} \quad [\text{Gl.}(6.51)] \quad \text{zu}$$

$$d = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} . \quad (6.55)$$

Ein Parallelschwingkreis wird nur gering bedämpft, wenn der Wirkwiderstand des Kreises sehr hoch ist.

### 6.2.3.3. Einfluß des Generatorinnenswiderstandes auf die Eigenschaften elektrischer Schwingkreise

In den bisherigen Ausführungen wurden im wesentlichen die schwingfähigen Schaltungen untersucht, nicht aber die speisenden Generatoren.

Aus den Abschnitten 3.5.1. und 3.5.2. ist bekannt, daß jede Spannungs- oder Stromquelle einen inneren Widerstand  $R_i$  aufweist. Der Schwingkreis übernimmt die Aufgabe des Außen- oder Arbeitswiderstandes  $R_a$ .

## Niederohmige Speisung von Reihenschwingkreisen

Reihenschwingkreise haben bei Resonanzfrequenz einen sehr geringen Widerstand, d. h. hoher Stromfluß an der Resonanzstelle (Annäherung an den Kurzschlußfall).

Daraus ergibt sich, daß, wenn der Reihenschwingkreis eine gewünschte Stromüberhöhung erreichen soll, die Speisespannung konstant sein muß. Deshalb kann nur eine Konstantspannungsquelle mit sehr geringem Innenwiderstand den Schwingkreis speisen.

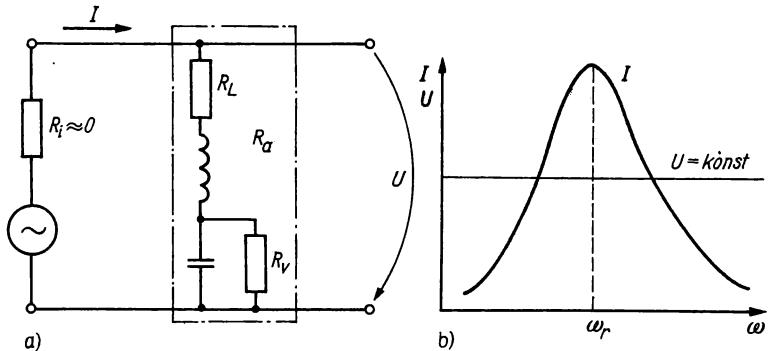


Bild 6.50. Reihenschwingkreis bei niederohmiger Speisung  
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Reihenschwingkreises  
b) Strom- und Spannungsverlauf

## Hochohmige Speisung von Reihenschwingkreisen

Wird ein Schwingkreis von einer hochohmigen Stromquelle mit konstantem Strom gespeist, bricht an der Resonanzstelle die Spannung über dem Schwingkreis zusammen. Dieser Effekt ist erwünscht, wenn bestimmte Frequenzen unterdrückt werden sollen (z. B. die „9-kHz-Sperre“ für eng benachbarte Sendestationen bei AM-Empfang).

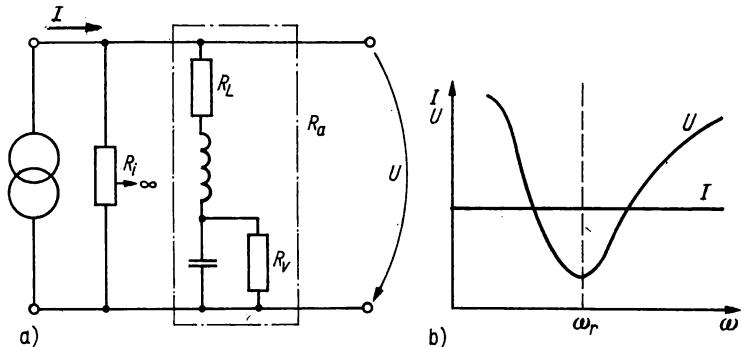


Bild 6.51. Reihenschwingkreis bei hochohmiger Speisung  
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Reihenschwingkreises  
b) Strom- und Spannungsverlauf

## Hochohmige Speisung von Parallelschwingkreisen

Parallelschwingkreise haben bei Resonanzfrequenz einen sehr hohen Widerstand. An der Resonanzstelle tritt eine Spannungsüberhöhung auf (Annäherung an den Leerlauffall), wenn der Kreis mit einem konstanten Strom gespeist wird, den ein hochohmiger Generator liefert.

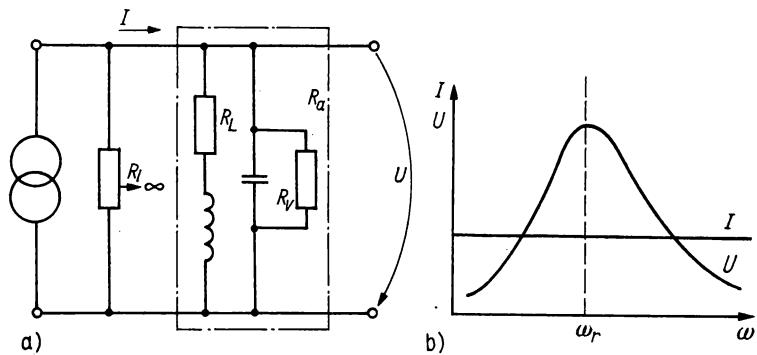


Bild 6.52. Parallelschwingkreis bei hochohmiger Speisung  
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Parallelschwingkreises  
b) Strom- und Spannungsverlauf

### Niederohmige Speisung von Parallelschwingkreisen

Wird ein Parallelschwingkreis aus einer Spannungsquelle mit geringem Innenwiderstand gespeist, ist der Strom an der Resonanzquelle sehr gering. Dieser Effekt wird technisch genutzt bei der Phasenkompenstation in der Leistungselektrotechnik (vgl. Abschnitt 6.2.3.4.).

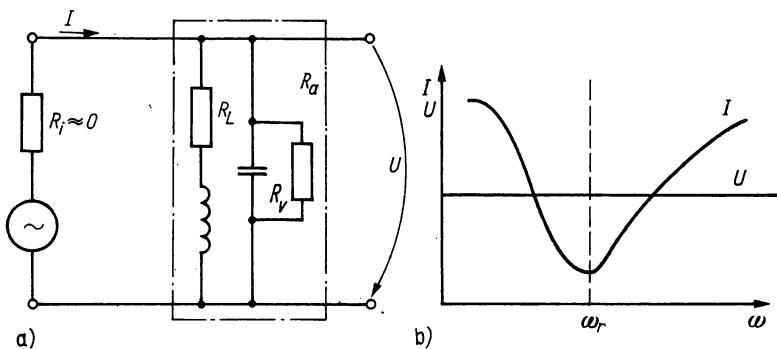


Bild 6.53. Parallelschwingkreis bei niederohmiger Speisung  
a) Schaltung des realen (verlustbehafteten) Parallelschwingkreises  
b) Strom- und Spannungsverlauf

### Praxisgerechte Bemessung von Schwingkreisschaltungen

In der Praxis kann mit etwa-Richtwerten gearbeitet werden, weil sich Quellen mit unendlich kleinem bzw. mit unendlich großem Innenwiderstand technisch nicht realisieren lassen.

Es gilt:

$$\text{hochohmige Speisung} \quad \frac{R_i}{R_a} \approx \frac{10 \dots 20}{1}$$

$$\text{niederohmige Speisung} \quad \frac{R_i}{R_a} \approx \frac{1}{10 \dots 20}$$

Bei der Berechnung von Schwingkreisen muß also der Einfluß des Quelleninnenwiderstandes auf die Dämpfung und die Kreisgüte berücksichtigt werden (vgl. Abschnitte 6.2.3.1. und 6.2.3.2.).

#### 6.2.3.4. Kompensation von Blindleistungen

Induktive Betriebsmittel (Motoren, Transformatoren, Drosseln) und kapazitive Betriebsmittel belasten mit ihrem Blindstrom die Netze erheblich, ohne daß nach außen wirksame Energie umgesetzt wird.

Tafel 6.5. Technische Richtwerte für Größenordnungen des Leistungsfaktors

Ausgewählte Betriebsmittel	Leistungsfaktor $\cos \varphi$
Leerlaufende Transformatoren	0,1 ... 0,4
Leerlaufende Ws-Motoren	0,3 ... 0,6
Gasentladungsstrahler mit Vorschalttrosseln (unkompensiert)	0,5
Einphasen-Ws-Motoren (belastet)	0,65
Drehstrommotoren (belastet)	0,8 ... 0,99
Transformatoren (belastet)	0,85 ... 0,99
Halbleiterbeschleuniger	0,5 ... 0,7
Glühlampen und Elektrowärmegeräte mit Widerstandserwärmung	1

Aus den in der Tafel 6.5 zusammengestellten technischen Richtwerten wird ersichtlich, daß volkswirtschaftlich die Notwendigkeit besteht, Maßnahmen zur Verbesserung des Leistungsfaktors durchzuführen. Die erforderliche Blindleistung zum Aufbau elektromagnetischer Felder (besonders der erstgenannten Betriebsmittelgruppe) bedeutet:

- Verschlechterung des Leistungsfaktors,
- Verlegung größerer Leiterquerschnitte,
- schlechte Auslastung der elektrischen Anlagen.

#### Hinweis

In der Volkswirtschaft als Hauptanwender von Elektroenergie treten vorwiegend induktive Blindleistungen (induktive Betriebsmittel) auf.

Induktiver Blindstrom kann durch kapazitiven Blindstrom kompensiert (ausgeglichen) werden.

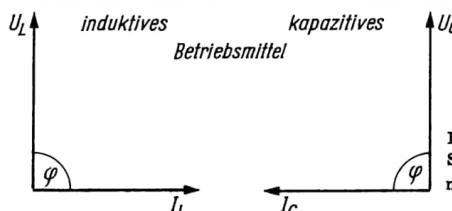


Bild 6.54. Phasenlage zwischen Strom und Spannung bei Betriebsmitteln mit Blindenergie

#### Prinzip der Phasenkompensation

In Industrieanlagen muß die vorhandene induktive Blindleistung direkt am Entstehungsort kompensiert werden (z.B. am Betriebsmittel selbst, am Werkhallennetz, am gesamten Betriebsnetz).

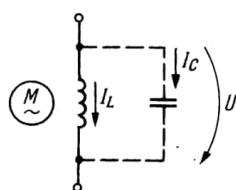


Bild 6.55  
Phasenkompensation am Entstehungsort

## Kompensationsarten

- Einzelkompensation  
Das einzelne Betriebsmittel mit Blindleistung wird kompensiert (z.B. Einzelantriebe).
- Gruppenkompensation  
Mehrere Betriebsmittel mit Blindleistung werden gemeinsam kompensiert (z.B. Werkhallen).
- Zentralkompensation  
Das gesamte Betriebsnetz wird kompensiert.

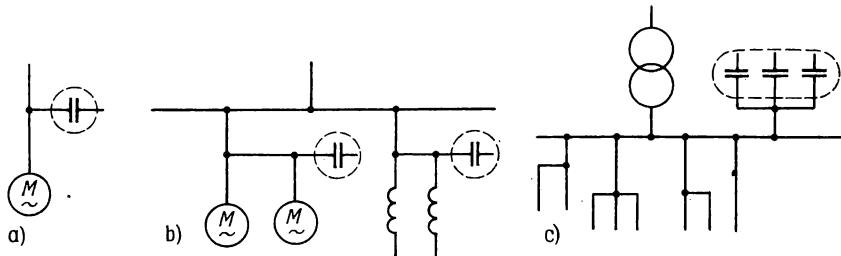


Bild 6.56. Arten der Kompensation induktiver Blindleistung  
a) Einzelkompensation; b) Gruppenkompensation; c) Zentralkompensation

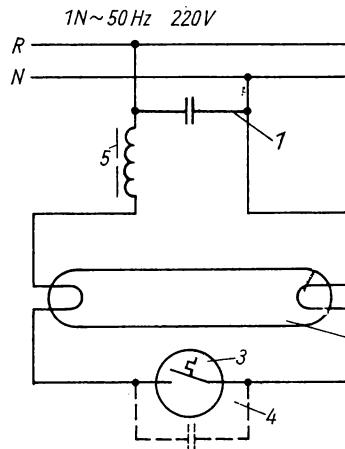
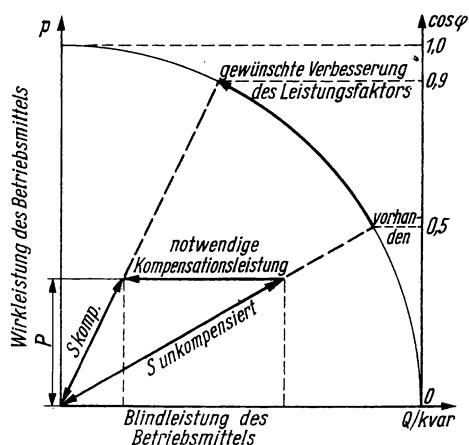


Bild 6.57  
Beispiel einer Einzelkompensation  
(Niederspannungs-Leuchtstofflampe)  
1 Kompensationskondensator; 2 Leuchtstofflampe; 3 Starter; 4 Entstörkondensator; 5 Vorschaltgerät (Drossel)

Methoden zur Ermittlung der notwendigen Kompensationsblindleistung

## Grafische Ermittlung

Bild 6.58. Ermittlung der Kompensationsleistung mit dem  $\cos\varphi$ -Kreis



## Rechnerische Ermittlung

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{\left(\frac{P}{\cos \varphi}\right)^2 - P^2}$$

Die vorhandene Blindleistung muß auf zulässige Werte reduziert werden.

$$Q_{\text{Kompensation}} = Q_{\text{vorhanden}} - Q_{\text{zulässig}}$$

notwendige Kompensationsblindleistung

$$Q_{\text{komp}} = \sqrt{\left(\frac{P}{\cos \varphi}\right)_{\text{vorh}}^2 - P^2} - \sqrt{\left(\frac{P}{\cos \varphi}\right)_{\text{gewünscht}}^2 - P^2} \quad (6.56)$$

Bestimmung der Kompensationskapazität

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \omega C = U^2 2\pi f C$$

$$C_{\text{notwendig}} = \frac{Q_C}{2\pi f U} \quad (6.57)$$

Bei der Berechnung von Kompensationsblindleistungen ist natürlich auch entsprechend den mathematischen Beziehungen für die Parallelschaltung von L und C die Gleichung

$$Q_C = P(\tan \varphi_{\text{vorhanden}} - \tan \varphi_{\text{gewünscht}})$$

anwendbar.

Gesetzlich vorgeschriebener Leistungsfaktor

$$\cos \varphi = 0,950$$

Für die Bemessung der Kompensationsanlagen bestehen zwei grundsätzliche Ausgangspositionen:

- höhere Wirkleistungsübertragung bei konstanter Scheinleistung,
- verringelter Scheinleistungsbedarf bei konstanter Wirkleistung.

### Hinweis

In der volkswirtschaftlichen Praxis werden Leistungsfaktoren in der Größenordnung  $0,85 \leq \cos \varphi \leq 0,95$  erreicht, wenn die Anlagen richtig kompensiert werden.

Ein sehr guter Leistungsfaktor bringt einen hohen ökonomischen Nutzen:

- volle Auslastung von Netzen und Anlagen,
- Entlastung der Leitungen,
- Verringerung der Verluste,
- Materialeinsparung,
- Kostenreduzierung,
- Erhaltung von Energie.

## 6.2.4. Zusammenschaltung von Wechselspannungsquellen

Wie alle aktiven Zweipole können Wechselspannungsquellen zusammengeschaltet werden.

- Reihenschaltungen mit dem Ziel, höhere Spannungen als die einer Spannungsquelle zu erreichen oder Spannungen zu mischen, um bestimmte Spannungsformen zu erzielen.
- Parallelschaltungen mit dem Ziel, höhere Stromstärken, als eine Spannungsquelle zu erbringen vermag, zu erreichen.

Bestimmungsgrößen

- Scheitelpunkt  $\hat{E}$
- Frequenz
- Phasenlage

Grundschaltungen

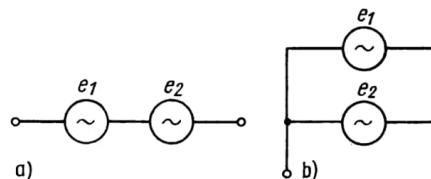


Bild 6.59  
Zusammenschaltung von  
Wechselspannungsquellen  
a) Reihenschaltung  
b) Parallelschaltung

Reihenschaltung

Für die Einzelurspannung(en) gilt

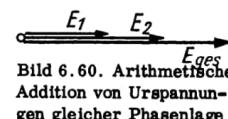
$$e_{1,2} = \hat{E}_{1,2} \sin(\omega t_{1,2} + \varphi_{1,2}).$$

Damit können für gleiche Frequenzen von in Reihe zu schaltenden Urspannungsquellen drei Grundfälle angegeben werden:

gleiche Phasenlage

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\omega_1 = \omega_2$$



ungleiche Phasenlage

$$\varphi_1 \neq \varphi_2$$

$$\omega_1 = \omega_2$$

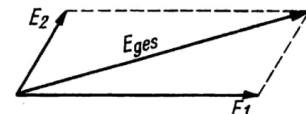


Bild 6.61  
Geometrische Addition von Urspannungen ungleicher Phasenlage

unterschiedliche  
Frequenz

$$\omega_1 \neq \omega_2$$

Dabei sind folgende Fälle von Bedeutung:

$$\omega_1 \ll \omega_2,$$

$$\omega_1 \approx \omega_2,$$

$$\omega_1 = n \omega_2 \text{ (für } n = 2, 3, 4, \dots, k).$$

### Überlagerung

$$\omega_1 \ll \omega_2$$

Sind die Frequenzen von in Reihe geschalteten Wechselspannungsquellen stark unterschiedlich, entstehen Überlagerungen (in Hochfrequenztechnik von Bedeutung).

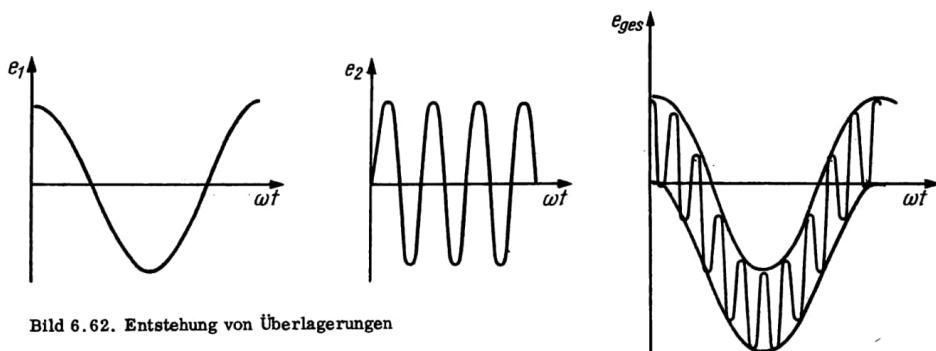


Bild 6.62. Entstehung von Überlagerungen

### Schwebung

$$\omega_1 \approx \omega_2$$

Sind die Frequenzen von in Reihe geschalteten Wechselspannungsquellen etwa gleich groß, entstehen Schwebungen.

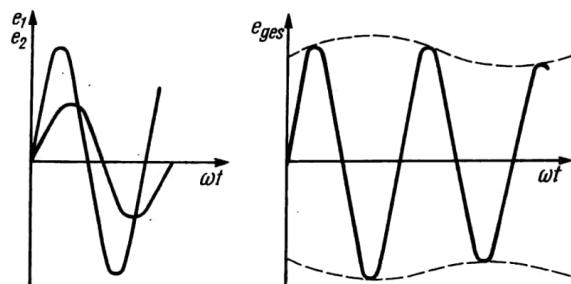


Bild 6.63. Entstehung von Schwebungen

Dabei treten Spannungsüberhöhungen auf. Diese Fälle sind besonders in Netzen mit technischem Wechselstrom (50 Hz, 16 2/3 Hz) gefährlich.

$$\omega_1 = n \omega_2$$

- Treten bei Reihenschaltungen von Wechselspannungsquellen bei einer Spannungsquelle ganzzahlige Vielfache der Frequenz der anderen Spannungsquelle auf, entstehen nichtsinusförmige Schwingungen.

Beispiele: Eisendrosseln, Gleichrichterbauelemente

#### Parallelschaltung

Es ist zu beachten, daß schon bei geringen Abweichungen der Urspannungswerte große Ausgleichsströme fließen können. Deshalb müssen bei Parallelschaltungen von Wechselspannungsquellen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- gleiche Urspannungen (Verhinderung von Ausgleichsströmen),
- gleiche Strombelastbarkeit (Verhinderung der Überlastung einer Spannungsquelle),
- gleiche Phasenlage (Verhinderung von Ausgleichsströmen).

Beispiele: Parallelschaltungen der Sekundärwicklungen von Transformatoren oder von Wechselspannungsgeneratoren in Kraftwerken.

### 6.3. Mehrphasige Wechselspannungen und Wechselströme

Die Nutzung sinusförmiger Wechselspannungen erbringt eine Reihe von technischen und ökonomischen Vorteilen. Die Erzeugung sinusförmiger Wechselspannungen in rotierenden Einphasengeneratoren hat jedoch den Nachteil, daß nicht der gesamte zur Verfügung stehende Wickelraum voll genutzt werden kann.

Deshalb wurden ab etwa 1850 technische Lösungen erarbeitet, die mehrere getrennte Erzeugerwicklungen mit einem gemeinsamen Erregerkreis zum Mehrphasen generator vereinen.

#### 6.3.1. Erzeugung mehrphasiger Wechselspannungen

##### Zweiphasen- wechselspannung

Zwei Spulen (bzw. vier Halbspulen) werden räumlich um  $90^\circ$  versetzt auf dem Umfang eines gemeinsamen Ständereisenkreises angeordnet.

Mit Hilfe eines rotierenden Elektromagneten (Polrad) werden in diesen Wicklungen zeitlich um  $90^\circ$  phasenverschobene Urspannungen gleicher Amplitude und gleicher Frequenz induziert.

Diese können direkt an den Wicklungen abgenommen werden.

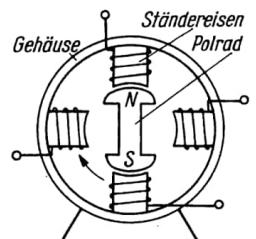


Bild 6.64  
Prinzip des Zweiphasenwechselspannungsgenerators

Für die erzeugten Urspannungen gilt

$$e_1 = \hat{E}_1 \sin \omega t,$$

$$e_2 = \hat{E}_2 \sin (\omega t - 90^\circ).$$

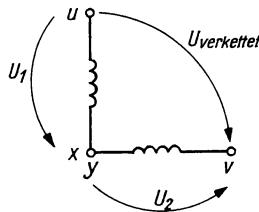


Bild 6.65  
Prinzip der Verkettung im Zweiphasenwechselspannungsgenerator

Durch Zusammenschaltung der Einzelspannungen entsteht eine Gesamtspannung.

Es gilt

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2},$$

$$U = \sqrt{2} U_1,$$

$$U = \sqrt{2} U_1.$$

Zweiphasenwechselspannungen haben heute kaum noch technische Bedeutung (veraltete Ortsnetze).

Die Gesetzmäßigkeiten der Verknüpfung zweier phasenverschobener Wechselspannungen sind jedoch für die Meßtechnik und in der Niederfrequenztechnik von Bedeutung.

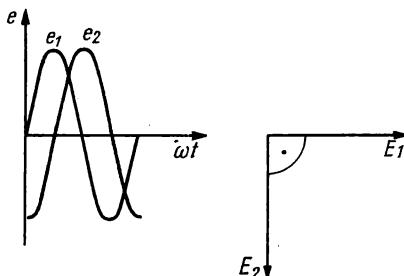


Bild 6.66  
Zweiphasenwechselspannung

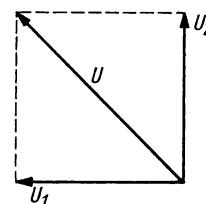


Bild 6.67. Verkettung von Spannungen

Dreiphasen-  
wechselspannung  
(„Drehstrom-  
spannung“)

Werden in einem Wechselspannungsgenerator drei Spulen räumlich um  $120^\circ$  verschoben über den Umfang eines gemeinsamen Ständerkreises verteilt, so induziert ein rotierender (Elektro-)Magnet in den Spulen drei jeweils zeitlich um  $120^\circ$  verschobene Urspannungen.

Dieses Prinzip wurde 1885 erstmalig von Ferraris angegeben.  
(Galileo Ferraris, 1847-1897, italienischer Physiker und Elektrotechniker)

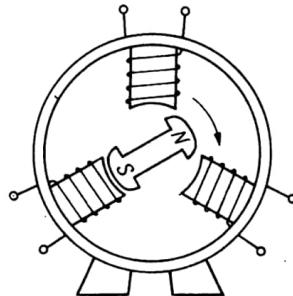


Bild 6.68  
Prinzip des Dreiphasenwechselspannungs-generators

Für die erzeugten Urspannungen gilt

$$e_1 = \hat{E}_1 \sin \omega t,$$

$$e_2 = \hat{E}_2 \sin (\omega t - 120^\circ),$$

$$e_3 = \hat{E}_3 \sin (\omega t - 240^\circ).$$

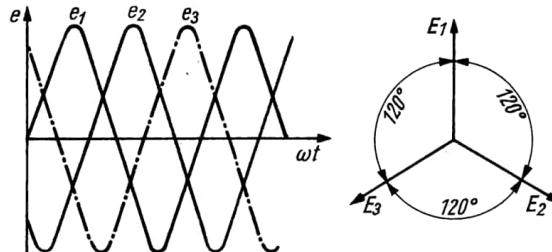


Bild 6.69. Dreiphasenwechselspannung

Die Summe der Spannungen im Dreiphasensystem ist in jedem Augenblick gleich Null.

Offenes  
Dreiphasensystem

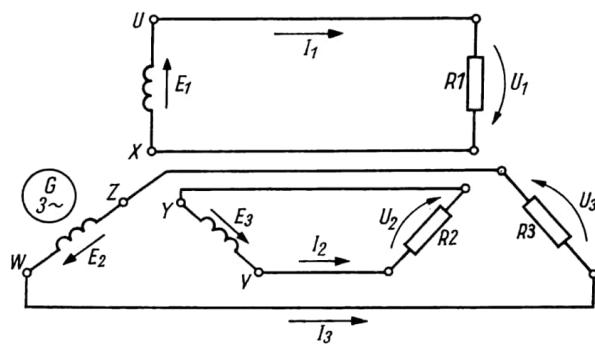


Bild 6.70. Offenes Dreiphasensystem

Beim offenen Dreiphasensystem sind an jeder Wicklung des Generators je ein oder mehrere Betriebsmittel angeschlossen.

Nachteile offener Dreiphasensysteme

Bei Übertragung der Spannungen über große Entfernungen bedeutet das

- sechs Leitungen (Hin- und Rückleiter),
- hoher Materialaufwand,
- hohe Kosten.

### 6.3.2. Verkettung mehrphasiger Wechselspannungen

Verkettung von Gleichspannungen (vgl. Abschn. 3.3.2.2.)

Unter Verkettung von Spannungsquellen versteht man deren Zusammenschaltung.

Gleichsinnige Zusammenschaltung

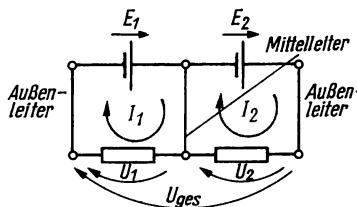


Bild 6.71  
Gleichsinnige Zusammenschaltung von Gleichspannungsquellen (Gleichstrom-Dreileiter-System)

$$\begin{aligned} \text{Mittelleiterstrom} \quad I_M &= I_1 - I_2 \\ E_{\text{ges}} &= E_1 + E_2 \end{aligned}$$

Vorteile: insgesamt drei Spannungen abnehmbar; zwei Spannungen unterschiedlicher Größe.

Gegensinnige Zusammenschaltung

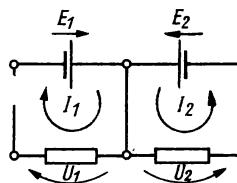


Bild 6.72  
Gegensinnige Zusammenschaltung von Gleichspannungsquellen

$$\begin{aligned} \text{Mittelleiterstrom} \quad I_M &= I_1 + I_2 \\ E_{\text{ges}} &= E_1 - E_2 \end{aligned}$$

Verkettung von Dreiphasen-wechselspannungen

Zusammenschaltungen von Wechselspannungsquellen sind ebenfalls möglich.

Dabei gelten gleiche mathematische und physikalische Zusammenhänge.

Sternschaltung

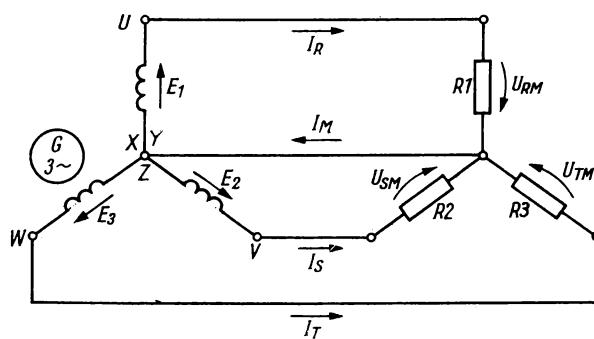


Bild 6.73. Drehstrom-Sternschaltung

## Begriffe für verkettete Spannungssysteme

Bei der Sternschaltung werden die Spulenenden X, Y, Z des Generators zusammengeschaltet und als Mittelleiter zum gemeinsamen Mittelpunkt der Betriebsmittel geführt. Die Außenleiter R, S, T werden von den Spulenanfängen abgenommen.

Außen- oder Hauptleiter (stromführende Leiter) sind Leiter, die nicht vom Mittel- oder Sternpunkt abgehen.

Mittelleiter (bedingt stromführende Leiter) sind Leiter, die vom Mittel- oder Sternpunkt abgehen.

- Sternpunktleiter
- neutraler Leiter (andere Bezeichnungen für einen Mittelleiter)
- Nulleiter (N) (unmittelbar am Sternpunkt geerdeter Mittelleiter bei der Schutzmaßnahme Nullung)

### Verkettete Spannung

Spannung zwischen den Außenleitern eines verketteten Spannungssystems (Außenleiterspannung)

- Dreieckspannung (da hier kein Mittelleiter vorhanden)

### Sternspannung

Spannung über einer Wicklung (Strang); Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt

- in Sonderfällen Außenleiter - Erde - Spannung

Für die Ströme gelten:

### Außenleiterstrom

Strom auf Außen- oder Hauptleitern

### Verketteter Strom

Strom bei Dreieckschaltungen

## Berechnung von Sternschaltungen

Für die Sternschaltung gilt in jedem Augenblick (Bild 6.74), z. B. bei

$$\frac{\pi}{2} \leqq 90^\circ, \quad \hat{u}_1 = \hat{U}_1, \quad \hat{u}_2 = -\frac{\hat{U}_1}{2}, \quad \hat{u}_3 = -\frac{\hat{U}_1}{2},$$

$$\Sigma u = \hat{U}_1 + \left( -\frac{\hat{U}_1}{2} \right) + \left( -\frac{\hat{U}_1}{2} \right),$$

$$\Sigma u = 0.$$

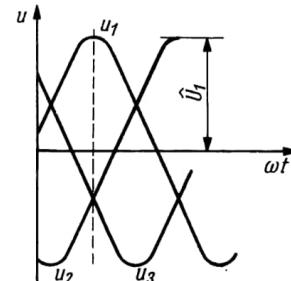


Bild 6.74  
Spannungsverläufe im Dreiphasensystem

## Ströme in Sternschaltungen

In der Sternschaltung fließt in jedem Außenleiter der Leiterstrom.

### Leiterstrom

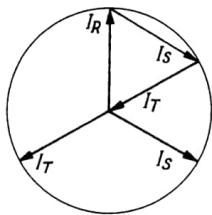
Der Außenleiter oder Hauptleiterstrom in Sternschaltung ist gleich dem Strom in den Generatorwicklungen.

$$I_L = I_A$$

(6.58)

Mittelleiterstrom

Symmetrische Belastung des Sternsystems



Unsymmetrische Belastung

Für den Strom im Mittelleiter ist zu unterscheiden

$$I_R = I_S = I_T$$

Durch Summenbildung entsteht

$$I_R + I_S + I_T = I_M ;$$
$$I_M = 0 .$$

Verlegung eines Mittelleiters nicht erforderlich

Bild 6.75  
Ströme auf den Außenleitern (Summenbildung) bei symmetrischer Last

$$I_R \neq I_S \neq I_T \text{ (bei } \varphi = 120^\circ \text{ konst.)}$$
$$I_M \neq 0$$

Ausgleichsstrom im Mittelleiter, Verlegung eines Mittelleiters erforderlich.

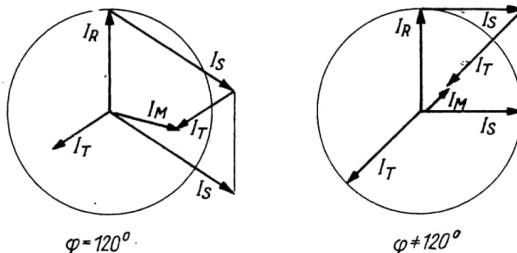


Bild 6.76. Ströme auf den Außenleitern und auf dem Mittelleiter (Summenbildung) bei unsymmetrischer Last

Fließt im Mittelleiter ein Ausgleichsstrom, so führt der Mittelleiter bei geerdeten Systemen gegen Erde Spannung!

Spannungen in Sternschaltungen

Außenleiterspannung (verkettete Spannung)

Deshalb ist auf symmetrische Belastung von Sternsystemen zu achten.

An der Bildung der Außenleiter- oder Hauptleiterspannung (verkettete Spannung) sind jeweils zwei Sternspannungen beteiligt.

Durch Differenzbildung entsteht

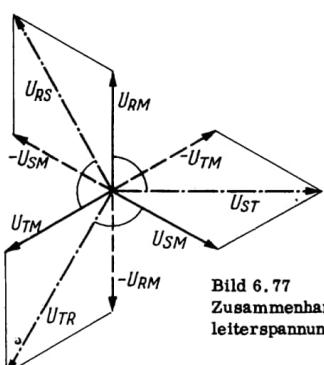


Bild 6.77  
Zusammenhang zwischen Stern- und Außenleiterspannungen

Die Leiterspannung zwischen zwei Außenleitern liegt zur Sternspannung des übrigen Außenleiters um  $90^\circ$  phasenverschoben.

Berechnung der Außenleiterspannung

$$U_L = 2 \cos 30^\circ U_A$$

$$U_L = 2 \frac{1}{2} \sqrt{3} U_A$$

$$U_L = \sqrt{3} U_A$$

(6.59)

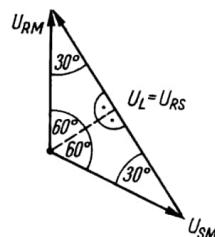


Bild 6.78

Zur Berechnung der Außenleiterspannung

Verkettungsfaktor

$\sqrt{3}$  wird als Verkettungsfaktor bezeichnet!

Dreieckschaltung  $\Delta$

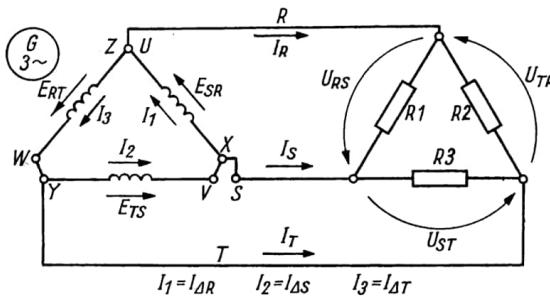


Bild 6.79. Drehstrom-Dreieckschaltung

Spannungen in Dreieckschaltung

In der Dreieckschaltung ist die Dreieckspannung genausogroß wie die Leiterspannung.

Es gilt

Leiterspannung

$$U_L = U_\Delta .$$

(6.60)

Leiterstrom (verketteter Strom)

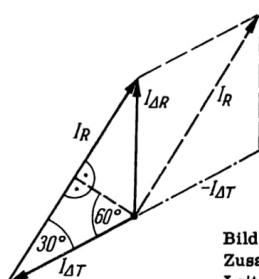


Bild 6.80

Zusammenhang zwischen Dreieckstrom und Leiterstrom

An der Lieferung des Leiterstromes sind jeweils zwei verkettete Generatorwicklungen beteiligt.

Berechnung des Leiterstromes

$$I_L = 2 \cos 30^\circ I_\Delta$$

$$I_L = 2 \frac{1}{2} \sqrt{3} I_\Delta$$

$$I_L = \sqrt{3} I_\Delta$$

(6.61)

### 6.3.3. Energie und Leistung im Dreiphasensystem

Die gesamte Energie von Dreiphasensystemen setzt sich aus der Energie der einzelnen Teilsysteme zusammen.  
Es gilt für die Verkettungsmöglichkeiten:

Energie und Leistung im Dreiphasensystem

	$\lambda$	$\Delta$
Wirkarbeit	$W_w = 3 U_\lambda I_L t \cos \varphi$	$W_w = 3 U_L I_\Delta t \cos \varphi$
Blindarbeit	$W_{bl} = 3 U_\lambda I_L t \sin \varphi$	$W_{bl} = 3 U_L I_\Delta t \sin \varphi$
Scheinarbeit	$W_s = 3 U_\lambda I_L t$	$W_s = 3 U_L I_\Delta t$
	$U_\lambda = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$	$I_\Delta = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$
	$I_\lambda = I_L$	$U_\Delta = U_L$

Unabhängig von der Verkettungsart gilt

$$W_w = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I \cos \varphi t, \quad (6.62)$$

$$W_w = \sqrt{3} U I \cos \varphi t, \quad (6.63)$$

$$W_{bl} = \sqrt{3} U I \sin \varphi t, \quad (6.64)$$

$$W_s = \sqrt{3} U I t \quad (6.64)$$

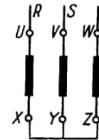
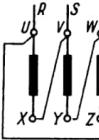
Es lauten die Leistungsbezeichnungen

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi; \quad [P] = 1 \text{ W}, \quad (6.65)$$

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi; \quad [Q] = 1 \text{ var}, \quad (6.66)$$

$$S = \sqrt{3} U I; \quad [S] = 1 \text{ VA}. \quad (6.67)$$

Tafel 6.6. Vergleich der Dreiphasenverkettung

Schaltungsart	Sternschaltung	Dreieckschaltung
Symbol	$\lambda$	$\Delta$
Schaltung von Wicklungen		
Leitergrößen	$U_L = \sqrt{3} U_\lambda$ $I_L = I_\lambda$	$I_L = \sqrt{3} I_\Delta$ $U_L = U_\Delta$
Wirkleistung	$P_\lambda = 3 U_\lambda I_L \cos \varphi$	$P_\Delta = 3 U_\Delta I_L \cos \varphi$
	$P_{\lambda, \Delta} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$	

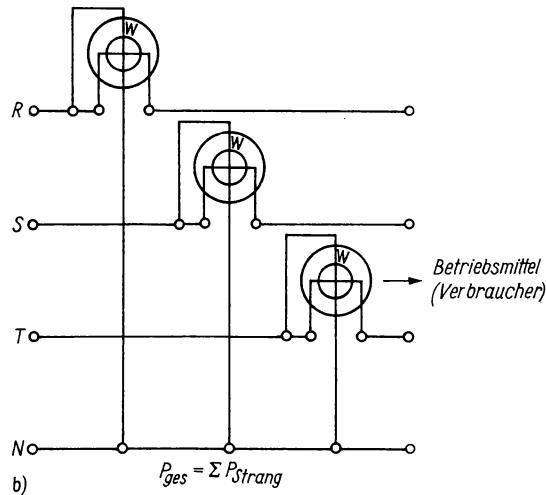
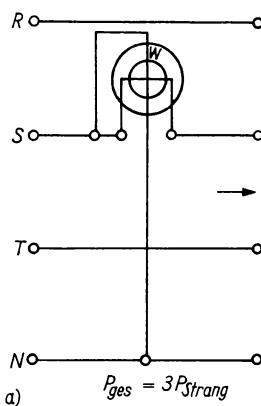


Bild 6.81. Grundschaltung für Wirkleistungsmessungen  
a) im symmetrisch belasteten Drehstromnetz; b) im unsymmetrisch belasteten Drehstromnetz

### 6.3.4. Magnetische Felder bei Dreiphasenwechselstrom

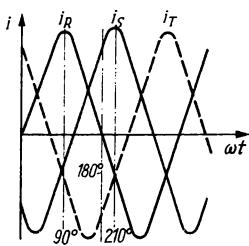


Bild 6.82  
Dreiphasenwechselstrom

Aus Abschn. 5.3. ist bekannt, daß jeder stromdurchflossene Leiter von einem Magnetfeld umwirbelt wird. Das gilt auch für stromdurchflossene Leitungen eines Dreiphasensystems. Da die Summe der Momentanwerte der Ströme und Spannungen bei Dreiphasensystemen in jedem Augenblick Null ist, muß das resultierende Magnetfeld bei unmittelbar parallel verlegten Leitungen auch Null sein. Die Magnetfelder der Einzelleiter heben einander auf. Der Abstand der Einzelleiter spielt dabei eine Rolle. Je größer dieser Abstand wird, desto mehr weicht der Wert der magnetischen Gesamtdurchflutung von Null ab.

Werden die phasenverschobenen Ströme in drei räumlich um  $120^\circ$  verschobene Wicklungen geschickt, entstehen magnetische Gesamtfelder zu verschiedenen Zeitpunkten.

Es wird willkürlich festgelegt:

$+$   $\cong \otimes$

$-$   $\cong \odot$

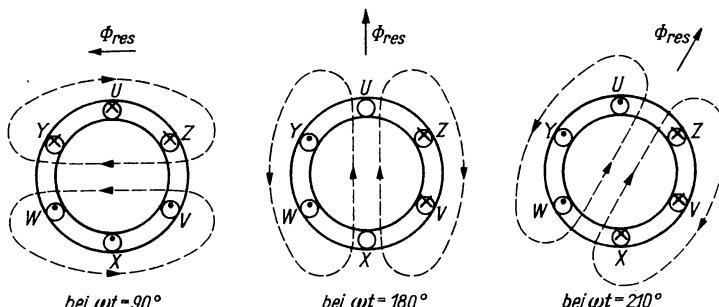


Bild 6.83. Resultierendes Magnetfeld zu verschiedenen Zeitpunkten

## Drehfeld

Bei gleichmäßiger Verteilung von Wicklungen über den Umfang eines Weicheisenzyinders entsteht beim Anschluß an ein Dreiphasensystem ein sich drehendes Magnetfeld.

Dieses Magnetfeld ist in der Lage, Permanent- oder Elektromagneten mitzunehmen (Prinzip der Drehstrommotoren).

Auf Grund dieser Erscheinung wird Dreiphasenwechselstrom auch als **Drehstrom** bezeichnet.

Auch zwei phasenverschobene Wechselströme erzeugen ein sich bewegendes Resultatmagnetfeld.

Die resultierenden Magnetfelder zweier phasenverschobener Ströme bezeichnet man als unvollkommene Drehfelder.

Auf diesem Prinzip basieren verschiedene Wechselstrommotoren (Einphasenmotor mit Hilfswicklung, Induktionszähler).

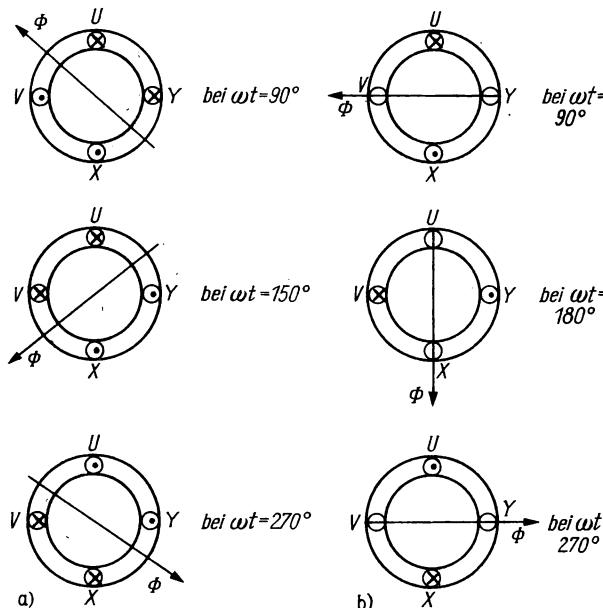
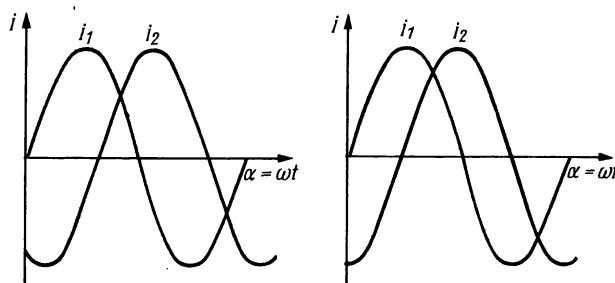


Bild 6.84. Zweiphasenverschobene Wechselströme mit unterschiedlichen Phasenverschiebungswinkeln und Darstellung der entsprechenden Resultatmagnetfelder

a) Phasenverschiebung  $120^\circ$

b) Phasenverschiebung  $90^\circ$

## 7. Anhang

### 7.1. Verwendete Formelzeichen, Benennungen, Einheiten

	Formel- zeichen	Benennung	Einheit
Allgemeine mathematische Symbole	$\Delta$ (Delta)	Differenz, Änderung	-
	$k$	Konstante, allgemein	-
	$m$	Anzahl (natürliche Zahl)	-
	$n$	Anzahl (natürliche Zahl)	-
	$\sum$ (Sigma)	Summenzeichen	-
	$  $	Betrag von ...	-
Geometrische Größen	$A$	Fläche, Querschnitt	$1 \text{ m}^2$
	$d$	Durchmesser eines Kreises	$1 \text{ m}$
	$h$	Höhe	$1 \text{ m}$
	$l$	Länge, Weglänge	$1 \text{ m}$
	$r$	Radius eines Kreises	$1 \text{ m}$
	$s$	Weg, Weglänge, Abstand	$1 \text{ m}$
	$V$	Volumen	$1 \text{ m}^3$
Allgemeine physikalische Größen	$c$	spezifische Wärmekapazität	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
	$T$	Temperatur	$1 \text{ K}$
	$\eta$ (Eta)	Wirkungsgrad	-
	$F$	Kraft	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
	$G$	Gewichtskraft	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
	$g$	Fallbeschleunigung	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
	$M$	Moment	$1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
	$m$	Masse	$1 \text{ kg}$
	$n$	Drehzahl	$\frac{1}{\text{s}}$ oder $\frac{1}{\text{min}}$
	$Q$	Wärmemenge	$1 \text{ J}$

	Formel- zeichen	Benennung	Einheit
	T	Perioden- (Schwingungs-) Dauer	1 s
	t	Zeit	1 s
	t	Celsiustemperatur	1 °C
	v	Geschwindigkeit	1 $\frac{m}{s}$
	W	Energie, Arbeit	1 W·s = 1 J = 1 N·m
<hr/>			
Elektrotechnische Größen			
Elektrisches Strömungsfeld	E	elektrische Urspannung	1 V
	E	elektrische Feldstärke	1 $\frac{V}{m}$
	G	elektrischer Leitwert	1 $\frac{A}{V} = 1 S$
	I	elektrische Stromstärke	1 A
	P	Leistung	1 V·A = 1 W
	Q	Elektrizitätsmenge, Ladung	1 A·s = 1 C
	R	Widerstand	1 $\frac{V}{A} = 1 \Omega$
	S	Stromdichte	1 $\frac{A}{m^2}$
	U	Spannungsabfall, Klemmenspannung	1 V
	W <sub>el</sub>	elektrische Arbeit, elektrische Energie	1 V·A·s = 1 W·s
<hr/>			
Elektrostatisches Feld	C	Kapazität eines Kondensators	1 $\frac{A \cdot s}{V} = 1 F$
	D	Verschiebungs- flußdichte	1 $\frac{A \cdot s}{m^2} = 1 \frac{C}{m^2}$
	E	elektrische Feldstärke	1 $\frac{V}{m}$
	$\Psi$ (Psi)	Verschiebungsfluß	1 A·s = 1 C
	Q	Ladungsmenge, Ladung	1 A·s = 1 C
	$t_H$	Halbwertzeit	1 s
	$\tau$ (Tau)	Zeitkonstante	1 s
	U	elektrische Spannung	1 V

	Formel- zeichen	Benennung	Einheit
Elektromagnetisches Feld	B	Magnetflußdichte	$1 \frac{V \cdot s}{m^2} = 1 \text{ T}$
	E <sub>s</sub>	Selbstinduktions- urspannung	1 V
	H	magnetische Feld- stärke	$1 \frac{A}{m}$
	L	Selbstinduktivität, Induktivität	$1 \frac{V \cdot s}{A} = 1 \text{ H}$
	$\Lambda$ (Lamb- da)	magnetischer Leitwert	$1 \frac{V \cdot s}{A} = 1 \text{ H}$
	M	Gegeninduktivität	$1 \frac{V \cdot s}{A} = 1 \text{ H}$
	N	Windungszahl von Spulen	-
	$\Phi$ (Phi)	Magnetfluß	$1 V \cdot s = 1 \text{ Wb}$
	R <sub>m</sub>	magnetischer Widerstand	$1 \frac{A}{V \cdot s}$
	$\Theta$ (Theta)	magnetische Durchflutung	1 A
Wechselstrom- erscheinungen	V	magnetische Spannung	1 A
	d	Dämpfungsgrad	-
	f	Frequenz	$\frac{1}{s} = 1 \text{ Hz}$
	G	Wirkleitwert	$1 \frac{A}{V} = 1 \text{ S}$
	$\omega$ (Ome- ga)	Kreisfrequenz	$\frac{1}{s} = 1 \text{ Hz}$
	P	Wirkleistung	$1 V \cdot A = 1 \text{ W}$
	p	Polpaarzahl	-
	$\varphi$ (Phi)	Phasenverschie- bungswinkel	rad
	Q	Blindleistung	$1 \text{ var} = 1 \text{ W}$
	R	Wirkwiderstand	$1 \frac{V}{A} = 1 \Omega$
	$\varrho$ (Rho)	Kreisgüte eines Resonanzkreises	-
	S	Scheinleistung	$1 V \cdot A = 1 \text{ W}$
	T	Periodendauer	1 s
	X	Blindleiterstand, allgemein	$1 \frac{V}{A} = 1 \Omega$
X <sub>C</sub>	X <sub>C</sub>	kapazitiver Blindleiterstand	$1 \frac{V}{A} = 1 \Omega$
	X <sub>L</sub>	induktiver Blindleiterstand	$1 \frac{V}{A} = 1 \Omega$
	Y	Scheinleitwert	$1 \frac{A}{V} = 1 \text{ S}$
Z	Z	Scheinwiderstand	$1 \frac{V}{A} = 1 \Omega$

## 7.2. Wichtige Konstanten in der Elektrotechnik

Formelzeichen	Benennung	Zahlenwert	Einheit
$e$	Elementarladung	$1,602 \cdot 10^{-19}$	C
$m_e$	Elektronenmasse	$9,109 \cdot 10^{-31}$	kg
$\epsilon_0$ (Epsilon)	elektrische Feldkonstante (absolute Dielektrizitätskonstante)	$8,854 \cdot 10^{-12}$	$\frac{F}{m}$
$\mu_0$ (My)	magnetische Feldkonstante (absolute Permeabilitätskonstante)	$1,256 \cdot 10^{-6}$	$\frac{H}{m}$
$\pi$ (Pi)	Verhältnis von Kreisumfang zum Kreisdurchmesser	3,14	-
$\rho$ (Rho)	spezifischer elektrischer Widerstand	materialabhängig (s. Tafel)	$\Omega \cdot m$
$\alpha$ (Kappa)	elektrische Leitfähigkeit	materialabhängig (s. Tafel)	$\frac{S}{m}$
$\epsilon_r$	relative Dielektrizitätskonstante	materialabhängig (s. Tafel)	-
$\mu_r$	relative Permeabilität	materialabhängig (s. Tafel)	-
$\alpha$ (Alpha)	Temperaturkoeffizient	materialabhängig (s. Tafel)	$\frac{1}{K}$

## 7.3. Wichtige Formeln

Elektrische Stromstärke	$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
Elektrische Stromdichte	$S = \frac{\Delta I}{\Delta A}$
Elektrische (Ur-)Spannung	$(E) U = \frac{W}{Q}$
Elektrischer Widerstand	$R = \frac{U}{I} = \text{konst. (Ohmsches Gesetz)}$
	$R = \rho \frac{1}{A} = \frac{1}{\alpha A}$
Elektrischer Leitwert	$G = \frac{I}{U} = \text{konst.}$

	$G = \frac{A}{Q \cdot l} = \alpha \frac{A}{l}$
Gleichung des elektrischen Strömungsfeldes	$S = \alpha E$
Elektrischer Widerstand bei Erwärmung	$R_t = R_{20} \left[ 1 + \alpha_{20} (t-20^{\circ}\text{C}) \right]$
Elektrischer Grundstromkreis	$E = I (R_i + R_a)$
Parallelschaltung	$\sum_{k=1}^n I_{zu\ k} = \sum_{k=1}^n I_{ab\ k}$ 1. Kirchhoff- (Knotenpunktsatz) sches Gesetz
Stromteilung in Parallelschaltungen	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$
Reihenschaltung	$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n (I R)_k$ 2. Kirchhoff- (Maschensatz) sches Gesetz
Spannungsteilung in Reihenschaltungen	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$
Elektrische Energie (Arbeit)	$W_{el} = U I t$
Elektrische Leistung	$P = U I$
Wirkungsgrad von Energiewandlungen	$\eta = \frac{W_{ab}}{W_{auf}}$
Kapazität eines Kondensators	$C = \frac{Q}{U}$ $C = \epsilon \frac{A}{l} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{l}$
Elektrische Feldstärke	$E = \frac{F}{Q}$ $E = \frac{\Delta U}{\Delta l}$
Dielektrische Verschiebungsfeldstärke	$D = \frac{\Delta \Psi}{\Delta A}$
Parallelschaltung von Kondensatoren	$C_{ers} = \sum_{k=1}^n C_k$

Gleichung des elektrostatischen Feldes	$D = \epsilon E$
Ladungsteilung	$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2}$
Reihenschaltung von Kondensatoren	$\frac{1}{C_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k}$
Spannungs- teilung	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$
Strom am Kondensator	$I_C = C \frac{\Delta U}{\Delta t}$
Induktions- gesetz	$E = - N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ $E = - N B l \frac{v}{m}$
Gegeninduktions- spannung	$E_2 = - M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$
Kraft auf strom- durchflossene Leiter im Magnetfeld	$F = N B I \frac{l}{m}$
Induktivität einer Spule	$L = \frac{\Phi}{I} N$ $L = \mu \frac{A}{1} N^2 = \mu_0 \mu_r \frac{A}{1} N^2$
Magnetische Durchflutung	$\Theta = I N$
Magnetische Feldstärke	$H = \frac{\Theta}{l}$
Magnetische Flußdichte	$B = \frac{\Phi}{A}$
Gleichung des elektromagnetischen Feldes	$B = \mu H$
Reihenschaltung von Spulen	$L_{\text{ers}} = \sum_{k=1}^n L_k$
Parallelschaltung von Spulen	$\frac{1}{L_{\text{ers}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k}$
Spannungen über einer Spule	$E_s = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ $U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Sinusförmige Wechselspannung	$u = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi)$
Schwingungs-dauer	$T = \frac{1}{f}$
Kapazitiver Blindwiderstand	$X_C = \frac{1}{\omega C}$
Induktiver Blindwiderstand	$X_L = \omega L$
Scheinwiderstand	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$
Scheinleitwert	$Y = \frac{1}{Z} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$
Strom im Wechselstromkreis	$I = \frac{U}{Z}$ (erweitertes Ohmsches Gesetz)
Wirkleistung	$P = U I \cos \varphi$
Blindleistung	$Q = U I \sin \varphi$
Scheinleistung	$S = U I$
Leistungsfaktor	$\cos \varphi = \frac{\text{Wirkgröße}}{\text{Scheingröße}}$
Resonanzfrequenz	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

# Sachwörterverzeichnis

- Abschirmung  
elektrische 68f.  
magnetische 93
- Addition  
arithmetische 152, 172  
geometrische 152, 172
- Akkumulator  
Blei- 59  
Kapazität 60
- Ampere 16, 136
- Anpassung 38
- Arbeit 51
- Aufmagnetisierung 108
- Augenblickswert 140, 143
- Ausschaltvorgang 85, 87
- Ausschaltzeitpunkt 85 ff.
- Außenleiter 178  
-spannung 179f.  
-strom 178
- Bedingungsgröße 27, 75f., 98, 119
- Belastung 35 ff., 38, 64f., 179
- Bemessungsgleichung 76, 100, 119
- Betriebsmittel 145
- Bimetallschalter 54f.
- Blindarbeit 161
- Blindfaktor 160
- Blindleistung 151, 160f.  
induktive 151  
kapazitive 151
- Blindleitwert  
induktiver 149  
kapazitiver 149
- Blindspannung  
induktive 153  
kapazitive 153
- Blindstrom  
induktiver 156  
kapazitiver 156
- Blindwiderstand 148 ff., 159  
induktiver 150, 159  
kapazitiver 149f., 159
- Coulomb 17, 69
- Dämpfung 164, 166
- Diamagnetika 104
- Dichtegröße 96
- Dielektrikum 80f., 83
- Dielektrische Polarisierung 69
- Dielektrische Verluste 83
- Dielektrizitätskonstante 73 f., 80
- Dipolbildung 69
- Drehfeld 183
- Drehstrom 183
- Drehstromspannung 175
- Dreieckschaltung 180f.
- Dreieckspannung 180
- Dreieckstrom 180
- Dreiphasensystem 176
- Dreiphasenwechselspannung 175 f.
- Dreiphasenwechselspannungs-  
generator 176
- Durchflutung 103 f.
- Durchschlag 71f.
- Effektivwert 141f.
- Einphasengenerator 174
- Einschaltvorgang 84
- Einschaltzeitpunkt 84, 86
- Elektrisierbarkeit 74
- Elektrizitätsmenge 11, 17
- Elektrolyse 57
- Elektrolytische Dissoziation 57
- Elektromagnet 132
- Elektromagnetischer Kreis 103
- Elektronen 11f., 18  
-schale 12
- Elektronenstrahlwärmeung 55
- Elektrotechnik 8
- Energie 9, 181  
-arten 10  
-betrachtung 88, 128  
-erhaltungssatz 9  
-formen 10  
kinetische 9, 51, 88  
potentielle 9, 50, 89  
-speicherung 76, 119, 128  
thermische 52  
-umsatz 107, 129  
-umwandlung 9, 52, 54, 57, 60f.,  
63, 88, 97, 110  
-wirtschaft 7
- Entmagnetisierung 108
- Erwärmung  
elektrolytische 56  
Elektronenstrahl- 55  
Lichtbogen- 55
- Farad 76
- Faradayscher Käfig 69
- Faradaysches Gesetz 57f.
- Feld 10  
-arten 67, 92  
elektrisches 14 ff.  
elektromagnetisches 91 ff., 98
- elektrostatisches 66 ff., 75, 89, 92
- größen 10  
-konstante 101  
-linien 14, 66f., 72, 91f., 98  
magnetisches 182  
-stärke 23 f., 71f., 81, 98
- Koerzitiv- 107
- skalares 10
- Strömungs- 16, 27
- Vektor- 10
- Ferromagnetika 93, 104f., 108
- Fotoelement 61f.
- Fotowiderstand 62
- Fotozelle 61
- Frequenz 139
- Frequenzverhalten von Widerständen 149f.
- Funkentlöschung 129
- Funkentlöschung  
an Schaltkontakten 129f.
- Galvanisches Element 58
- Gegeninduktion 114, 116
- Gegeninduktivität 116f.
- Gemischschaltung 39
- Generator 112f.
- Gesetz 48  
Durchflutungs- 104  
Induktions- 110  
Lenzsches 110
- Glühlampe 60
- Grammäquivalent 57
- Größe 48  
physikalische 15
- Grundbauelemente 124, 131
- Grundstromkreis 33, 41
- Halbleiter 13
- Halbwertzeit 90, 132
- Hauptleiter 178
- Homogenisierung 96
- Hystereseschleife 107
- Impedanz 155
- Induktanz 148
- Induktion 109ff., 117
- Induktivität 119ff.
- Influenz 68, 73, 92
- Ionen 11, 13, 56
- Isolationsverluste 82
- Isolierstoffe 71
- Joule 51
- Joulesches Gesetz 52
- Kapazitanz 149
- Kapazität 60, 76, 78f.
- Keramische Massen 74
- Klemmspannung 35
- Knotenpunkt 39f.  
-satz 40, 78, 102
- Kompensationskapazität 171
- Kompensationsleistung 170f.
- Kondensanz 149
- Kondensator 75, 78ff., 145, 147, 158
- Koppelfluß 114
- Kopplungsgrad 115
- Korrosion 60
- Kraftwirkung 72, 133, 135f.
- Kraftwirkungsgesetz 11, 92
- Kreisfrequenz 140
- Kreisgüte 163, 166
- Kriechstromfestigkeit 73
- Kryotechnik 13
- Kurzschluß 36
- Ladung 11f., 17, 105
- Ladungsträger 21
- Ladungsverschiebung 68
- Leerlauf 37f.
- Leistung 62, 151, 181
- Leistungsanpassung 65
- Leistungsbetrachtung 150
- Leistungsfaktor 160, 171
- Leistungspendelung 151
- Leistungsumsatz 64
- Leiter  
elektrischer 12  
Halb- 13  
Heiß- 32  
Ionen- 13  
Kalt- 32  
-bewegung 112f.  
-schleife 111, 114, 135  
-spannung 180  
-strom 178, 180
- Nicht- 13, 66
- stromdurchflossener 94, 134, 136
- Supra- 12
- Leitfähigkeit 26, 33
- Leitvermögen 27
- Leitwert 27, 45, 98ff., 116, 148
- Lichtbogenerrscheinungen 56
- Linendiagramm 142f.
- Linke-Hand-Regel 134
- Lumineszenzstrahler 61
- Magnet  
-feld 94 ff.

- fluß 96
- dichte 96 f.
- pol 92
- Permanent- 108
- Magnetische Durchflutung 97
- Magnetischer Kreis 99, 101 f.
- Magnetisierbarkeit 101
- Magnetisierung 105
- Magnetisierungskennlinie 104 ff.
- Masche 39, 41, 102
- Maschensatz 40 f., 102
- Materialieinfluß 26, 100
- Maximalwert 140
- Mehrphasengenerator 174
- Meßbereichserweiterung 46
- Mittelleiter 178
- Mittelleiterstrom 174, 177
- Mittelwert 141 f.
- Motor 135
- Netzwerk 39
- Nichtleiter 13
- Nutzfeld 95 f.
- Ohm 28
- Ohmsches Gesetz 30
  - erweitertes 155
- Parallelschaltung 39, 44 f., 50
- Parallelschwingkreis 164 ff.
- Paramagnetika 104
- Pegel 25
  - Logik- 25
- Periodendauer 139
- Permeabilität 97, 100 f.
- Phasenkompenstation 169
- Phasenverschiebung 153 f., 157
- Phasenverschiebungswinkel 153
- Phasenwinkel 141
- Potential 24
  - betrachtung 24 f.
  - differenz 24, 99
- Potentiometer 43
- Primärstrahler 61
- Proton 11
- Quellenfeld 66
- Rechte-Faust-Regel 94
- Rechte-Hand-Regel 112 f.
- Reihenschaltung 39, 42, 120 f., 152
- Reihenschwingkreis 161 ff.
- Remanenz 105 f.
- Resonanzbedingungen 161, 164
- Resonanzfall 161
- Resonanzfrequenz 162
- Sättigung 105 f.
- Saugkreis 162
- Schaltung
  - Ersatz- 33 f.
  - Gemischt- 39, 47
  - Grundmeß- 18, 23, 51, 63
  - Parallel- 39, 50, 121
  - Reihen- 39, 42, 120 f., 152
- Schleifarbeit 161
- Scheinleistung 160 f.
- Scheinleitwert 155
- Scheinwiderstand 155
- Schmelzsicherung 53 f.
- Schwebung 173
- Schwingkreis
  - Reihen- 161 ff.
  - Parallel- 164 ff.
- Seebeck-Effekt 56
- Sekundärelement 59
- Sekundärstrahler 61
- Selbstinduktion 116 f.
- Selbstinduktivität 116
- Skineffekt 158
- Spannung 21, 70, 99, 110, 139 f., 153
- Spannungsabfall 23, 71, 99
- Spannungsbereiche 26
- Spannungsmesser 44
- Spannungsmessung 23
- Spannungsquelle 35 ff., 145
- Spannungsreihe 58
- Spannungssteiler 43, 48
- Spannungsteilung 42
- Spannungsüberhöhung 173
- Spannungsverlauf
  - am Kondensator 147
  - an der Spule 147
  - am Widerstand 146
- Sperrkreis 165
- Spitzenwert 139
- Spulen 95, 111, 122, 125 ff., 145 f., 158
  - güte 159
  - ideale 124 f.
  - im Magnetfeld 112
  - kopplung 115
  - windung 96
  - verlustbehaftete 123
  - verlustlose 123
  - zusammenschaltung 120
- Sternschaltung 177 ff.
- Sternspannung 178
- Stofftransport 57
- Streufeld 96 f.
- Streuluß 114
- Strom 35
  - elektrischer 15
  - Erscheinungen 17
  - Isolations- 82
  - Leitungs- 74 f.
  - dichte 18 f.
  - kreis 38 f., 103
  - leiter 136
  - linien 15
  - richtung 17, 112
  - röhre 15 f.
  - stärke 16, 21, 136
  - teilergesetz 45 f.
  - teilung 44
  - verteilung 50
  - wärme 52
- Strömfeld 14 f.
- Stromverlauf
  - am Kondensator 147
  - an der Spule 147
  - am Widerstand 146
- Supraleiter 12
- Temperaturkoeffizient 29, 33
- Thomsonsche Schwingungsgleichung 162, 164
- Transformatorprinzip 114
- Überlagerung 173
- Überschlag 72 f.
- Ummagnetisierungsverluste 108
- Umrechnungsbeziehungen 65
- Unfallverhütung 20
- Urspannung 22, 26, 34, 49
  - Ersatz- 49
  - Gegeninduktions- 115
  - Höhe der 111
  - Induktions- 112
  - Sekundär- 115
- Verkettungsfaktor 180
- Verschiebungsfluß 69 f., 75
- dichte 70
- linien 69
- Verschiebungsgesetz 70
- Verschiebungstrom
  - dielektrischer 75
- Volt 22
- Wärme
  - arbeit 141
  - entwicklung 56
  - geräte 52
- Wechselgrößen 137
- Wechselspannung 138
- Wechselspannungsquelle 172 ff.
- Wechselstrom 153, 156
- Wechselstrombauelement 158
- Wechselstromkreis 145
- Wechselstromparallelschaltung 158
- Wechselstromreihenschaltung 155
- Wechselstromtechnik
  - Grundgesetz 140
- Werkstoff
  - ferromagnetischer 92
- Wicklung
  - bifilare 117
  - Chaperon- 117
- Widerstand 28 ff., 145 f., 148, 158
  - Bemessung 28
  - Bemessungsgleichung 28
  - Blind- 148
  - differentieller 31
  - Einteilung 36
  - elektrischer 27 f.
  - Ersatz- 42 f., 45
  - Gleichstrom- 31
  - Kennlinie 30
  - linearer 31
  - magnetischer 100
  - nichtlinearer 31
  - Parallel- 46
  - spannungsabhängiger 32
  - spezifischer 26, 33
  - temperaturabhängiger 32
  - Verlust- 82, 123
- Widerstandsschweißen 52
- Widerstandsschweißverfahren 53
- Winkelgeschwindigkeit 140
- Wirbelstrom 117 f.
- Wirkung des elektrischen Stromes
  - auf den Menschen 19, 25
  - chemische 19
  - Licht- 19
  - magnetische 19
  - nützliche 20
  - schädigende 20
  - Wärme- 19
- Wirkungsgrad 63 f.
- Wirkarbeit 161
- Wirkleistung 160 f.
- Wirkspannung 153
- Wirkstrom 156
- Wirkwiderstand 150, 159
- Zählpfeil 17
- Zeigerdiagramm 143
- Zeitkonstante 90, 132
- Zusammenschaltung 76
- Zweig 39
- Zweiphasenwechselspannung 174
- Zweiphasenwechselspannungsgenerator 174
- Zweipol
  - aktiver 34, 41, 64 f.
  - passiver 34, 145, 158

