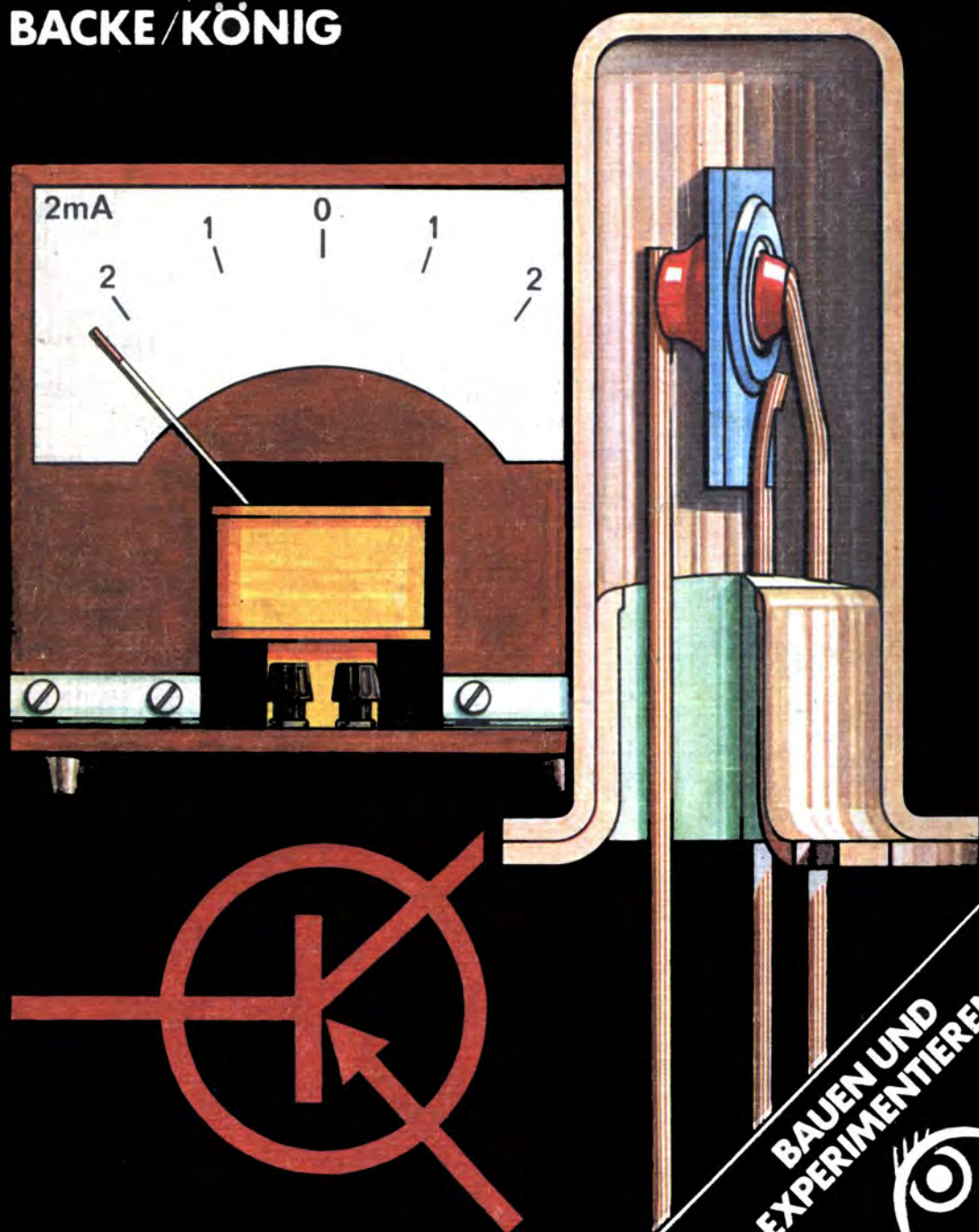


ELEKTROTECHNIK UND ELEKTRONIK SELBST ERLEBT

BACKE/KÖNIG



BAUEN UND
EXPERIMENTIEREN



	Gleichspannung, Gleichstrom Wechselspannung, Wechselstrom
	Tonfrequenz- wechselstrom Hochfrequenz- wechselstrom
	Leitung, allgemein Leitung, abgeschirmt
	Kreuzung und Abzweig von Leitern mit elektrischer Verbindung
	Wechselspannungs- quelle Gleichspannungs- quelle
	Galvanisches Element, Akkumulator
	Batterie (aus galvanischen oder Akkumulator- elementen)
	Thermoelement
	Hochspannung
	Erdverbindung
	Masseverbindung
	Einstellbarkeit, allgemein
	Verstellbarkeiten allg., insbesondere linear (links) und nichtlinear (rechts)
	Stetige (links) und stufenweise (rechts) Verstellbarkeiten

	Einpolige Steckverbindung (Stecker und Buchse)
	Schließer (Einschalter)
	Öffner (Ausschalter)
	Einpolige Umschalter
	Zweipoliger Schalter
	Zweipoliger Umschalter (je Pol für zwei Richtungen)
	Zweipoliger Umschalter (je Pol für zwei Richtungen)
	Relais (mit einer Wicklung)
	Relais mit zwei Wicklungen
	Wicklung eines elektrodynamischen Relais
	Relais mit Umschalter
	Sicherung, allgemein
	Überspannungs- sicherung
	Feinsicherung (links), Grobsicherung (rechts)

	Widerstand, allgemein
	Widerstand, verstellbar, allgemein
	Spannungsteiler, verstellbar Spannungsteiler, einstellbar
	Widerstand, einstellbar
	Widerstand, stetig verstellbar
	Widerstand, stufig verstellbar
	Heißleiter (Thermistor)
	Wicklung, Spule (allgemein)
	Spule mit Ferromagnetkern
	Spule einstellbar mit Ferromagnetkern
	(Einphasen-) Transformator, Übertrager, allgemein
	Transformator, Übertrager mit Ferromagnetkern
	Transformator mit ferromagnetischem Kern, mehreren Wicklungen und Anzapfung
	Transformator ohne Kern mit verstellbarer Kopplung

	Kondensator, allgemein
	Kondensator, verstellbar, Drehkondensator
	Kondensator, einstellbar, Trimmer
	Elektrolytkondensator, gepolt
	Galvanometer
	Strommesser, Amperemeter
	Spannungsmesser, Voltmeter
	Leistungsmesser, Wattmeter
	Drehspulgerät mit Dauermagnet
	Dreheisengerät (Weicheisengerät)
	Gleichstrom-generator
	Gleichstrommotor
	Wechselstrom-generator
	Wechselstrommotor

	Glühlampe
	Glimmlampe
	Wecker, Klingel
	Summer
	Hupe
	Mikrofon
	Fernhörer
	Lautsprecher
	Antenne, allgemein
	Gleichrichter, allgemein
	pnp-Transistor
	nnp-Transistor
	Fotowiderstand, stromrichtungs-unabhängig
	Fotodiode, stromrichtungs-abhängig

	UND-Glied (Konjunktion)
	ODER-Glied (Disjunktion)
	Negator (Negation)
	NAND-Glied
	NOR-Glied
	Verstärker
	Impulsformer
	Generator (Multivibrator)
	Schmitt-Trigger
	Halbadder
	Trigger (RS-Flipflop, Bivibrator)
	T-Flipflop
	RS-Flipflop mit Takteingang
	Monoflop (Univibrator)

Backe/König

Elektrotechnik und Elektronik selbst erlebt

Das kannst auch Du

Hans Backe · Lothar König

Elektrotechnik und Elektronik selbst erlebt

Bauen und Experimentieren

Urania-Verlag Leipzig Jena · Berlin

2. Auflage der Neubearbeitung 1980, 21.–35. Tausend

Alle Rechte vorbehalten.

© Urania-Verlag, Leipzig · Jena · Berlin,

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur,

Leipzig 1968

VLN 212-475/63/80 · LSV 3509

Lektoren: Jochen Horn, Manfred Quaas

Einbandgestaltung: Wolfgang Würfel

Gestaltung: Peter Mauksch

Fotos: Hermann Ebel, Lutz Liebert

Zeichnungen: Gerhard Pippig

Printed in the German Democratic Republic

Lichtsatz: INTERDRUCK

Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97

Druck und buchbinderische Verarbeitung:

Karl-Marx-Werk Pößneck

Best.-Nr.: 653 591 6

DDR 13,80 M

Inhalt

Physik und Technik gehören zusammen 9
Wo und womit bauen wir? 11

1. Kapitel Elektroenergie wird erzeugt

Rationelle Arbeit in unserer Werkstatt 12
Wickelvorrichtung für Spulen 12
Aufbau und Antrieb 14
Das Zählwerk zeigt die Windungszahl an 15
Wir vereinheitlichen allgemeine Bauteile 18
Die Schalttafel, das Herz der Anlage 18
Wir beginnen mit dem Bau des Transformators 22
Befestigung der Einzelteile und Verdrahtung 24
Die Meßgeräte signalisieren den elektrischen Zustand 26
»Aufbauteile« für mehrere Zwecke 28
Schiebewiderstand 28
Konstruktion und Fertigung 28
Erste Versuche mit dem Schiebewiderstand 31
Verteilertafel und Lampenbrett 31
Versuche zum Ohmschen Gesetz und zu den Kirchhoffschen Gesetzen 33
Strom und Spannung an einem Widerstand 33
Wir schalten Widerstände parallel 33
Wir schalten Widerstände in Reihe 34

Über die Chemie zur elektrischen Energie 36
So fing es an 36
Wir schalten Elemente zu Batterien 37
Aus mechanischer Energie wird elektrische Energie 38
Ein Spulenmodell für den Feldliniennachweis 38
Elektromagnetismus und Induktion 40
Wir bauen einen Elektromagneten 40
Induktionsversuche 41
Zur Wiederholung: Arbeit, Energie und Leistung 42
Unsere Stromerzeuger entstehen 43
Zuerst die kleine elektrische Maschine I 43
Mit dem Läufer beginnen wir 44
Wellenlager und Grundbrett folgen 46
Der Ständer mit Dauermagneten oder Elektromagneten 48
Die Montage der elektrischen Maschine I 50
Experimente mit der elektrischen Maschine I 50
Stromerzeuger und Motor mit Dauermagneten 50
Die Maschine I wird durch einen Elektromagneten fremderregt 52
Wir bauen die große elektrische Maschine II 55
Diesmal beginnen wir mit dem Ständer 57
Der erste Läufer entsteht nach historischem Vorbild 58
Der zweite Läufer entsteht nach technischem Vorbild 63
Das Zusammenspiel von Kommutator und Läuferspulen 65

- Endmontage der Maschine II 68
- Versuche mit der elektrischen Maschine II mit Trommelläufer 69
 - Gleichstromgeneratoren 70
 - Gleichstrommotoren und Universalmotor 70
 - Wir nehmen die Charakteristik der Gleichstrommotoren auf 71
- Weitere Versuche, jetzt mit Doppel-T-Läufer 73

2. Kapitel Elektroenergie wird verteilt

- Leitungen und Netze, Knotenpunkte und Maschen** 74
- Von den Kirchhoffschen Gesetzen zum Knotenpunktsatz und zum Maschensatz 75
- Wir bauen Schalter und Schaltungen 76
 - Ein Mehrzweckschalter entsteht 76
 - Lampenschaltungen mit dem Mehrzweckschalter 78
- Materialökonomie und Naturgesetze bei der Übertragung von Elektroenergie** 79

3. Kapitel Elektroenergie wird angewendet

- Wir nutzen die Wirkungen des elektrischen Stromes aus** 81
- Wärmewirkung in einem elektrischen Gasanzünder 81
- Stromwärme löst Schaltvorgänge aus 84
 - Ein Thermoschalter entsteht 84
 - Experimente mit dem Thermoschalter 87
- Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes ist die wichtigste** 88
- Wir bauen einen Summer und eine Klingel 88
 - Zusammenbau der Klingel 90
 - Zusammenbau des Summers 90
- Das elektromagnetische Relais ist ein Fernschalter 90
 - Die Einzelteile des Relais 91
 - Wir bauen das Relais zusammen 95

4. Kapitel Informationen werden gewonnen

- Messen und Prüfen** 98
- Wir weisen Spannungen mit dem Schwenkstab nach** 98
 - Zwischendurch entsteht ein Experimentiertransformator 99
 - Schwenkstabversuche 100
 - Nachweis der Wechselspannung 101
 - Mit Diode und Schwenkstab (Gleichrichtung) 101
 - Die pulsierende Gleichspannung wird geglättet 102
 - Der Schwenkstab an der elektrischen Maschine II 102
- Wir messen Ströme und Spannungen** 103
- Das Galvanometer – unser erstes Meßgerät 103
 - Das Meßsystem 104
 - Abgleich der Meßwerkspule 106
- Wir bauen ein Universal-Dreheisen-Meßgerät 107
 - Grundplatte, Skalenplatte und Meßwerkplatte 108
 - Das Meßwerk erfordert solide Arbeit 109
 - Wir wickeln die Spulen der Meßbereiche 113
 - Für höchste Ansprüche – ein Drehspul-Vielfachmeßgerät 115
 - Konstruktion des Drehspulsystems 117
 - Schon bekannt – das Magnetsystem 120
 - Meßbereichserweiterung: Erst rechnen – dann schalten 122

5. Kapitel Informationen werden übertragen

- Elektronen bringen Nachrichten in alle Welt** 124
- Der Morsetelegraf** 124
 - Die Morsetaste 124
 - Der Morseschreiber 127
 - Die Schreibeinrichtung 128
 - Prüfen und Einstellen (Justieren) 134
 - Zwei Telegrafstationen im Gegenbetrieb 136

Wir bauen eine Fernsprechanlage 137
 Fernhörer und Mikrofon 138
 Beinahe »Serienproduktion«: vier Fernhörer 138
 Wir bauen Mikrofone 140
 Zwei Fernhörer werden zu einem Kopfhörer 142
 Die Fernsprechstellen 143
Vorbereitungen zum Bau einer Verstärkeranlage 147
 Wir beginnen mit dem Mikrofonbrett 147
 Der Lautsprecher strahlt kräftige Schallwellen ab 149
 Die Teile des Schallsystems 149
 Die Teile des Dauermagnetsystems 152
 Wir montieren das Magnetsystem 153
 Die Schallwand 153
Verstärkertechnik 154
 Wissenswertes von Halbleiter-Bauelementen 154
 Leitfähigkeit aus Eigenem 155
 Leitfähigkeitszuwachs durch Kristallbaustörung 156
 Wir nehmen die Kennlinien von Dioden auf 158
 Der Transistor als Verstärker 159
 Die Wirkungsweise des Transistors 160
 Wir nehmen Kennlinien von Transistoren auf 161
 Wir bauen den NF-Verstärker I für geringe Leistung 163
 Erste Experimente mit dem Lautsprecher 166
 Die Mikrofon-Übertragungsanlage 166
 Wir bauen eine Wechselsprechanlage 167
 NF-Verstärker II großer Leistung für höhere Ansprüche 169
 Tonanlagen jetzt mit dem Verstärker II 172
 Der Fernhörer als Mikrofon 172
 Der Lautsprecher als Tauchspul-Mikrofon 172
 Ein Telefon-Adapter zum Mithören 173
 Noch eine Wechselsprechanlage – ganz neuzeitlich 173
Wir bauen Radios 174
 Nachrichtenträger ist die Funkwelle 174
 Mit dem einfachen Diodenempfänger sammeln wir erste Erfahrungen 177
 Ein Hochfrequenz-Verstärker steigert die Leistungsfähigkeit unseres Diodenempfängers beträchtlich 179
Licht als Informationsträger 181
 Ein Lichtempfänger wird gebaut 182
 Wir telefonieren über einen Lichtstrahl 182

6. Kapitel Informationen werden verarbeitet

Steuern und Regeln 185
 Die Steuerkette 185
 Der Regelkreis 186
Wir steuern mit unseren Modellen 187
 Mit Licht steuern 187
 Wir bauen eine Lichtschanke mit Fotowiderstand 188
 Zwischendurch entsteht ein hochempfindliches Relais 188
 Funktionsprüfung und Steuerungsversuche 191
 Mit Wärme steuern 192
 Eine Thermosäule entsteht 193
 Die Temperaturschanke als Feuermelder 195
Modellversuch zur Temperaturregelung 195
Rechnen und Zählen 196
 Analoge und digitale Signale 196
 Über die Logik der Sprache und der Technik 197
 »L ißt B und trinkt C« – eine Aussagenverbindung 198
 Noch einmal: Schaltung von Schaltern (»Schalterlogik«) 198
 Das Rechnen im Zweiersystem ist besonders einfach 199
 Mathematik der Logik 200
 Halbleiter-Bauelemente in Logikschaltungen 201
 Kombinationen der Elementarschaltungen 206
Wir bauen ein Logik-Experimentiergerät 209
 Modell einer Alarmeinrichtung 212
 Modell einer Zugsteuerung 213
Die Grundbausteine eines Computers 215
 Ein Rechenwerk addiert Dualzahlen 216
 Wichtigste Eigenschaft eines Speichers: Gedächtniswirkung 218
 Ein Zähler für Dualzahlen 221
Wir bauen einen elektronischen »Würfel« 222
 Ein Taktgenerator erzeugt Rechteckspannungen 223
 Wir bauen einen Würfel mit dezimaler Anzeige 226
 Als letztes: Anzeige der Würfelaugen 232
Eine Hauptentwicklungsrichtung:
Die Mikroelektronik 238
Einige Bemerkungen zum Schluß 240
Auswahl empfehlenswerter Literatur 242

8 Inhalt

Tabellenanhang 243

Tabelle 1.

Werte der Maniperm-Magneten für unsere

Geräte 243

Tabelle 2.

Zusammenstellung der elektronischen Bauelemente
für unsere Geräte 243–244

Tabelle 3.

Spezifischer elektrischer Widerstand verschiedener
Materialien (bei einer Temperatur von 20°C) 246

Tabelle 4.

Technische Daten von Kupferdrähten 246

Tabelle 5.

Widerstand und größte zulässige Stromstärke
von 1 m verschiedener Widerstandsmaterialien 247

Sachwörterverzeichnis 248

Physik und Technik gehören zusammen

Allen Maschinen, Geräten und technischen Verfahren gemeinsam ist das physikalische *Naturgesetz*. Es ist die Grundlage jeder technischen Entwicklung, die stets nur so weit gehen kann, wie der naturwissenschaftliche Impuls reicht. Der Zusammenhang zwischen Physik und Technik ist wechselseitig: Beide geben und nehmen.

Die *Naturwissenschaft* erforscht die schon immer vorhandenen und auch in der Zukunft wirksamen, unveränderlichen, vom Willen des Menschen unabhängigen Gesetze der Natur und bringt sie in ein möglichst vollständiges System, die *Technik* ist ein besonders sichtbarer Ausdruck der Produktivkräfte und der Entwicklung der menschlichen Gesellschaft. Sie ist stets an einen Zweck gebunden, der mit der Produktion zusammenhängt, und sie ist zahlreichen zusätzlichen Forderungen unterworfen, z. B. der Wirtschaftlichkeit, der Beschaffung der Werkstoffe, der Formgebung (Ästhetik) und der Sicherheit des Menschen. Die Technik benutzt die Gesetze, Gleichungen und Zahlen, die der Naturwissenschaftler

gefunden hat, und entwickelt (neben vielem anderen) neue Forschungsanlagen, mit deren Hilfe der Naturwissenschaftler neue Erkenntnisse gewinnt. Die Technik »steuert« sogar in wachsendem Maße die Forschung, indem sie Impulse in Form von Forschungsaufträgen gibt, deren Erfüllung unmittelbar der Produktion dient.

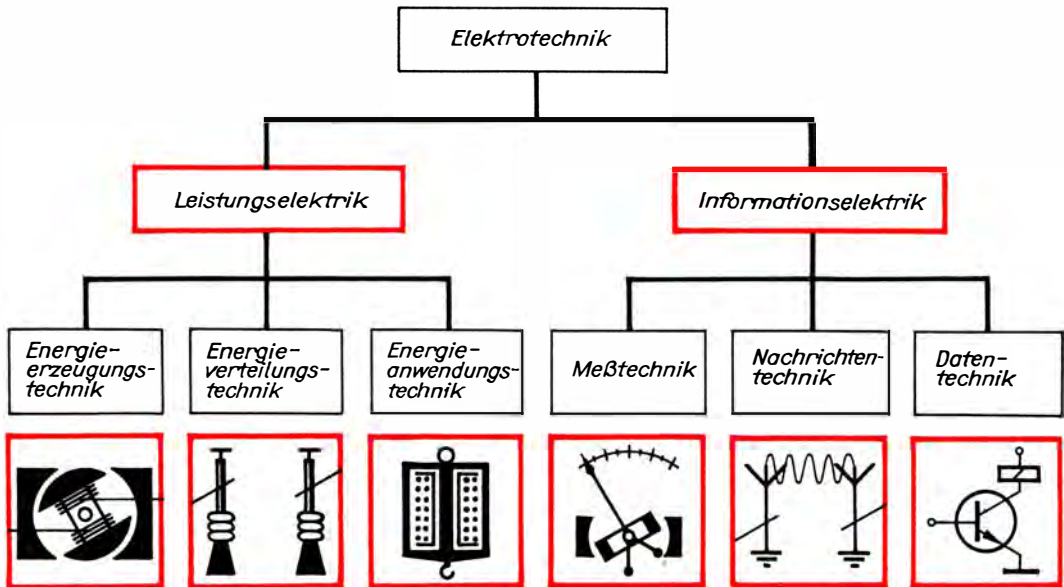
Wir wollen – die grundlegenden physikalischen Kenntnisse voraussetzend – einige wichtige Gebiete der *Elektrotechnik* durch Beobachten, Denken und Bauen selbst erleben. Daß es gerade die Elektrotechnik ist, hat seinen guten Grund: Sie ist überall anzutreffen; wir leben dauernd mit ihr. Ihre Energieform, die Elektrizität, ist für den Menschen die wertvollste geworden, weil sie sich besonders leicht (theoretisch unbeschränkt) in andere Energieformen umwandeln läßt. Die frühere Einteilung in Starkstromtechnik und Schwachstromtechnik (Fernmelde-technik) wird nicht mehr verwendet; Bild 1 zeigt eine Übersicht, die dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht.

Bei der Elektrotechnik erkennen wir gut die Impulse, die ihr die Physik gegeben hat:

1. Impuls:

1799, *Volta's* galvanisches Element und die dadurch ausgelösten Entdeckungen, beispielsweise die

Bild 1. Die Arbeitsgebiete der Elektrotechnik



Ablenkung einer Magnetnadel durch das Magnetfeld des elektrischen Stromes von *Oersted*.

2. Impuls:

1831 entdeckt *Faraday* die elektrische Induktion. Folge: Ein weiteres Teilgebiet der Elektrotechnik, die *Wechselstromtechnik*, entsteht.

3. Impuls:

1888 entdeckt *Hertz* die elektromagnetischen Wellen und bestätigt die Theorie *Maxwells* (1865). Folge: Entwicklung der drahtlosen Telegrafie.

4. Impuls:

1906 entwickeln *de Forest* und *Lieben* die erste Verstärkerröhre. Folge: Erhebliche Ausweitung der Funk- und Fernmeldetechnik; Entstehung des Begriffes »*Elektronik*« für die Gebiete der Elektrotechnik, in denen die Elektronenröhre eingesetzt wird (später als »erste Generation der Elektronik« bezeichnet).

5. Impuls:

1948 entwickeln *Bardeen*, *Brattain* und *Shockley* den ersten Transistor. Folge: Aufbau der *Halbleitertechnik*. Um 1950: Beginn der industriellen Fertigung von Halbleiterbauelementen als Grundlage der zweiten Elektronik-Generation, zugleich als Voraussetzung für die Entwicklung der dritten Generation, der *Mikroelektronik* (seit etwa 1965).

Die Elektronik kann man nicht als Teilgebiet in die Elektrotechnik nach Bild 1 *einordnen*, weil sie eine von mehreren Realisierungsmöglichkeiten der Elektrotechnik ist; sie kann dagegen allen elektrotechnischen Gebieten *zugeordnet* werden. Elektronik der Leistungselektrik bedeutet also Leistungselektronik; Informationselektronik ist Elektronik der Informationselektrik.

Unter *Elektronik* wollen wir die Theorie (Physik) und die Herstellungstechnik (Technologie) von elektronischen Bauelementen und Bausteinen verstehen sowie deren zweckentsprechende Verbindung durch Leitersysteme zu vollständigen Schaltungen, Geräten und Anlagen.

Elektronische Bauelemente (oder Bausteine) ermöglichen oder steuern einen Energie- oder Informationsfluß; ihr gemeinsames Wirkungsprinzip beruht auf der gezielten Einwirkung auf ihre charakteristischen Ladungsträger (ausgenommen sind makroskopische Ortsveränderungen).

Wir werden beim Bau unserer elektrischen Maschinen, Geräte und Anlagen die Physik überall wiederfinden. Dabei wollen wir uns einiges Grundsätzliche merken:

1. Wir müssen nicht unbedingt vom ersten bis zum letzten Modell alles schön der Reihe nach aufbauen; wir dürfen durchaus unseren eigenen Plan aufstellen und hier und da auch etwas vorwegnehmen. Ebenso ist es möglich, handelsübliche Bauteile oder Geräte zu verwenden, wenn uns der Selbstbau zu aufwendig erscheint. Wer eben unbedingt zuerst den Telegrafen bauen will, treibt ihn mit einem Spielzeugmotor an und benutzt zur Stromversorgung Flachbatterien. Eines ist jedoch immer wichtig: Wir müssen so sorgfältig, so genau und so sauber arbeiten, wie wir nur immer können. In den Lagern klemmende Wellen erfordern unnötig hohe Antriebskräfte bei den Maschinen, machen die Meßgeräte zu unempfindlich und zwingen uns schließlich zur Neuanfertigung: Wir brauchen zusätzliche Zeit und neues Material.

2. Alle in diesem Buch behandelten Modelle sind gebaut worden, und sie arbeiten ausgezeichnet. Aber weil es Modelle sind, dürfen wir sie nicht alle mit den strengen Maßstäben ihrer industriellen Vorbilder messen. So wie die Meßgeräte nicht für Präzisionsmessungen geeignet sind, können die elektrischen Maschinen nicht zum Antrieb von Plattenspielern oder Tonbandgeräten verwendet werden. Die elektronischen Modelle der Informationselektrik erreichen dagegen schon höhere Qualitätsmerkmale.

3. Die Konstruktionen sind so einfach wie möglich gehalten; Beschreibungen und Bilder geben alle nötigen Maße und Zusammenhänge an. Der schöpferischen Phantasie der Leser sind jedoch keine Grenzen gesetzt, wenn dabei bessere Lösungen herauskommen. Verbesserungsvorschläge sind sehr willkommen. Mehrfach vorkommende Teile sind in ihrer Art »genormt« worden; das erleichtert die Arbeit und erhöht die Fertigkeit (und damit das Vergnügen) beim Bauen.

4. Noch ein Wort zur Unfallgefahr: Wir werden im allgemeinen mit Niederspannung, also mit höchstens 42 V, arbeiten. Der eine unserer Transformatoren (Umspanner) liefert auch 75 V; mit dieser Spannung gehen wir sehr vorsichtig um, isolieren alle leitenden Teile gut und fassen blanke Stellen nicht an, wenn sie unter Spannung stehen. Ein einziger Netzanschluß ist nötig: der Anschluß der Schalttafel an das Lichtnetz 220 V. Er muß besonders gut isoliert sein – wie der Anschluß einer Tischleuchte etwa. Keine unter dieser Spannung stehende Stelle darf blank zugänglich sein.

Wo und womit bauen wir?

Zum Basteln eignet sich am besten ein Raum im trockenen Keller oder auf dem Dachboden; dort stören wir niemanden. Haben wir den nicht, dann müssen wir uns mit einer Ecke in der Wohnung begnügen und versuchen, den unvermeidlichen Staub und Abfall nicht auf das ganze Zimmer zu verteilen. In solch einer Bastelecke ist eine gute Ordnung von Werkzeug und Material besonders wichtig – nicht nur aus Schönheitsgründen, sondern auch der Übersichtlichkeit wegen.

Einen festen *Werktsch* brauchen wir, wenn er auch nur klein ist. Aber er muß sicher stehen, und auf seiner möglichst starken Platte muß man eine Zwinne anschrauben können. Er muß auch gelegentlich kräftige Hammerschläge vertragen und einige Kratzer und Löcher im Laufe der Zeit aufnehmen können. Eine Schublade (besser noch mehrere) ist wichtig als Ablageplatz, ebenso ein kleiner Werkzeugschrank, den man sich aus einer flachen Kiste mit Scharnieren und Riegel selbst bauen kann.

Die fertigen Modelle bringen wir in einem Regal nahe dem Werktsch unter. Die Schalttafel, die wir als erstes bauen werden, muß auf jeden Fall zum Greifen nahe sein. Steht der Werktsch an einer Wand, so befestigen wir an ihr vier Metallwinkel derart, daß der Rahmen der Schalttafel darübergeschoben werden kann; zwei Winkel oben und zwei unten. Vier Schrauben, von außen durch den Rahmen hindurch in entsprechende Löcher in den Winkel geführt, halten die Tafel in etwa 1 cm Abstand von der Wand; dadurch kann die im Transformator, in den Widerständen und Glühlampen entstehende Wärme entweichen. Will man die Tafel ohne Abstand anbringen, so bohrt man oben und unten einige größere Löcher (mit Zentrumborher) in den Holzrahmen. Jedenfalls muß die Schalttafel fest sitzen, damit wir bequem und schnell an ihr schalten können.

Über die *Werkzeuge* ist nicht viel zu sagen: Schraubstock, Schraubzwingen, Säge, Hammer, Zangen, Feilen und Raspeln, Schraubenzieher, elektrischer LötKolben, Bohrmaschine (elektrisch oder

handangetrieben), Gewindeschneider – und allerlei Zubehör und Einsätze sind unentbehrlich. Auf der hinteren Buchdeckelinnenseite befindet sich eine Übersicht mit Bildern der wichtigsten Werkzeuge. Die meisten Leser werden eine Grundausstattung haben. Was wir im einzelnen brauchen, ergibt sich ganz von selbst, wenn wir bauen.

Einiges zu den *Werkstoffen* und *Bauteilen*, die wir benötigen: Sperrholz, Holzleisten, Hartpapier (1 bis 6 mm dick, beispielsweise Pertinax), Zeichenkarton; Schellack, Wasserglas, Alleskleber, Zweikomponentenkleber (z. B. Epasol EP 11); Nägel, Holzschrauben, Metallschrauben mit Muttern, Unterscheiben, Hohlriete; Weißblech (Weicheisen) von Konservendosen (die sammeln wir sehr sorgfältig), eine Dose aus Aluminiumblech, viel Weicheisenblech, 1 mm und 1,5...2 mm stark, Weicheisen-Rundstäbe mit 6, 8 und 10 mm Durchmesser.

Elektroteile: Kupferlackdraht CuL, 0,1 bis 1,0 mm Durchmesser (am meisten wird 0,4 mm gebraucht); Widerstandsdraht mit 0,2...0,5 mm Durchmesser; plastüberzogener Kupfer-Schalt-draht mit 0,5...0,75 mm Durchmesser, Kupferlitze; blankes Federmessingblech für Kontakte (beispielsweise aus alten Taschenlampenbatterien), etwa 0,5 mm stark, Telefonbuchsen, Bananenstecker, Apparatklemmen (mit gut isolierten Klemm-Muttern, die zugleich eine Buchse enthalten), Krokodilklemmen für kurzzeitige Prüfkontakte.

Das sieht – so in der Zusammenstellung – nach schrecklich viel aus, ist aber längst nicht so schlimm. Die Dinge werden erst nach und nach benötigt, und vieles bekommt man billig durch »Ausschlachten« alter Geräte.

Um den begonnenen Bau eines der beschriebenen Geräte nicht wegen »Materialschwierigkeiten« unterbrechen zu müssen, kümmern wir uns rechtzeitig um die notwendigen Bauelemente. In allen Bezirken der DDR halten die Fachfilialen RFT AMATEUR ein großes Angebot bereit. Die Tabellen 1 und 2 im Tabellenanhang enthalten Zusammenstellungen der Geräte, für deren Bau keramische Dauermagneten (Maniperm-Magneten) verwendet oder elektronische Bauelemente benötigt werden. Sind die angegebenen Typen nicht erhältlich, erlauben uns die angegebenen Kennwerte, auch andere, analoge Typen einzusetzen.

1. Kapitel

Elektroenergie wird erzeugt

Rationelle Arbeit in unserer Werkstatt

Mit dem Bauen wird es nun ernst; wir müssen nur noch überlegen, womit wir anfangen. Mit dem Leichtesten? Das liegt zwar nahe, ist aber einmal durchaus nicht nötig und zum anderen nicht folgerichtig, wenn wir die Leistungselektrik stufenweise aufbauend erleben wollen. Wir gehen nach einer anderen Einteilung vor, und zwar so: Zuerst wird die elektrische Energie *erzeugt*, dann *verteilt* man sie an die Verbraucherstellen, und hier wird sie »*verbraucht*«, das heißt ausgenutzt. Das sind die drei grundlegenden Abschnitte des Teils »Leistungselektrik«.

Um uns die Arbeit zu erleichtern, werden wir etwas bauen, was immer wieder gebraucht wird: Das ist einmal eine Vorrichtung, mit der man zweckmäßig und sauber Spulen wickeln kann. Zum anderen werden wir in »Werkstattnormen« immer wieder vorkommende Aufbauteile, wie Spulen, Winkel u. a., vereinheitlichen und damit unsere Arbeit wesentlich erleichtern.

Wickelvorrichtung für Spulen

Spulen, Spulen und nochmals Spulen, mit und ohne Kern – wir brauchen sie erstaunlich oft; die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes wird eben von allen Wirkungen weitaus am meisten ausgenutzt. Ein paar Drahtwindungen lassen sich leicht mit der Hand um einen Spulenkörper legen, aber zehntausend? Der Draht darf nicht reißen, soll glatt, Windung an Windung, liegen, und nicht zuletzt soll die Windungszahl stimmen. Das ist technisch einwandfrei und wirtschaftlich (das heißt: ohne großen Zeitaufwand) nur mit einer kleinen Vorrichtung möglich. Wir wollen sie bauen und werden staunen, mit wie wenig Mitteln das möglich ist.

Bild 2 zeigt die *Spulenwickel-Vorrichtung* mit Reibradgetriebe (1 : 6) und Zählwerk bis 9999. Von links nach rechts sehen wir:

- die Antriebscheibe (Handrad), geriffelt und mit Handgriff, links dahinter den Haltestab für die Vorratspule, von der abgewickelt wird,

- die Aufspulwelle mit dem angetriebenen Reibrad aus Gummi und mit den beiden Gummikegeln zum mittigen (zentrischen) Festklemmen des Spulenkörpers, auf den der Draht gewickelt werden soll,

- den hinteren Lagerbock für die Welle,

- auf der Frontplatte, die zugleich Lager für die Achse der Antriebscheibe und für die Spulenwelle ist, schließlich die vier Zahnräder des Zählwerkes.

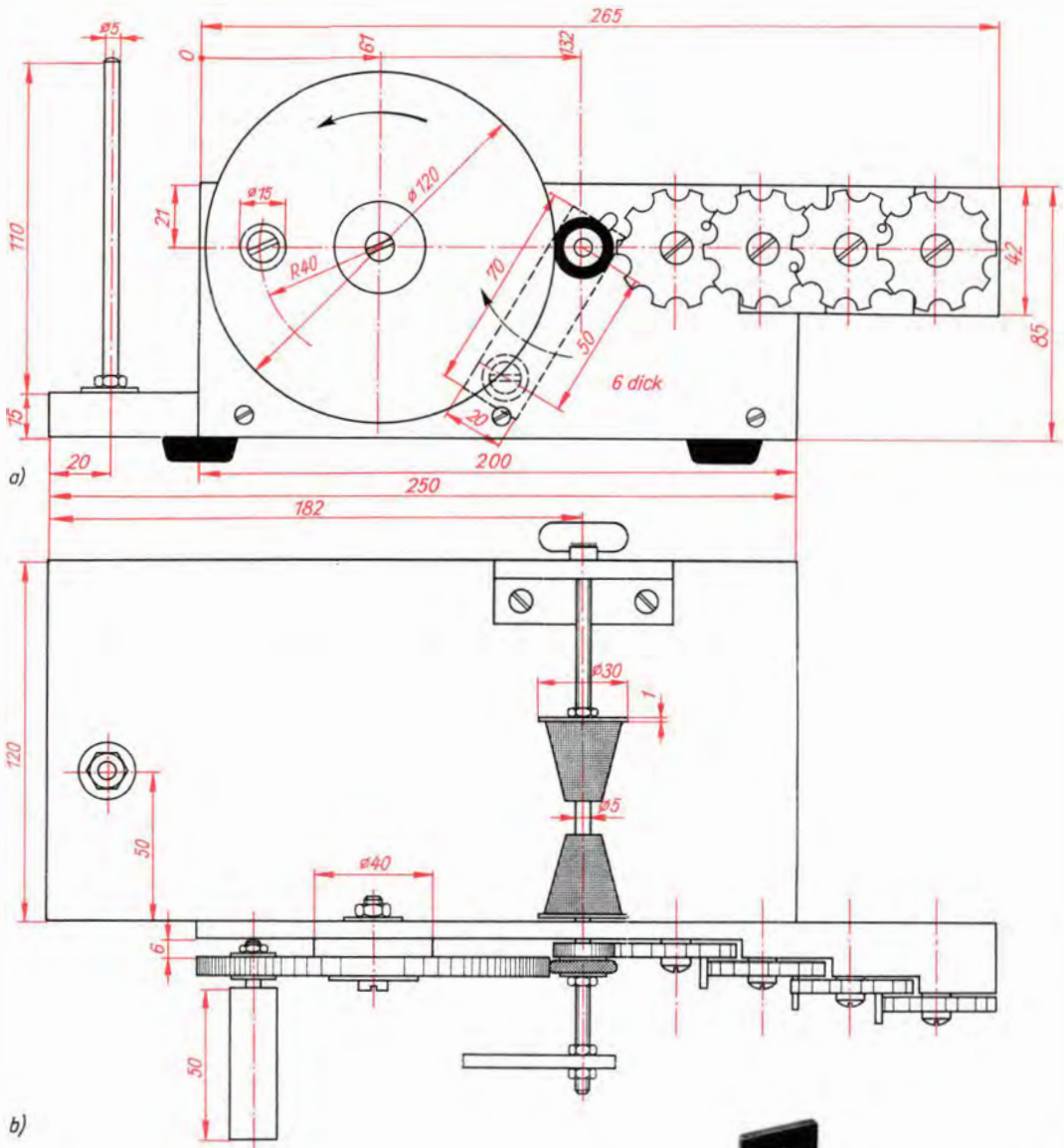


Bild 3. Maße der Wickelvorrichtung: a) Vorderansicht, b) Draufsicht



Bild 2. Unsere Spulwickelvorrichtung mit Reibrad und Zählwerk

Und alles aus ein wenig Holz (Grundbrett) mit etwa einem Dutzend Holzschrauben, einigen Metallschrauben mit Muttern, Rundstäben, etwas Gummi (zwei Stopfen und fünf FüÙe) und aus Hartpapier (6 mm dick).

Aufbau und Antrieb

Die Größe der Einzelteile entnehmen wir den Konstruktionszeichnungen, zunächst Bild 3.

Der *Handgriff* besteht aus einer langen, starken Metallschraube mit darübergeschobener Holzröhre; diese soll sich beim Drehen leicht bewegen, aber möglichst wenig freies Spiel haben. Näheres darüber und über die Lagerung der Antriebscheibe zeigt Bild 4a. Zwischen Handrad und Frontplatte liegt eine gleich starke *Abstandplatte*, die fest mit der Frontplatte durch Kleben oder – besser – vier Metallschrauben verbunden ist. Die beiden Platten erhalten fünf Bohrungen mit durchgehendem Gewinde: vier für die Metallschrauben und eine für eine stärkere Metallschraube, die als Achse für die Antriebscheibe wirkt. Eine Gegenmutter hält diese Achse in einer Lage fest, die der Scheibe gerade ausreichend Spiel zum leichten, aber nicht wackligen Drehen läÙt. Um die Scheibe noch besser zu führen, wird eine große Unterlegscheibe mit dem Schraubenkopf verlötet. Die Antriebscheibe wird links herum gedreht.

Das kleine *Reibrad* aus Gummi (Durchmesser ein Sechstel des Handrad-Durchmessers) ist auf der Welle fest mit einer aus Hartpapier hergestellten kreisrunden Scheibe verbunden, die eine *Mitnehmernase* hat (Bild 7). Die Welle, die etwa 50 mm aus der Frontplatte herausragt, hat auf dieser Länge ein Gewinde; das Reibrad und das Nasenrad (dieses mit dem Gegengewinde versehen) sowie zwei Unterlegscheiben werden damit auf der Welle mit zwei Muttern fest verschraubt (nach Bild 4b). Es handelt sich um eine *Welle*, weil sie unsere Antriebskraft auf die Kegel überträgt! *Achsen* übertragen keine Kräfte; von der Art haben wir an der ganzen Vorrichtung sechs (einschließlich der Achse des Handgriffes).

Mit dem großen Handrad können wir auch große Windungszahlen – 9999 und, wieder bei 0 beginnend, auch mehr – wickeln. Für kleine Windungszahlen genügt es, das kleine Reibrad anzutreiben; freilich müssen wir dann für jede Windung einmal

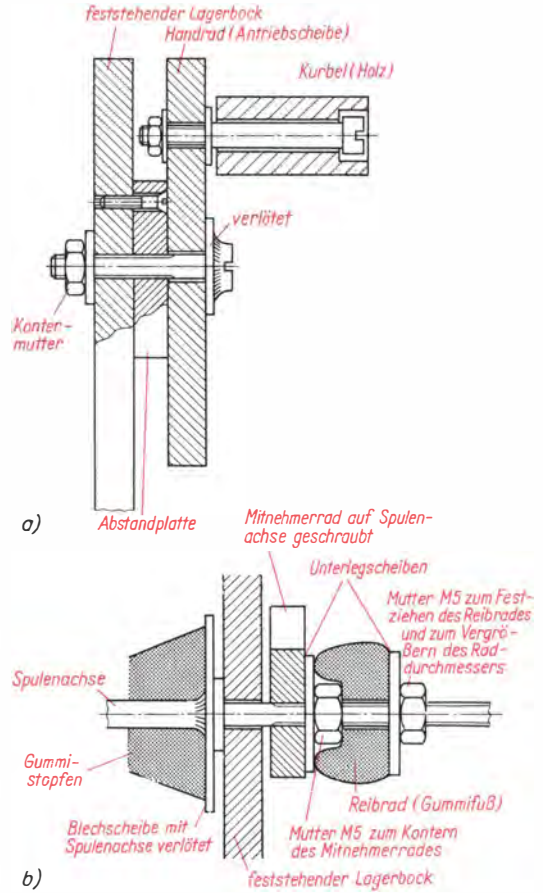


Bild 4. Teile des Antriebes: a) Handrad mit Kurbel, b) Reibrad und Mitnehmerrad (Nasenrad) auf der Welle

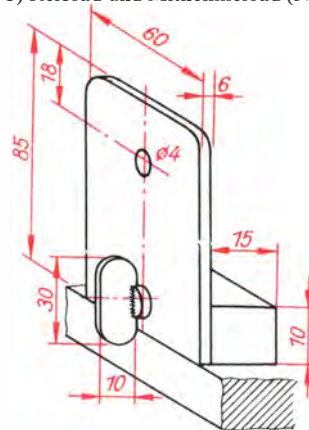


Bild 5. Lagerbock der Wickelvorrichtung

drehen, während bei einer Umdrehung der großen Antriebscheibe sechs Windungen gewickelt werden. Dafür läßt sich das kleine Rad leichter drehen. Wir versetzen dann den Handgriff an die Reibradwelle; als Kurbelhebel (Zwischenstück zwischen Welle und Handgriff) dient ein Hartpapierstück (70 mm lang und 15...20 mm breit). Es hat in etwa 50 mm Abstand zwei glatte Bohrungen von 5 mm Durchmesser für Reibradwelle und Griffachse und wird mit zwei Muttern ganz am Ende der Welle fest angeschraubt. In der anderen Bohrung wird die Griffachse verschraubt – genauso wie vorher im großen Handrad. Bild 3a verdeutlicht, wie die Kurbel an der Welle angesetzt wird.

Bild 3b zeigt in Draufsicht die Gesamtanordnung und (für uns jetzt besonders wichtig) die angetriebene Welle mit den (abgestumpften) Gummikegeln für den Spulenkörper und mit dem rückseitigen Lagerbock. Im Bild 4b erkennen wir den vorderen Wellenteil; eine ziemlich große Blechscheibe (sehr große Unterlegscheibe hinter einer beweglichen kleineren) wird mit der Welle verlötet. Dadurch sitzt der vordere Gummikegel fester. Die Welle ist von der Rückseite bis etwa zur Mitte mit Gewinde versehen, so daß der zweite (rückseitige) Kegel mit Blechscheibe und Mutter fest an den jeweiligen Spulenkörper geschraubt werden kann.

Der rückseitige *Lagerbock* (Bild 5) ist eine hochkant stehende Hartpapierplatte (etwa 85 mm × 60 mm groß); der Mittelpunkt für das Lagerloch liegt 67 mm über der oberen Grundbrettfläche. Die Lagerbockplatte muß zum Wechseln der Spule leicht und schnell ab- und aufmontiert werden können; sie wird daher mit einer einzigen *Flügelschraube* an einem kleinen Hartpapierblock (60 mm lang und mit einem Querschnitt von mindestens 10 mm × 15 mm) angeschraubt. Das Loch für die Flügelschraube erhält ein Gegengewinde. Diese Flügelschraube stellen wir her, indem wir ein längliches, gut abgerundetes Stück Blech (etwa 10 mm × 30 mm groß) in den Schlitz einer Zylinderkopfschraube einlöten. Vom Wellenende, das im eben beschriebenen Lager läuft, feilen oder drehen wir das Gewinde ab (etwa 10 mm).

Das Zählwerk zeigt die Windungszahl an

Ganz rechts, über das Grundbrett hinausragend, sind die vier Zahnräder des Zählwerkes angebracht, von links nach rechts die Einer, die Zehner, die Hunderter und die Tausender. Man muß die Windungszahl also von der Rückseite her lesen, wie in Bild 6 angegeben. Jedes Zahnrad hat zehn Zähne. Bild 7 erläutert die Herstellung aus Hartpapier: Ein Kreis mit 40 mm Durchmesser wird angerissen und in zehn Teile (je 36° des Zentriwinkels) unterteilt. An den sich so ergebenden zehn Punkten mit gleichen Bogenabständen wird je ein Loch gebohrt (8,5 mm Durchmesser). An den übrigbleibenden Teilen des Kreises sägen wir mit der Laubsäge entlang und erhalten ein Zahnrad mit zehn Zähnen und kreisförmigen Zahnflanken. Jedes Zahnrad erhält im Mittelpunkt eine Bohrung ($d = 4,1$ mm) für die Achse und eine weitere mit Gewinde nach der Zeichnung zur Befestigung einer versenkten Metallschraube als Mitnehmer. Nur das vierte Zahnrad – ganz rechts – bekommt diesen Mitnehmer nicht, weil es das letzte Rad im Zählwerk ist. Bei den Mitnehmerschrauben feilen wir am herausragenden Teil das Gewinde sorgfältig ab; ferner werden die Stirnseiten der Zähne glattgefeilt (damit sie die Ziffern gut aufnehmen) und die Zahnflanken sauber poliert (damit leicht weitergeschaltet wird).

Das ganze Zählwerk ist *dekadisch*, das heißt nach dem üblichen Zehnersystem, aufgebaut. Die Radnase bewegt bei jeder Umdrehung das *Einerrad*, dessen Mitnehmer schiebt bei jeder vollen Umdrehung (= 10 Einer-Umdrehungen) das *Zehnerad* um eine Zehntelumdrehung weiter – und so fort. Nach der Anzeige 9999 springt das Zählwerk von selbst wieder auf 0000. Die Zahnräder werden, wie Bild 6 zeigt, auf den Stufen einer »Treppe« angebracht; diese Treppe entsteht durch Aufschauben von drei Hartpapier-Rechtecken verschiedener Länge (mit Metallschrauben in Bohrungen mit entsprechendem Gewinde). Die unterste Stufe wird an der Frontplatte verschraubt; wenn diese nicht von Anfang an einen Ansatz hat, ergänzen wir sie, um die Festigkeit zu erhöhen. Die Metallschrauben – Verschrauben ist besser als Kleben geeignet – müssen versenkt werden, damit die Zahnräder nicht weit abstehen müssen.

Die flachgefeilten Stirnseiten werden mit gelbem

16 Elektroenergie wird erzeugt

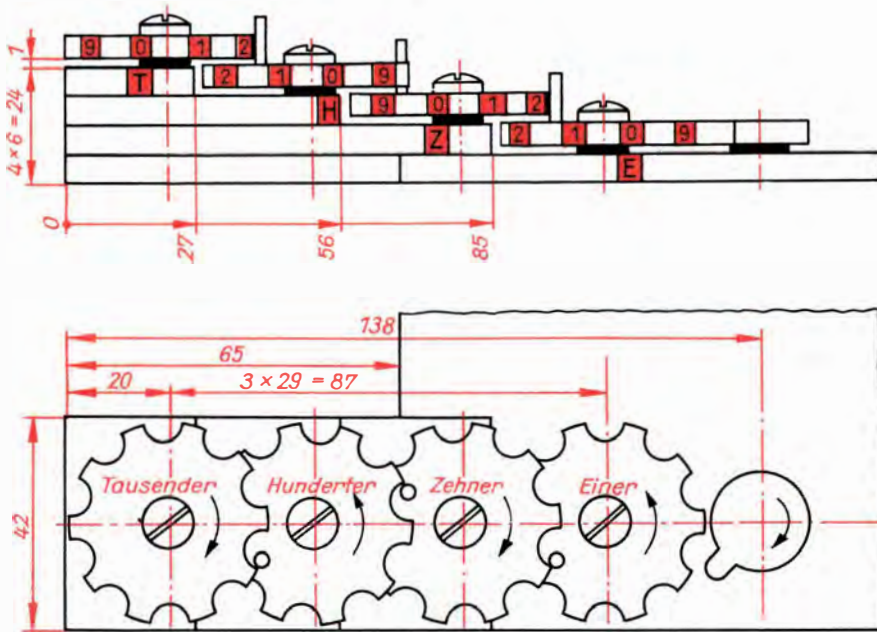
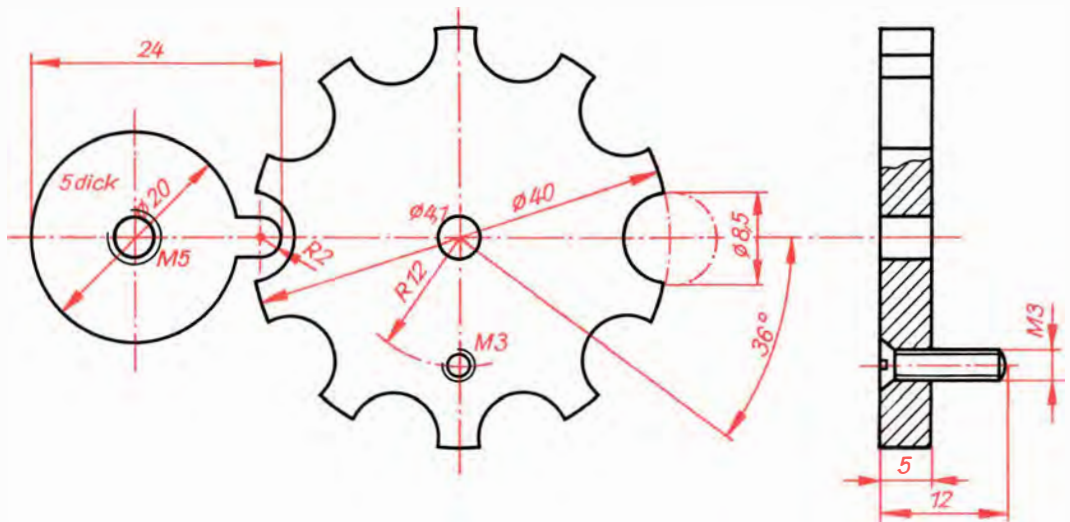
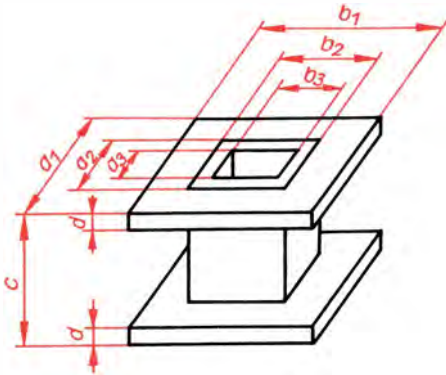


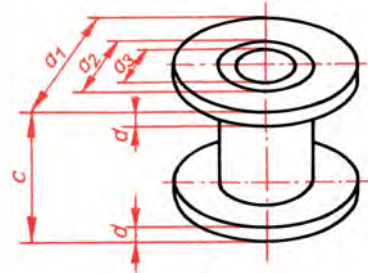
Bild 6. Zählwerk der Wickelvorrichtung, von der Rückseite her gesehen

Bild 7. Nasenrad und Einerrad

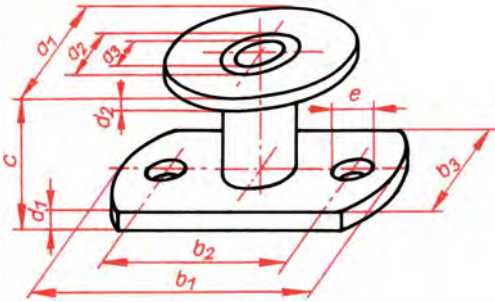




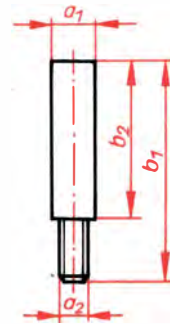
N_1 : Rechkantspulenkörper



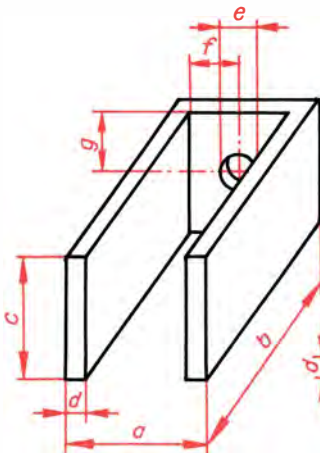
N_2 : Rundspulenkörper



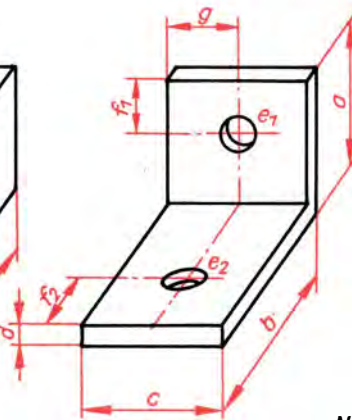
N_3 : Rundspulenkörper mit Flansch



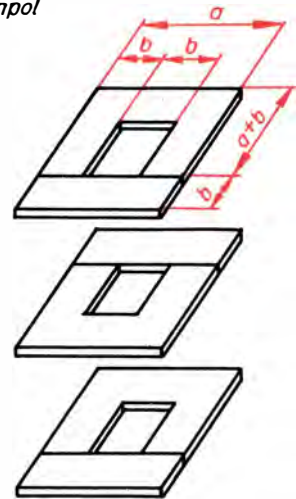
N_4 : Magnetischer Innenpol



N_5 : Magnetischer Außenpol



N_6 : Haltewinkel



N_7 : Kernbleche und ihre Schichtung

Bild 8. Unsere Werkstattnormen

oder weißem Nitrolack (Reparaturlack) gestrichen. Nach dem Trocknen tragen wir mit schwarzer Tusche und spitzer Feder die Ziffern 0...9 auf. Das Zehnerrad und das Tausenderrad laufen *im Uhrzeigersinn*, die beiden anderen *entgegengesetzt*. Dementsprechend (man muß da sehr aufpassen!) laufen die Ziffern – von oben gesehen – beim Einer- und beim Hunderterrad *von links nach rechts*, bei den beiden anderen Rädern *von rechts nach links*. Nur so wird weitergezählt. Der Mitnehmerstift wird beim Einer- und beim Hunderterrad bei der Ziffer 2, beim Zehnerrad bei der 7 angebracht.

Befestigt werden die Räder mit Zylinderkopfschrauben M4, deren Gewinde etwa 5 mm vor dem Kopf aufhört. Zwischen Rad und Treppe kommt stets eine Unterlegscheibe, etwa 1 mm dick. Die Schrauben werden so weit eingedreht, daß sich die Räder gerade noch leicht drehen lassen, aber auch nach dem Schub sofort wieder stillstehen. Diese »Selbsthemmung« muß beim Einerrad am größten sein, weil es die stärksten Schläge erhält.

Die Anfangs-(Null-)Stellung der Räder, bei der überall die Null oben liegt, wird in folgenden Stufen erreicht:

1. Alle Zahnräder so drehen, daß kein Mitnehmerstift in einer Zahnücke steht.
2. Das Tausenderrad so drehen, daß die Null auf T steht (siehe unter 6.).
3. Das Hunderterrad so weit drehen, daß sein Mitnehmerstift die Lücke zwischen 2 und 3 am Tausenderrad gerade bei 2 verlassen will.
4. Den Mitnehmerstift des Zehnerrades in die Lücke zwischen den Zähnen 8 und 7 des Hunderterrades bringen.
5. Den Mitnehmerstift des Einerrades in die Lücke zwischen den Zähnen 2 und 3 des Zehnerrades drehen.
6. Nun muß auf allen vier Rädern die Null oben waagrecht liegen. Auf den Treppenstufen kennzeichnen wir (wieder Schwarz auf Gelb oder Weiß) die jeweilige Dekadenstufe (von links nach rechts): E (Einer), Z (Zehner), H (Hunderter) und T (Tausender).
7. Die Nase des kleinen Reibrades soll waagrecht in der Lücke zwischen den Zähnen 9 und 8 des Einerrades liegen.

Leser, die einen elektromagnetischen Impulszähler (beispielsweise Gesprächszähler) besitzen, können es sich viel leichter machen: Sie bringen an der Frontplatte rechts neben dem kleinen Reibrad einen

federnden Kontakt so an, daß er bei jedem Umlauf durch die Nase einmal kurzgeschlossen wird.

Damit ist die Wickelvorrichtung fertig. Wir schrauben sie mit einer oder zwei Zwingen an der Tischplatte fest, wenn wir sie benutzen wollen.

Wir vereinheitlichen allgemeine Bauteile

Die »Vereinheitlichung« ist bereits einmal erwähnt worden. Das ist eine gute Sache. Häufiger vorkommende Bauteile baut man in gleicher oder ähnlicher Art und Größe; das vereinfacht die Arbeit. Bei uns sind das solche Bauteile wie Spulenteile, Pole, Haltewinkel und Kernbleche. Wir machen daraus sieben »Werkstatt-Normen« N₁...N₇, bei denen die Maße in den Zeichnungen nur mit Buchstaben angegeben sind. Wo immer später ein solches Bauteil auftritt, werden die Zahlenwerte von Fall zu Fall angegeben; dadurch werden nicht nur die Teile gleich oder ähnlich, wir sparen auch ständige Wiederholungen von Zeichnungen (Bild 8).

Zu beachten ist bei N₇ die gute Ausnutzung des Materials: Das aus dem Blech herausgeschnittene Rechteck verbindet als Abschlußstück (Joch) die beiden Schenkel des Bleches und bietet so den magnetischen Feldlinien einen lückenlosen Weg. Beim Aufeinanderlegen der vielen Kernbleche zu einem starken Kern legt man das Joch abwechselnd nach der einen und nach der anderen Seite; das ist sowohl für die mechanische Festigkeit als auch für den Weg der Feldlinien vorteilhaft.

Die Schalttafel, das Herz der Anlage

Beginnen wir also mit der *Erzeugung der elektrischen Energie!* Sofort denken wir an ein Kraftwerk und erinnern uns, daß darin große Schaltwarten mit *Schalttafeln* sind, in denen die Erzeugung und Verteilung der Elektroenergie gemessen, gesteuert und geregelt werden. Die Schaltwarte ist der Mittelpunkt des Ganzen, gewissermaßen Herz und Hirn zugleich. Wir brauchen solch ein – entsprechend klei-

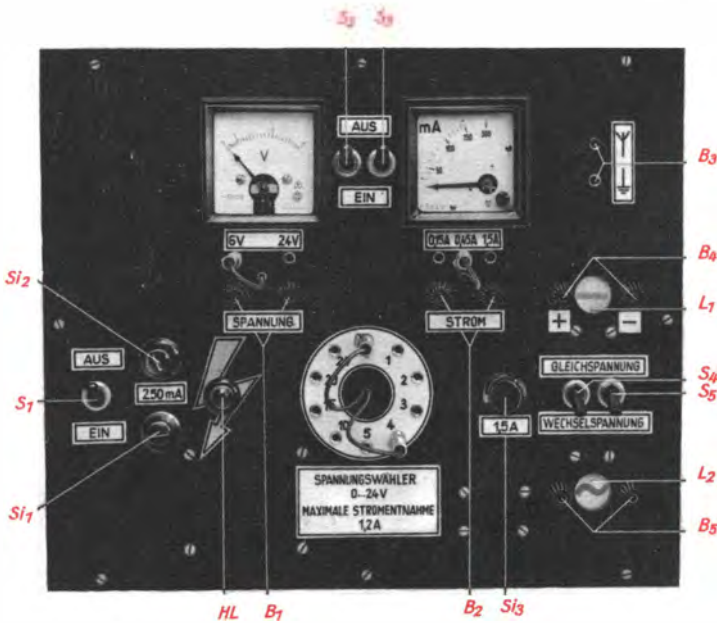
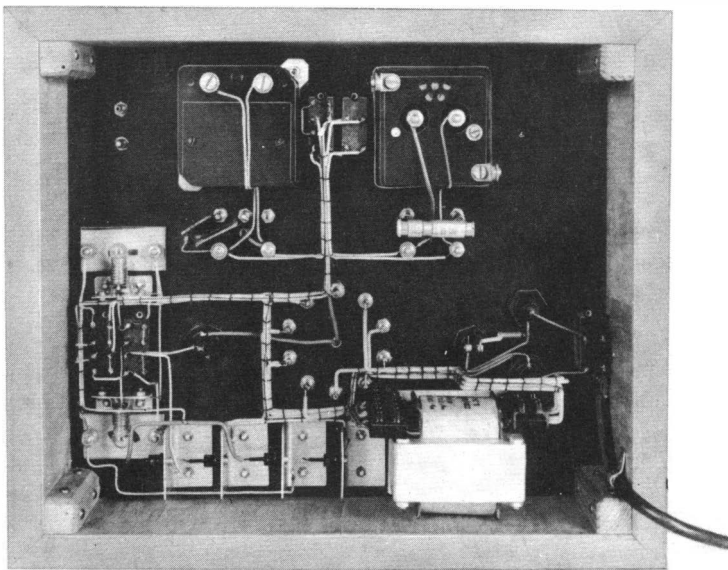


Bild 9. Vorderansicht (a) und Rückseite (b) unserer Schalttafel



b)

neres – »Herz« auch: eine *Schalttafel*, der wir ganz nach Belieben und höchst bequem die verschiedenen Spannungen entnehmen können, die wir gerade brauchen; sie werden dabei zugleich gemessen, und alles wird elektrisch gegen Überlastung abgesichert.

Leuchtzeichen geben den Schaltzustand an; ein Blick genügt – und wir wissen, was eingeschaltet ist.

Die Schalttafel ist von Anfang an so wichtig, daß sie als erstes elektrisches Gerät gebaut werden soll.

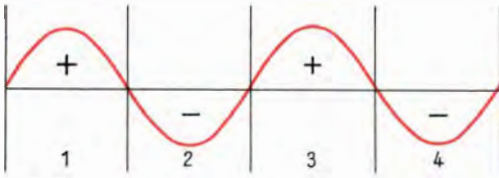


Bild 10. Schwingungsverlauf einer Wechselspannung

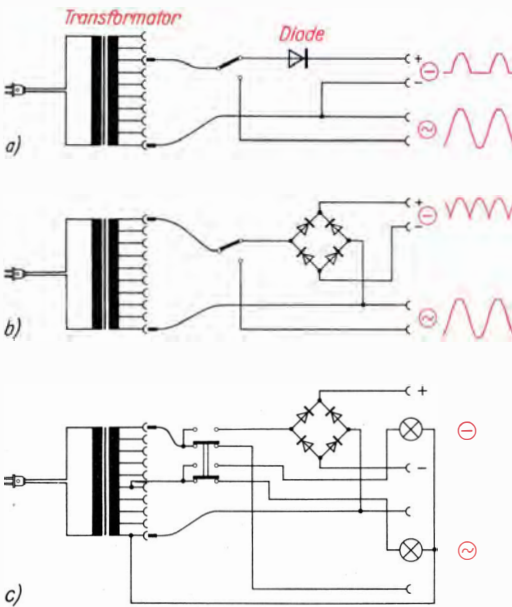


Bild 11. Gleichrichterschaltungen: a) mit einer Gleichrichterdiode, b) mit einer Graetzschaltung (pulsender Gleichstrom ohne Strompausen), c) mit einem zwei-poligen Umschalter und Anzeigelampen

Andererseits brauchen wir dazu verschiedene Dinge, die erst später erläutert werden. Uns bleibt daher nichts anderes übrig, als zunächst einmal genau nach Anleitung zu arbeiten; der »Vorgriff« gleicht sich mit der Zeit von selbst aus. Die Tafel verlangt, weil sie an das *Lichtnetz* angeschlossen wird, auch einige Anschaffungen: Meßgeräte, Schalter, Sicherungen, Dioden. Diese Ausgaben lohnen sich jedoch.

Bild 9 zeigt die Tafel mit den geschalteten Einzelteilen. Oben sind *Spannungsmesser* und *Strom-*

messer versenkt eingebaut; Meßbereiche 24 V und 1,5 A. Jedes Meßgerät kann durch den danebenliegenden *Kippschalter* S_2 bzw. S_3 ausgeschaltet werden. Ist ein Meßgerät abgeschaltet, so ist es zugleich aus dem ganzen Schaltungssystem herausgenommen; wir können es dann über das darunterliegende Apparateklemmenpaar B_1 oder B_2 von außen für jede Schaltung benutzen, die wir für Experimente oder Eichungen aufgebaut haben.

Die *Meßgeräte* sind ein Beispiel für zweckmäßige Größe und Bereiche; wer andere geeignete Bauarten hat, kann sie selbstverständlich einbauen. Freilich: Weicheisen-(Dreheisen-)Meßsysteme müssen es sein, denn nur die sprechen auf Wechselstrom und Gleichstrom an. Ganz rechts enthält die Schalttafel je eine Buchse B_3 für Erdleitung und Antenne.

In der unteren Hälfte der Tafel ist zunächst der zweipolige *Hauptschalter* S_1 angeordnet. Es folgen zwei Sicherungen 250 mA (Si_1 und Si_2) für den Netzstromeingang und die Hauptlichtanzeige (HL). Schalten wir den Hauptschalter ein, so leuchtet HL auf. Das ist eine Glimmlampe 220 V, die mit Fassung und eingebautem Vorwiderstand zu kaufen ist. Den Hauptschalter schalten wir auch aus, wenn uns irgendeine Wirkung im Experiment bedenklich vorkommt.

Auf den jetzt folgenden, wichtigsten Teil der Tafel, den *Transformator* (Umspanner), kommen wir im Anschluß an diese Beschreibung zurück. Vom Transformator führen zehn Leitungen zu dem zentral gelegenen *Spannungswähler*. Er besteht aus zehn kreisförmig angeordneten Telefonbuchsen mit den Spannungen 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 und 24 V. An diesen Buchsen werden mit zwei Steckern die Spannungsbereiche geschaltet. Das ist sehr praktisch, denn wir können nicht nur von Null abgreifen, sondern auch zwischen je zwei beliebigen Buchsen. Als letztes folgt die sehr wichtige *Umschaltung* auf Gleichspannung oder Wechselspannung (wir können auch sagen: Gleichstrom oder Wechselstrom). Dazu nehmen wir zwei gleichzeitig zu bedienende zweipolige (S_4 und S_5) oder einen vierpoligen Umschalter. Dann leuchtet die jeweils zugehörige Lichtanzeige auf: L_1 (mit dem waagerechten Strich als Gleichspannungszeichen) oder L_2 (mit dem Schwingungszeichen für Wechselspannung). An den Klemmenpaaren B_4 und B_5 neben den Lichtanzeigen nehmen wir die eingeschalteten Spannungen ab. Ein Irrtum ist durch die Anzeige weitgehend ausgeschlossen.

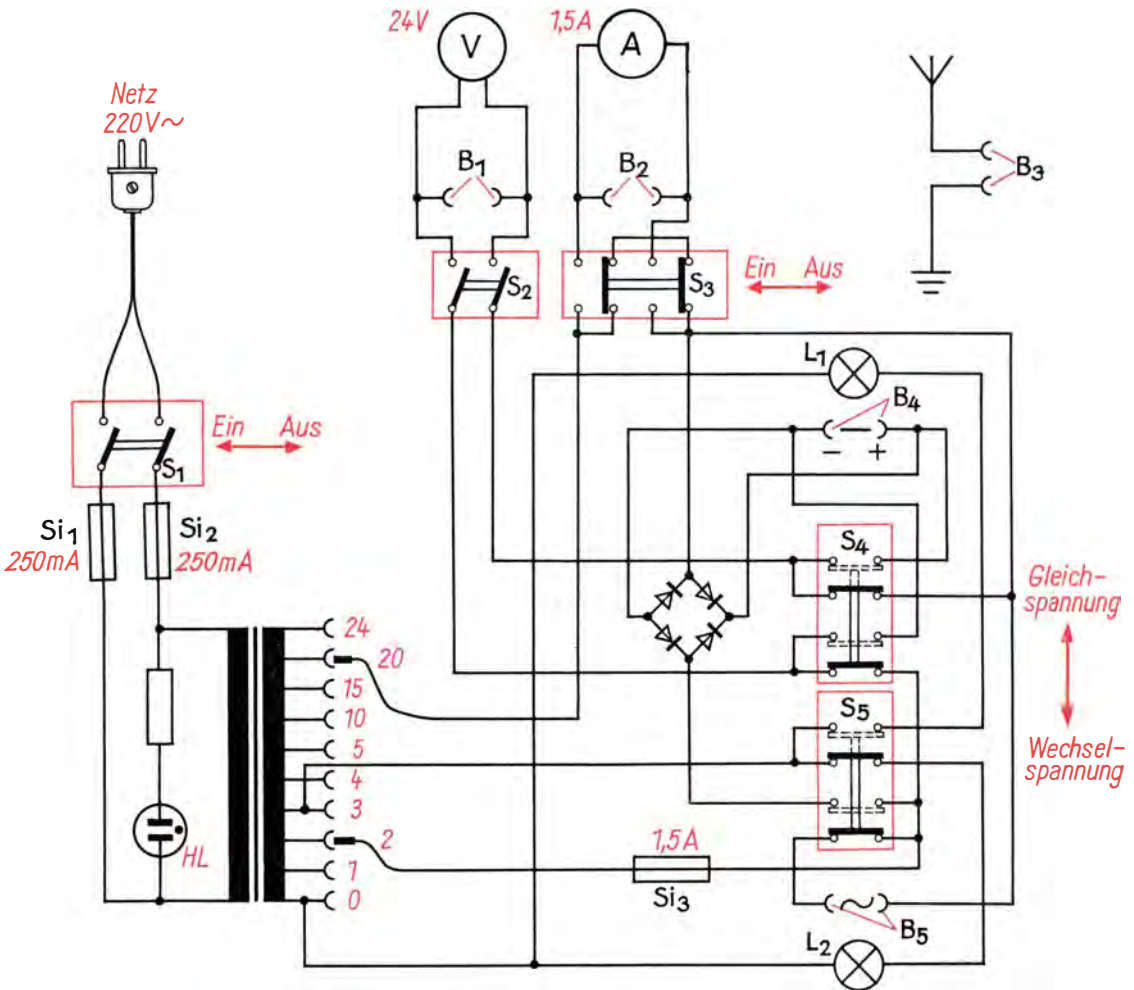


Bild 12. Schaltung unserer Tafel

Etwas von außen nicht Sichtbares gehört zu dieser Umschalteneinrichtung: der *Gleichrichter*, der uns die Gleichspannung liefern soll. Wir beziehen aus dem Netz Wechselspannung; Bild 10 zeigt zwei Perioden seiner Schwingung. Zwei Halbperioden (1 und 3) haben eine positive Spannung, die anderen zwei (2, 4) eine negative, oder anders ausgedrückt: Die Spannung wechselt in jeder Periode (1 + 2, 3 + 4) zweimal ihre Richtung. Unsere Netzspannung hat 50 Hertz (Hz, Perioden je Sekunde) und wechselt daher 100mal in der Sekunde ihre Richtung.

Der einfachste Weg, dieses Wechseln der Richtung zu vermeiden, ist das Absperren der anderen Richtung durch ein elektrisches Ventil, eine *Halbleiterdiode* (Bild 11a). Die negativen Schwingungshälften sind verschwunden; aber sie hinterlassen entsprechende Lücken zwischen den positiven Hälften. Das ist unwirtschaftlich. Viel besser ist es, die negativen Schwingungshälften ebenfalls mit zu nutzen (Bild 11b). Dazu braucht man zwar vier Dioden in *Graetzschaltung*, aber das lohnt sich. Diese Gleichrichtung benutzen wir auch in unserer Schalttafel; Bild 11c zeigt die Schaltung des Gleichrichter-

teiles mit Lichtanzeigen im Prinzip. Eine Sicherung (S_{i3} , 1,5A) schützt den Sekundärstromkreis des Transformators vor Überlastung. Bild 12 enthält die *Schaltung aller Teile* hinter der Frontplatte. Das Quadrat mit den vier Dioden (etwa in der Mitte des Bildes) ist der Gleichrichter in Graetzschaltung.

Wir beginnen mit dem Bau des Transformators

Er soll folgende elektrische Daten haben (Bild 13a): Primärspannung $U_p = 220\text{ V } \sim$, Sekundärspannung $U_s = 0 \dots 24\text{ V } \sim$, maximaler Sekundärstrom $I_{s, \max} = 1,2\text{ A}$. Wer einen geeigneten Transformator besitzt, beispielsweise einen sekundärseitig regelbaren Modelleisenbahntrafo, kann natürlich auch diesen in die Tafel einbauen, muß dann aber unter Umständen den Netzstrom (S_{i1} und S_{i2}) und den Sekundärstrom (S_{i3}) anders absichern.

Wir wickeln den Transformator entweder selbst oder übertragen diese Arbeit einem Elektrofachmann. Den Eisenkern gewinnen wir am billigsten aus einem alten Trafo der Größe M74 mit $7,4\text{ cm}^2$ Eisenquerschnitt. *Größer darf der Kern sein, jedoch nicht kleiner!* Wahrscheinlich können wir auch den Spulenkörper wiederverwenden; andernfalls bauen wir ihn selbst. Er wird aus schellackgetränkter Pappe mit folgenden Maßen in Millimetern nach unserer Werkstattnorm N_1 angefertigt: $a_1 = 63$, $a_2 = 36$, $b_1 = 49$, $b_2 = 25,5$, $b_3 = 23,5$, $c = 49$, $d = 1,5$.

Die Pappe wird erst geschnitten, dann zum Spulenkörper verklebt und schließlich nochmals mit Schellack getränkt. Der Spulenkörper muß an jeder Stirnseite sechs längliche Löcher zum Durchführen des Drahtes haben (Bild 13b). Den Draht des alten Transformators verwenden wir nicht wieder, weil der spröde gewordene Isolierlack beim Neuwickeln sehr leicht abspringt. Wir kaufen neuen Kupferlackdraht. Für die Primärspule, die an das Lichtnetz angeschlossen wird, brauchen wir etwa 200 m mit einem Nenndurchmesser von 0,3 mm (CuL 0,3). Mit Lack ist der Draht 0,33 mm dick. Die Sekundärspule wird aus CuL 0,8 gewickelt (Drahtdurchmesser 0,84 mm); wir benötigen etwa 30 m.

Zur *Isolation* der einzelnen Lagen dienen Ölpapier und Ölleinen. Zuerst wickeln wir auf unserer Spulenwickelvorrichtung die *Primärspule*. An den Drahtanfang löten wir etwa 10 cm plastisolierte

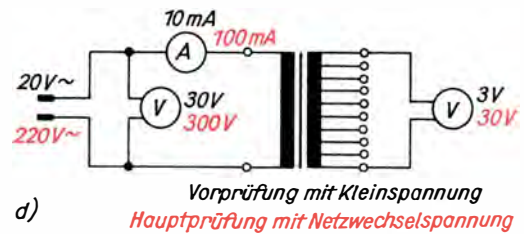
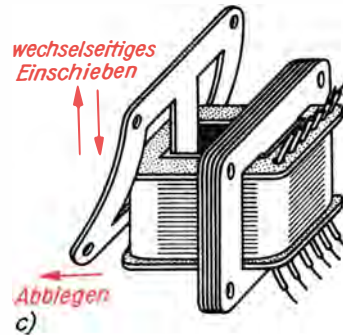
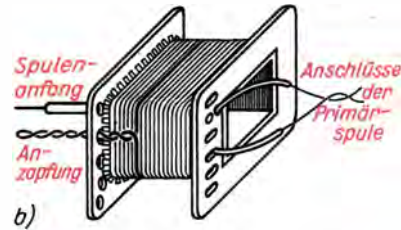
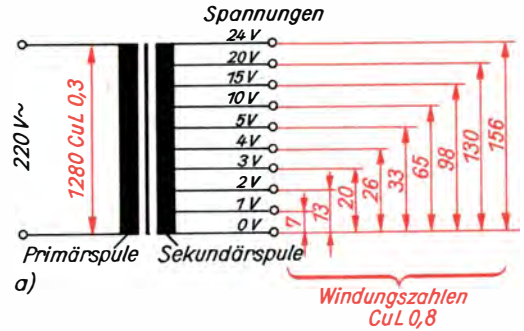


Bild 13. Zum Transformator der Schalttafel: a) Spannungen und Windungszahlen, b) so zapfen wir die Sekundärspule an, c) so schieben wir die Kernbleche in den Spulenkörper, d) Schaltung für die Funktionsprüfungen

Schalllitze, stecken sie durch eine Öffnung des Spulenkörpers und sichern sie mit Heftpflaster oder T-Band (das ist einseitig gummiertes Krepppapier) auf dem Spulenkörper. Die Lötstelle wird wie ein Lesezeichen im Buch in ein gefaltetes Stück Ölleinen gebettet. Dann wickeln wir die erste Lage sauber Windung an Windung.

Ist die erste Lage fertig gewickelt, wird sie mit einem 50 mm breiten Streifen Ölpapier abgedeckt (isoliert), den wir vorher an den langen Seiten etwa 4 mm tief kammartig eingeschnitten haben. Die so entstandenen kleinen Streifen legen sich an die Stirnseiten des Spulenkörpers (im Bild 13b deutlich erkennbar) und verhindern, daß die folgende Drahtlage auf die erste Lage abrutscht. Dann wickeln wir die zweite Lage zu der Stirnseite hin, an der wir begonnen haben, isolieren erneut und setzen dieses Hin-und-Her-Wickelspiel mit Isolation über jeder Lage so lange fort, bis das Zählwerk 1280 anzeigt. So viele Windungen muß die Primärspule erhalten! An das Drahtende wird – wie am Drahtanfang – Schalllitze gelötet, die Lötstelle abgedeckt, mit T-Band gesichert und die Litze aus dem Spulenkörper herausgeführt. Die fertige Primärspule decken wir mit mindestens zwei Lagen Ölleinen (wie die übrigen Isolierstreifen kammartig eingeschnitten) ab. Diese Isolation ist sehr wichtig, weil wir unter allen Umständen einen elektrischen Kontakt zwischen der netzverbundenen Primärspule und der Sekundärspule vermeiden müssen.

Nun wickeln wir die *Sekundärspule*. Sie soll die bereits genannten Spannungen abgeben können. Die Spannungen und die dazu notwendigen Windungszahlen gibt Bild 13a an. Bild 13b zeigt, wie die Spule angezapft wird. Über den verdrillten Draht schieben wir ein Stück Isolierschlauch. Auch bei der Sekundärspule wickeln wir sauber Windung an Windung und isolieren jede Lage. Die fertige Wicklung überkleben wir mit T-Band. Damit die Spule gefällig aussieht, decken wir das Ganze noch mit einem Streifen Ölleinen oder Zeichenkarton (nicht eingeschnitten) ab. Der Karton wird hinterher mit Schellack gestrichen.

Nach dem Trocknen werden die Kernbleche wechselseitig eingeschoben (Bild 13c). Nach dem Ende zu macht das Stopfen des Kernes Schwierigkeiten. Wir müssen das Blechpaket mehrmals im Schraubstock zusammenpressen, um Platz für alle Bleche zu schaffen. Die Bleche werden mit vier Schrauben M4 fest zusammengehalten. Zugleich

werden zwei Winkel aus Eisenblech mit angeschraubt, mit denen der Transformator an der Schalttafel befestigt wird. Die Maße der Eisenwinkel sind nach Werkstattnorm N_6 (in mm): $a = 15$, $b = 10$, $c = 74$, $d = 1$, $e_1 = 3,1$ (zweimal), $e_2 = 4,2$ (zweimal), $f_1 = f_2 = 5$, $g_1 = g_2 = 5$, $h_1 = h_2 = 64$.

Nun werden alle aus dem Spulenkörper herausragenden Drähte auf 15 mm Länge und die Isolierschläuche auf 10 mm gekürzt; die freien Drahtenden (5 mm lang) sind von der Lackschicht zu befreien und zu verzinnen. Bei den verdrillten Drähten der Anzapfungen werden die beiden Drähte stets miteinander verlötet.

Jetzt folgt die *Funktionsprobe!* Sie ist ein wichtiger Teil unserer Arbeit, der sich bei allen Geräten wiederholt und sorgfältig durchgeführt werden muß. Zur Sicherheit prüfen wir unseren Transformator zunächst an einer primärseitig angelegten Kleinspannung, z. B. 16 oder 20 V ~. Bild 13d zeigt die Prüfschaltung. Bei 20 V wurden am Mustertransformator 3,5 mA Leerlaufstrom (Primärstrom bei unbelasteter Sekundärspule) sowie eine maximale Sekundärspannung von 2,3 V gemessen. Diese Werte sind Richtwerte; ein Leerlaufstrom von 3...5 mA ist normal. Ist er wesentlich größer, so liegt ein Fehler vor, vermutlich ein Kurzschluß in der Wicklung. Dann hilft nur eines: alles auseinanderbauen und mit noch größerer Sorgfalt wickeln und isolieren! Man sieht: Größte Sorgfalt schon von Anfang an lohnt sich.

Ist die »Vorprüfung« mit der Kleinspannung erfolgreich verlaufen, so folgt die »Hauptprüfung« mit der Netzspannung. *Diese Prüfung führen wir auf keinen Fall selbst durch; wir überlassen sie einem Fachmann.* Die Prüfschaltung entspricht der für Kleinspannung, nur müssen die Bereiche der Meßgeräte entsprechend größer sein.

Bei der Hauptprüfung des Mustertransformators ergaben sich folgende Meßwerte (wieder als Richtwerte anzusehen):

$$U_p = 220 \text{ V}; I_L = 55 \text{ mA}; U_{s1} = 1 \text{ V}; U_{s2} = 2,1 \text{ V}; U_{s3} = 3,2 \text{ V}; U_{s4} = 4,2 \text{ V}; U_{s5} = 5,3 \text{ V}; U_{s6} = 10,6 \text{ V}; U_{s7} = 15,6 \text{ V}; U_{s8} = 21 \text{ V}; U_{s9} = 25 \text{ V}.$$

Bei der maximalen Stromentnahme von $I_s = 1,2 \text{ A}$ fällt die Sekundärspannung auf $U_{s9} = 23,5 \text{ V}$ ab, der Primärstrom beträgt $I_p = 165 \text{ mA}$. Bild 14 zeigt, wo und welche Löcher in die *Frontplatte* aus Hartpapier (4...6 mm dick) gebohrt, gesägt und nachgefeilt werden müssen.

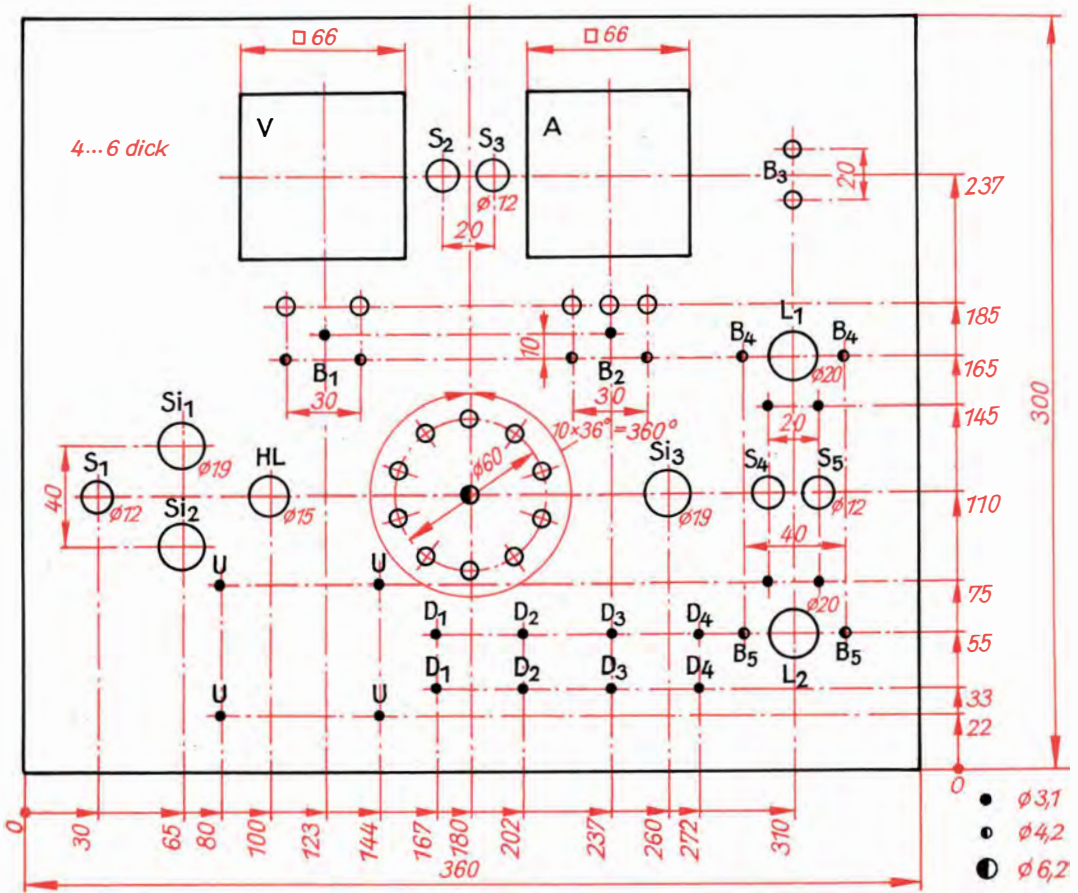


Bild 14. Frontplatte der Schalttafel

Befestigung der Einzelteile und Verdrahtung

Wir bevorzugen Senkschrauben, weil sie nicht herausragen und dadurch das Aussehen der Frontplatte verbessern. In alle Bohrungen von 6,2 mm Durchmesser setzen wir *Telefonbuchsen* ein, in B₁, B₂, B₄ und B₅ schrauben wir *Apparatekl*men fest. Si₁, Si₂ und Si₃ nehmen je ein Gehäuse für *Einbausicherungen* auf, S₁ und S₂ je einen zweipoligen *Kipp-Umschalter*. HL ist für ein Glimmlampengehäuse für die *Hauptlichtanzeige* bestimmt.

Mit den Klemmen B₄ und B₅ befestigen wir zugleich die mit schwarzer Tusche auf Transparent-

papier übertragenen Zeichen für die Spannungsart — und ~ (Bild 15a), von der Frontplatte her gesehen zuerst eine Lage Transparentpapier, dann das Papier mit dem Zeichen und schließlich *Piacryl* (*Plexiglas*), alles etwa 25 mm × 60 mm groß. Die Zeichen können auch farbig sein, beispielsweise — rot, ~ blau. Hinter den Öffnungen an diesen Stellen bringen wir (Bild 15b) mit Hilfe von zwei Blechwinkeln je eine Fassung E 10 für Glühlämpchen (3,8 V/0,07 A) an. Die Blechwinkel erhalten nach N₆ die Maße (in mm): a = 10, b = 15, c = 35, d = 1, e₁ = e₂ = 3,1, f₁ = f₂ = 5, g₁ = 7,5, g₂ = 6, h₁ = 20, h₂ = 23 (bei einem Lochabstand der Fassung 23 mm). Die Winkel werden in den 3,1-mm-Bohrungen unterhalb von L₁ und

oberhalb von L_2 an die Frontplatte geschraubt. Den Transformator befestigen wir bei U (viermal).

Es folgen die *Meßgeräte*; sie werden nach der jeweiligen Vorschrift eingesetzt und befestigt. Vorsicht, daß Gehäuse und Glas nicht springen! Die vier Dioden für den Gleichrichter in Graetzschaltung setzen wir zur Kühlung auf Aluminiumblechwinkel und schrauben diese in $D_1 \dots D_4$ an der Frontplatte fest. Die Maße der Blechwinkel sind nach N_6 (in mm): $a = 25$, $b = 30$, $c = 40$, $e_1 = 3,1$ (zweimal), $e_2 = 3,1$ (einmal), $f_1 = f_2 = 15$, $g_1 = 9$, $g_2 = 20$, $h_1 = 22$ (bei $h_2 = 0$). Die richtige Anordnung zeigt Bild 15c.

Es folgt das *Verdrahten* nach Bild 12, als erstes der Netzanschluß des Transformators. Er muß, wie schon erwähnt, der hohen Spannung wegen besonders sorgfältig ausgeführt werden. Wir wollen beim

Verlegen der Leitungen darauf achten, daß zum Schluß *Kabelbäume* gebunden werden können. Die zweiadrige Zuleitung, die an einem Ende einen zwei-poligen Stecker trägt, wird von der Rückseite der Schalttafel eingeführt und zunächst mit einer Schelle innen sicher (gegen Zug) befestigt, die beiden Enden des Kabels werden mit dem Hauptschalter S_1 (Bild 16a) verlötet. Von S_1 führen zwei Leitungen zu den Sicherungen Si_1 und Si_2 . Von diesen laufen zwei Leitungen zu den Anschlüssen der Primärspule des Transformators. Sämtliche Transformatorverbindungen erfolgen über Lüsterklemmen. Parallel zur letztgenannten Verbindung liegt in Reihe mit einem Widerstand von etwa $500 \text{ k}\Omega$ die *Hauptlichtanzeige* HL (Glimmlampe), die nur zugleich mit dem Trafo ihre Spannung erhält und dadurch anzeigt, ob dieser eingeschaltet

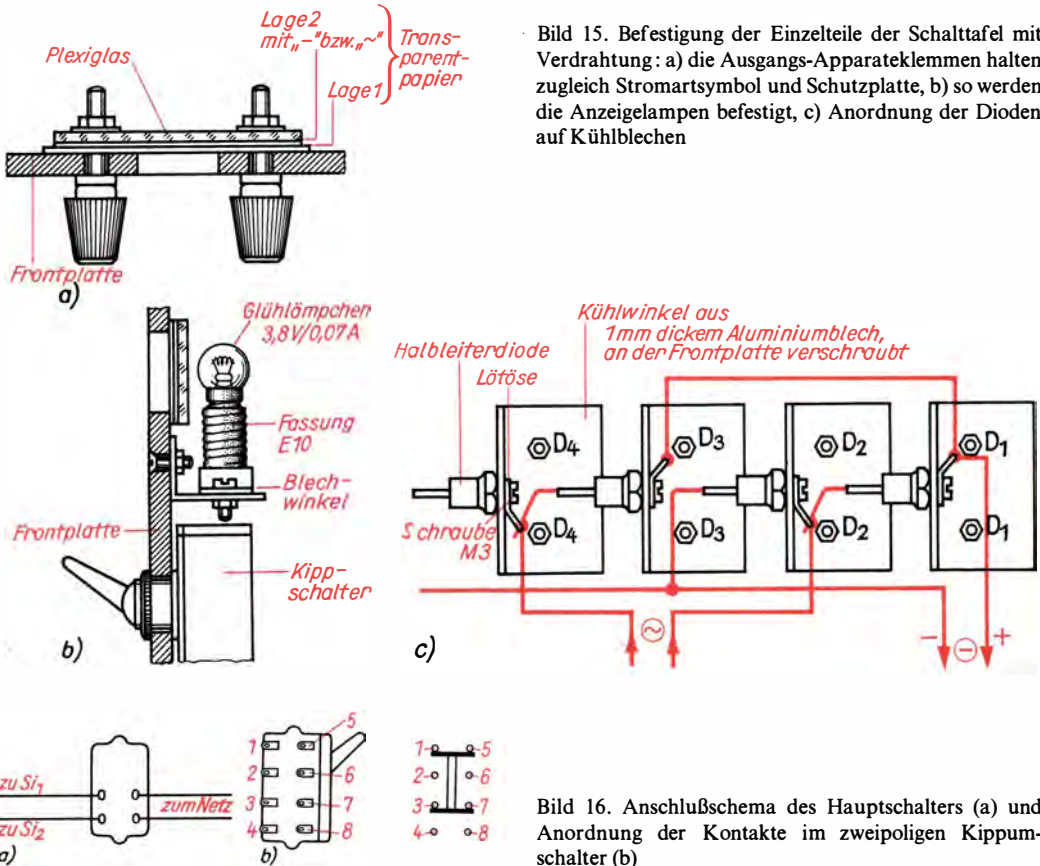


Bild 15. Befestigung der Einzelteile der Schalttafel mit Verdrahtung: a) die Ausgangs-Apparateklammern halten zugleich Stromartsymbol und Schutzplatte, b) so werden die Anzeigelampen befestigt, c) Anordnung der Dioden auf Kühlblechen

Bild 16. Anschlussschema des Hauptschalters (a) und Anordnung der Kontakte im zwei-poligen Kippschalter (b)

ist. Die Sicherungen S_1 und S_2 erhalten (»flinke«) Radio-Sicherungsensätze (in Glasröhrchen) zu 250 mA.

Die Anschlüsse der Sekundärspule des Transformators verbinden wir in der richtigen Reihenfolge mit den Telefonbuchsen des Spannungswählers. Die Anschlüsse für die gesamte weitere Tafelanlage werden mit zwei Bananensteckern wahlweise verbunden. Diese Stecker werden daher über zwei gute einadrige Litzen (also biegsam) an den Schalter S_3 und die Sicherung S_3 angeschlossen. Bild 12 gibt genaue Auskunft über Verdrahtung und Schaltung.

Als nächstes verdrahten wir den Wechselspannungsteil, danach den Gleichspannungsteil mit dem Graetzgleichrichter. Bild 15c zeigt, wie die vier Dioden zusammengeschaltet werden. Die Anschlüsse für die Anzeigeleuchten werden an die Buchsen 0 und 3 des Spannungswählers gelötet und über S_5 geführt.

Bild 16b erklärt die Wirkungsweise eines zwei-poligen *Kipp-Umschalters*, der immerhin acht Kontakte hat; die Zahlen geben an, wie die Kontakte außen und innen zusammenhängen und wie sie verbunden oder getrennt werden.

Die Meßgeräte signalisieren den elektrischen Zustand

Wir bauen möglichst einfach und wirtschaftlich und begnügen uns mit einem Spannungsmesser und einem Strommesser, die je einen Meßbereich haben; an der Schalttafel sollen Spannung und Strom ja nur »im groben« überwacht werden. Die Bereiche, in denen unsere Geräte arbeiten, sind schon genannt worden. Es müssen Weicheisen-(Dreheisen-) Meßgeräte sein, weil diese bei Wechselstrom *und* bei Gleichstrom anzeigen, und wir haben beide Arten zu messen. Beide Meßgeräte liegen im Sekundär-(Niederspannungs-)Kreis des Transformators, in unserem eigentlichen Arbeitsbereich, in dem wir schalten und messen. Der Strommesser ist wie immer in Reihe geschaltet, der Spannungsmesser parallel zu den Ausgängen B_4 und B_5 . Das bedingt, daß der Strommesser stets auch den Stromverbrauch des Spannungsmessers mit anzeigt, falls dieser eingeschaltet ist. Bei *Wechselstrom* ist dieser Fehler nicht sehr groß, weil der Strom, der durch die »Feldspule« des Meßgerätes fließt, nicht nur durch den Ohmschen Widerstand der Spule be-

grenzt wird, sondern auch noch durch den »induktiven Widerstand« (infolge der Selbstinduktion der Spule) erheblich geschwächt wird. Mit unserem Strommesser kann man die zusätzliche Belastung durch den Spannungsmesser jedoch noch beobachten.

Ganz anders bei Entnahme von *Gleichstrom*. Hier läuft alles über den Gleichrichter, und der verbraucht leider schon einen Teil unserer Energie. Die Gleichspannung liegt 20...25 Prozent niedriger als die anliegende Wechselspannung.

Bei einem Spulenwiderstand von $R = 80 \Omega$ und einer Gleichspannung von $U = 24 \text{ V}$ durchfließen nach dem Gesetz $I = \frac{U}{R}$ insgesamt $I = \frac{24 \text{ V}}{80 \Omega} = 0,3 \text{ A}$

die Spule; das ergibt für den Spannungsmesser einen Leistungsbedarf von $P = U \cdot I = 24 \text{ V} \cdot 0,3 \text{ A} = 7,2 \text{ W}$ (Watt, $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$). Wir schalten daher nur vorübergehend ein. Bei Belastung des (schwächeren) Gleichstromkreises sinkt auch die Spannung entsprechend.

Manche Leser fragen jetzt vielleicht: Warum nehmen wir nicht Meßgeräte mit kleinem Meßbereich, etwa 6 V und 150 mA, und machen sie durch Widerstände umschaltbar auf 24 V sowie 450 mA und 1,5 A? Die Antwort: Weil das – im Gegensatz zu Drehspul-Meßgeräten – bei Weicheisen-Meßgeräten und Wechselstrom schwierig ist. Durch den Wechselstrom werden Feldspule und Nebenwiderstände bei Strommessern verschieden beeinflußt. In der Praxis teilt man die Spule in mehrere (einzeln oder zusammen einschaltbare) Teile auf oder wechselt die Feldspule von Fall zu Fall aus. Bei Spannungsmessern ist es mit den Vorwiderständen etwas leichter. Wer will, kann es versuchen; er muß dann die Schaltungen nach Bild 17 benutzen. Das Umschalten erfolgt am einfachsten über ein Stück Litze mit Stecker und zwei (bei der Spannung) oder drei (bei der Stromstärke) Buchsen unterhalb der Meßgeräte. Abgleichen oder eichen müssen wir mit (geliehenen) Meßgeräten der gewünschten Bereiche – unbedingt stets mit Wechselstrom. Entweder zeichnen wir dann zusätzliche Skalen auf die Skalenplatte der Meßgeräte, oder wir stellen Zahlentabellen als Vergleich zur alten Skale auf. Haben wir sehr viel Glück und sind die Abweichungen gleichmäßig abhängig (linear), dann können wir auch »Koeffizienten« finden, mit denen wir die ursprünglichen Werte multiplizieren, um die Werte der neuen Bereiche zu erhalten.

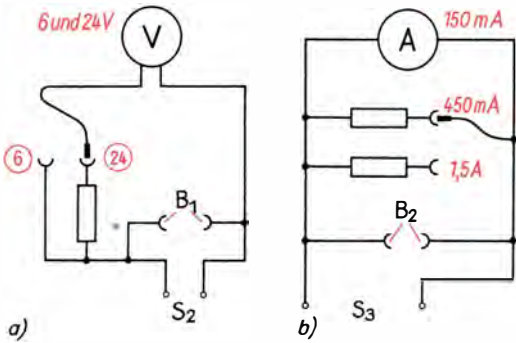


Bild 17. Meßbereiche beim Spannungsmesser (a) und beim Strommesser (b)

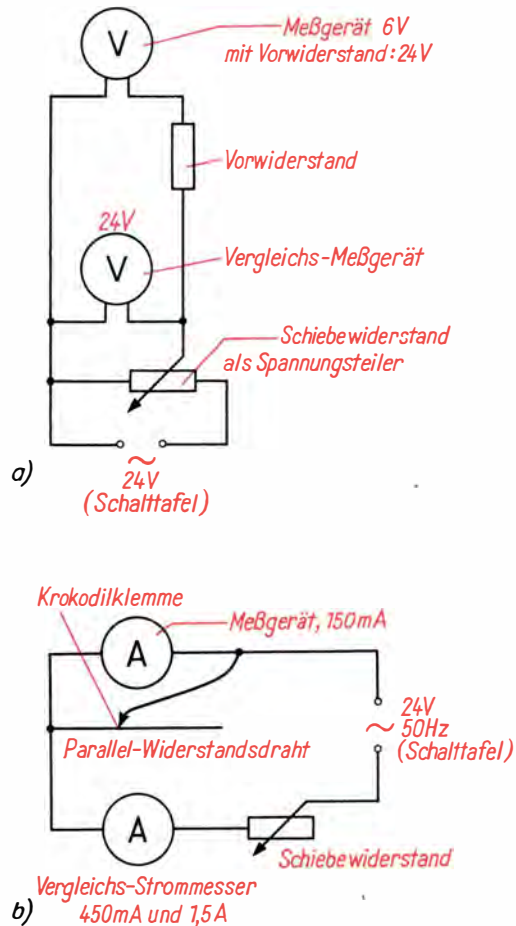


Bild 18. Eichschaltungen für den Spannungsmesser (a) und für den Strommesser (b)

Zum Spannungsmesser bauen wir einen *Vorschaltwiderstand*. Hat das Meßgerät 20 Ω bei einem Bereich von 6 V, so erhalten wir 24 V, wenn wir $24\text{ V} - 6\text{ V} = 18\text{ V}$ als Spannungsabfall auf den Vorwiderstand verteilen. 60 Ω muß der Vorwiderstand, der in Reihe zur Feldspule geschaltet wird, theoretisch haben; auf je 20 Ω entfallen 6 V, die letzten im Spannungsmesser, der nun bis 24 V anzeigt. Wir benutzen Widerstandsdraht von 0,10 bis 0,20 mm Durchmesser (Konstantan oder Nickelin), der auf einen isolierenden Kern (nicht Eisen!) gewickelt wird. Beim Eichens unseres Spannungsmessers mit einem fremden Meßgerät und Schiebewiderstand (100 . . . 200 Ω , bis 2 A belastbar) schalten wir unser Meßgerät und das fremde parallel zueinander, stellen die einzelnen Spannungen ein und übertragen die »fremden« Werte auf unsere Skale (Bild 18a). Wir können unseren Spannungsmesser so benutzen, wie er in der Schalttafel sitzt – *ausgeschaltet* und über die beiden darunterliegenden Anschlußklemmen. Die 24 V Wechselspannung entnehmen wir unserer Tafel. Die richtige Länge des Widerstandsdrahtes erhalten wir aus einer Widerstandstabelle (s. Tabellenanhang) oder (und unserem Fall genau angepaßt) durch Probieren. Wir schließen nicht gleich den Draht fest an, sondern fahren mit einer stromführenden Krokodilklemme darauf entlang, bis der gewünschte Wert angezeigt wird.

Beim Strommesser müssen es *Nebenwiderstände* (Parallelwiderstände) sein, die den Hauptteil des Stromflusses übernehmen und unserem Meßgerät nur noch den Rest – im Beispiel 150 mA – überlassen. Bei 1,5 A müssen $1500\text{ mA} - 150\text{ mA} = 1350\text{ mA}$ über den Nebenwiderstand geleitet werden, der deshalb nur den $\frac{150\text{ mA}}{1350\text{ mA}} = 0,111$ fachen Wert des Meßgerätewiderstandes haben darf. Da wir den Widerstand der Feldspule nicht kennen und die Verhältnisse bei Weicheisen-Strommessern recht verwickelt sind, probieren wir lieber. Nach Bild 18b rechts schalten wir an 24 V Wechselspannung (aus unserer Tafel) unseren *ausgeschalteten* Strommesser (über die darunterliegenden Anschlußklemmen) in Reihe mit einem geliehenen Strommesser des gewünschten Bereiches (450 mA und 1,5 A) und einem Schiebewiderstand (100 . . . 200 Ω , mit 2 A belastbar). Parallel zu unserem Meßgerät legen wir einen Widerstandsdraht (etwa 1,5 m lang, 0,2 mm Durchmesser). Das eine Ende kommt un-

mittelbar an die eine Anschlußklemme unseres Strommessers; mit der anderen Klemme ist der Draht über eine Zuleitung mit Krokodilklemme verbunden.

Zunächst schalten wir unseren Strommesser ziemlich kurz, um eine Überlastung zu verhindern. Dann stellen wir für den ersten Vorwiderstand im Vergleichsgerät 450 mA ein und fahren mit der Krokodilklemme so lange am Widerstandsdraht entlang, bis unser Gerät den vollen Ausschlag zeigt, der ohne Nebenwiderstand 150 mA, mit Nebenwiderstand nunmehr 450 mA bedeutet. Dann gehen wir stufenweise mit der Stromstärke zurück und prüfen die Lage der neuen Werte auf unserer Skale; wir erkennen, ob wir mit ihr auskommen oder eine neue zeichnen oder eine Zahlentabelle anlegen müssen. Mit dem Bereich 1,5 A verfahren wir in gleicher Weise; bei dem stärkeren Strom ist der Widerstandsdraht kürzer und muß noch sorgfältiger abgemessen werden.

Unsere Bereichserweiterung des Strommessers hat freilich einen *Nachteil*: Beim Wechseln des Meßbereiches fließt der gesamte Strom über das Meßgerät; das kann dabei sehr leicht überlastet oder beschädigt werden! *Deshalb schalten wir es mit S₃ vor jedem Bereichswechsel grundsätzlich ab.*

Die experimentell ermittelten Längen des Widerstandsdrähtes werden abgeschnitten, auf unbrennbaren Isolierkern aufgewickelt und befestigt und neben dem Strommesser unserer Tafel eingebaut.

Als letztes schließen wir Erde (Wasserleitung) und Antenne an und befestigen auf der Frontplatte saubere Beschriftungen. Damit ist das »Herz« unserer Anlage fertig.

Wir merken uns für alle Versuche – besonders für solche mit Spannungen über 24 V:

Niemals eine Schaltung unter Spannung ändern!

Auch bei kleinen Schaltungsänderungen erst alles abschalten!

Kondensatoren halten oft noch lange ihre Spannung; also nach dem Abschalten eine Weile warten, ehe wir die Schaltung ändern!

»Aufbauteile« für mehrere Zwecke

Schiebewiderstand

Den *stufenlos einstellbaren Schiebewiderstand* (Bild 19) brauchen wir zum Einstellen der Stromstärke und der durch diesen Strom arbeitenden Geräte, beispielsweise der Motoren. Weiterhin ist er als »Stromverbraucher« zum Belasten unserer Stromquelle nötig, etwa beim Eichen von Meßgeräten. Für viele physikalische Versuche, beispielsweise zu den Ohmschen und Kirchhoffschen Gesetzen, ist er so nützlich, daß es sich sogar empfiehlt, gleich zwei Stück davon zu bauen. Man kann oben auf dem Widerstand noch eine Skale anbringen und diese in Ohm eichen; dann ist der Wert sofort ablesbar. Eine dritte Anschlußklemme erlaubt außerdem, den Schiebewiderstand als *Spannungsteiler* (Potentiometer) zu verwenden; er ist fast schon ein »Mehrzweckgerät«.

Konstruktion und Fertigung

Der Widerstandswert soll so bemessen sein, daß bei der höchsten Spannung von $U = 24 \text{ V}$ der maximal zulässige Schalttafelstrom von $I = 1,2 \text{ A}$ nicht überschritten wird. Nach dem *Ohmschen Gesetz*

$$R = \frac{U}{I} \text{ berechnen wir } R = \frac{24 \text{ V}}{1,2 \text{ A}} = 20 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 20 \Omega$$

($1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$). Den »inneren« Widerstand der Strom-

quelle lassen wir aus dieser Berechnung heraus, weil er schwerer zu erfassen ist; er verringert jedoch Stromstärke und Spannung im äußeren Stromkreis, das heißt in unserem Versuchsaufbau.

Primärelemente, die im übernächsten Abschnitt erläutert werden, haben einen relativ hohen inneren Widerstand. Der Vorteil dabei ist, daß sich Kurzschlüsse nicht allzu schlimm auswirken. Anders beim Blei-Akkumulator: Der hat einen sehr geringen inneren Widerstand, liefert daher auf Wunsch (etwa beim Anlassen von Verbrennungsmotoren) erstaunlich hohe Stromstärken – 100 A und mehr. Aber er leidet darunter sehr. Elektrische Leiter beispielsweise werden beim Stromdurchgang warm und z. T. unerwünscht heiß! Das müssen wir auch



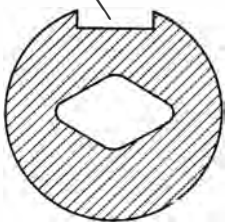
Bild 19. Unser Schiebewiderstand

bei unserem Schiebewiderstand beachten. Der Widerstandsdraht darf getrost etwas warm werden; *er soll aber keine Heizung sein!* Damit der Widerstandsdraht nicht zu warm wird, nehmen wir einen entsprechend großen Querschnitt und gehen dabei gleich von einer Höchstbelastung von 1,2 A aus. Peinlich ist hier, daß der elektrische Widerstand eines Drahtes bei steigendem Querschnitt sinkt und wir einen längeren Draht benötigen. Wir wollen sehen, wie wir diese Schwierigkeit umgehen können.

In Tabelle 5 im Tabellenanhang finden wir, daß ein *Nickelindraht* für eine größte zulässige Stromstärke von 1,2 A einen Durchmesser von 0,50 mm hat. Sein Widerstand je Meter ist $w = 2,04 \Omega/\text{m}$. Welche Länge l muß der Draht haben, damit wir unsere 20Ω erhalten? Der Gesamtwiderstand ist $R = w \cdot l$; also $l = \frac{R}{w} = \frac{20 \Omega}{2,04 \Omega/\text{m}} = 9,8 \text{ m}$. Eine ganz beachtliche Länge! Wir dürfen daher den Durchmesser des Rundkörpers, auf den wir den Draht aufwickeln, nicht zu klein nehmen; wir

Bild 20. Querschnitt durch den Spulenkörper des Schiebewiderstandes

Hier läuft die Feder des Schiebers



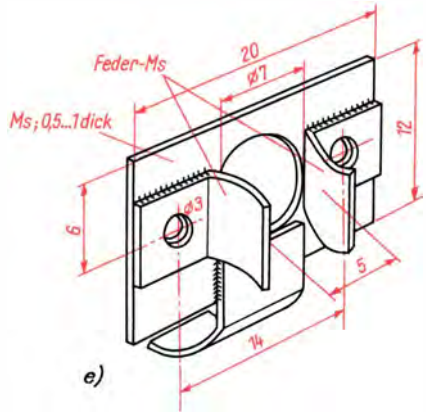
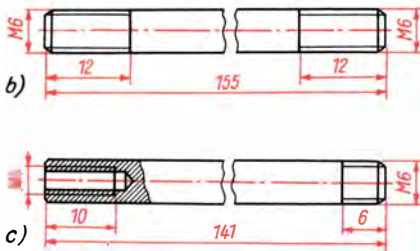
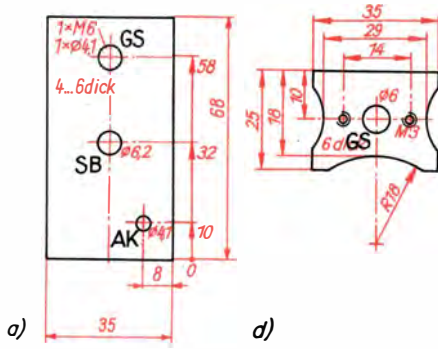
wählen 35 mm. Wie viele Windungen müssen darauf untergebracht werden – bei blankem Draht noch mit Zwischenraum? Die Länge einer Windung ist gleich dem Kreisumfang $\pi \cdot d$ (d Durchmesser); unsere Drahtlänge erfordert N Windungen, also

$$l = N \cdot \pi \cdot d. \text{ Daraus ergibt sich } N = \frac{l}{\pi \cdot d} = \frac{9,8 \text{ m}}{\pi \cdot 35 \text{ mm}} = 89 \text{ Windungen.}$$

Die folgenden Bemerkungen gelten für einen 135 mm langen Keramikkörper mit 90 Umläufen der Wenderrille (auf einige mehr kommt es nicht an). Der Körper hat außerdem eine oder zwei 8 mm breite gerade Längsrinnen (Bild 20); auf ihnen liegt der Draht frei und hat hier guten Kontakt mit dem Gleitkontakt. Isolierte (oxydierte) Drähte werden – über einer der Rinnen – vorsichtig abisoliert. Wer andere Wicklungskörper benutzt, muß die Maße entsprechend ändern; der Aufbau kann grundsätzlich der gleiche bleiben. Man kann sich den Körper auch aus Gips selber herstellen.

Nach der Berechnung folgt jetzt der Bau. Der Anfang des Widerstandsdrahtes wird an einem Ende des keramischen Körpers mit Schelle oder Drahtbügel festgeklemmt. Den Draht wickeln wir in der abgemessenen Länge sehr fest auf; sein Ende wird in gleicher Weise wie der Anfang am anderen Ende des Körpers befestigt. Nun bauen wir die beiden *Ständer* (Endplatten) aus Hartpapier (4...6 mm dick) nach Bild 21a. Die obere Bohrung GS (für die Gleitschiene) erhält bei nur einem Ständer ein Gewinde. Das Mittelloch SB an beiden Ständern soll den Ständerbolzen aufnehmen, der alles fest zusammenhält. In den unteren Löchern AK befestigen wir je eine Apparatklemme.

Der *Ständerbolzen* (Bild 21b) aus Eisen erhält an beiden Enden ein Gewinde; seine Enden müssen so weit aus den Ständern herausragen, daß beiderseits für eine Mutter genügend Platz zum Verschrauben ist – aber auch nicht mehr. Die *Gleitschiene* (Bild 21c), die den Schieber mit dem Gleitkontakt aufnehmen soll, ist aus Messing oder Aluminium. Das eine Ende erhält ein Außengewinde, das andere eine Bohrung mit Innengewinde zur Aufnahme des Gewindebolzens einer Apparatklemme. Diese Lösung ist elektrisch vorzüglich und sieht sehr gut aus. Gutes Aussehen bei allen Modellen ist unser Ziel! Einfacher ist es freilich, oben an einem Ständer eine Klemme anzubringen und sie mit der Gleitschiene durch eine kurze Leitung



zu verbinden. Beim Gewindefschneiden und Bohren an der Schiene muß diese in Holz oder Hartpapier eingespannt werden, damit die Oberfläche nicht beschädigt wird; an ihr soll der Schieber mit den Gleitkontakten leicht entlanggleiten.

Der *Schieber* wird nach Bild 21d aus Hartpapier (6 mm dick) gebaut. Die mittlere Bohrung GS entspricht dem Durchmesser der Gleitschiene. Die beiden Bohrungen daneben erhalten ein Gewinde M3 zur Aufnahme zweier Metallschrauben, mit denen der Schleifer befestigt wird. Bei glatten Löchern sind zwei Metallschrauben mit Muttern nötig.

Der *Schleifer* (Bild 21e) besteht aus Messingblech, das sehr sorgfältig verarbeitet werden muß, um eine plötzliche Kontaktunterbrechung zu vermeiden. Durch das große Mittelloch führt die Gleitschiene; den Kontakt zu ihr geben aber nur die beiden seitlich aufgelöteten kleinen Federstücke. Für den Kontakt mit dem Widerstandsdraht sorgt die (etwas längere) untere Feder; sie liegt unterhalb des Schiebers. Als Federmessing für die drei Kontakte nehmen wir Kontaktfederstreifen einer alten Flachbatterie; die »Grundplatte«, auf der die drei Messingfedern aufgelötet werden, besteht aus Messingblech (0,5...1 mm dick). Nach dem Lötens bohren wir die beiden seitlichen 3-mm-Löcher.

Die *Montage* aller dieser Teile zu einem fertigen Schiebewiderstand will vorher gut überlegt sein:

1. Gleitschiene in den Ständer mit M6-Gewinde einschrauben, Schieber auf die Schiene schieben.
2. Ständerbolzen mit Unterlegscheibe und Mutter M6 in den Ständer stecken.
3. Widerstandskörper auf Ständerbolzen schieben.
4. Zweiten Ständer auf den Ständerbolzen bringen, Unterlegscheibe auflegen, mit Mutter M6 festziehen, darauf achten, daß die Ständer ohne Wackeln stehen und daß der Schleifer federnd auf den Drahtwindungen liegt.
5. Befestigen der Schiene am zweiten Ständer mit der Apparatklemme; der Gewindebolzen der Klemme wird in die Schiene hineingeschraubt.
6. Die Enden des Widerstandsdrahtes werden mit den beiden unteren Apparatklemmen verbunden. Am besten verlötet man sie mit den Gewindebolzen der Klemmen, gegebenenfalls mit Zwischenstücken aus dickerem Kupferdraht, der – ebenso wie die Gewindebolzen – etwa entstehende Wärme vom Weichlot ableiten kann. Damit ist der stufenlos einstellbare Schiebewiderstand fertig zur Prüfung.

Bild 21. Teile des Schiebewiderstandes: a) Ständer, b) Ständerbolzen, c) Gleitschiene, d) Schieber, e) Schleifer

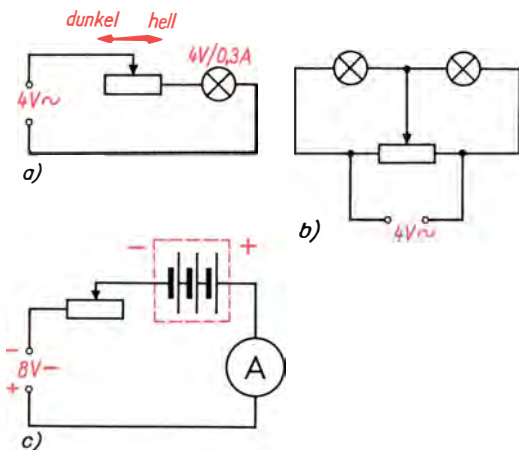
Erste Versuche mit dem Schiebewiderstand

Bild 22 zeigt drei Schaltungen zum *Prüfen* und ersten *Anwenden* unseres Widerstandes. Die erste läßt eine Glühlampe 4 V/0,3 A langsam aufleuchten und verlöschen (»Kinoschaltung«). 4 V (Gleich- oder Wechselspannung) speisen die Glühlampe über den Schiebewiderstand. Wir verändern die Versuchsbedingungen durch Auswechseln der Glühlampe gegen eine stärkere (mit größerer Leistung und gegebenenfalls höherer Spannung) und erklären die etwas veränderte Wirkung mit dem neuen Verhältnis des Widerstandes unseres Modells zum Widerstand der Glühlampe (Je größer die Leistung einer Glühlampe bei gleicher Spannung ist, um so kleiner ist ihr Widerstand.),

In der zweiten Schaltung wird unser Schiebewiderstand als *Spannungsteiler* verwendet. Der Anschluß zwischen den Lampen führt zur Gleitschiene. Bewegen wir den Gleitkontakt hin und her, so leuchten die beiden Glühlampen abwechselnd auf.

Die dritte Schaltung stellt eine *Ladestation* für Akkumulatoren dar. Die Ladespannung muß etwas höher als die Batteriespannung sein; am Schluß des Ladens steigt die Spannung einer Bleiakкумуляtor-Zelle auf etwa 2,4 V. Die Stärke des Ladestromes richtet sich nach der Aufnahmefähigkeit (Kapazität) der Batterie; der Strommesser überwacht die Stromstärke.

Bild 22. Versuche mit dem Schiebewiderstand: a) als Vorwiderstand, b) als Spannungsteiler, c) Ladestation

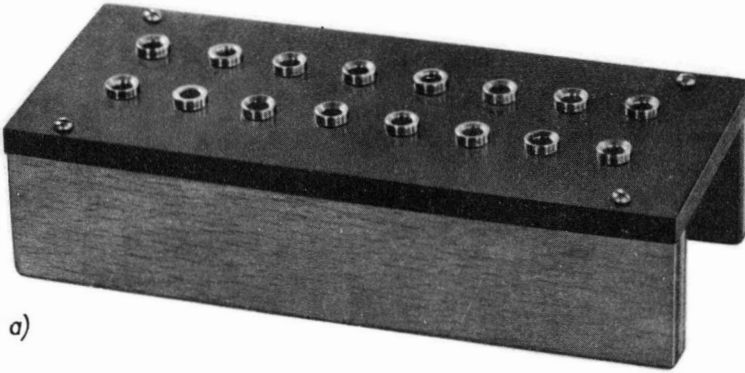


Verteilertafel und Lampenbrett

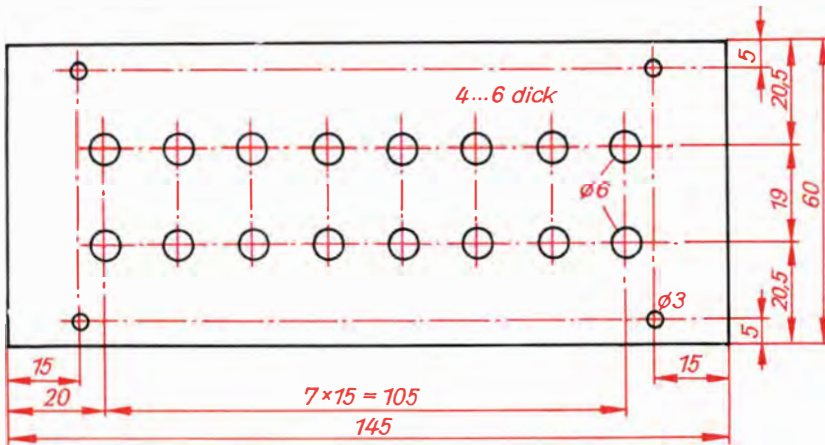
Ein Schlüssel zum Erfolg beim Bauen ebenso wie beim Experimentieren ist die saubere Art des Arbeitens. Das »Es wird schon mal so gehen«, die provisorischen Kontakte sind Notlösungen in eiligen Fällen. Wir haben aber ausreichend Zeit. Wir wollen uns auf alle Aufbauten und Schaltungen verlassen können – und das setzt kluges Arbeiten voraus. Bei den kleinen Versuchen haben wir schon gemerkt, wie lästig es ist, mit Glühlämpchen ohne feste Fassung und Anschlußkontakte zu arbeiten. Ähnliches gilt für den Fall, daß sich eine zweipolige Leitung verzweigt. Wir wollen daher zwei Teile bauen, die des öfteren gebraucht werden: *Verteilertafel* und *Lampenbrett*, und zwar von jedem mindestens zwei Stück.

Die Bilder 23a und 23b lassen den Aufbau der *Verteilertafel* erkennen. Zweimal acht Telefonbuchsen sind in zwei Reihen angeordnet, wobei jeweils alle acht *einer* Reihe miteinander verbunden sind. Die Verbindungsleitungen liegen unterhalb der Hartpapierplatte. An die Längsseiten der Platte schrauben wir je eine Holzleiste (10 mm × 20 mm × 145 mm).

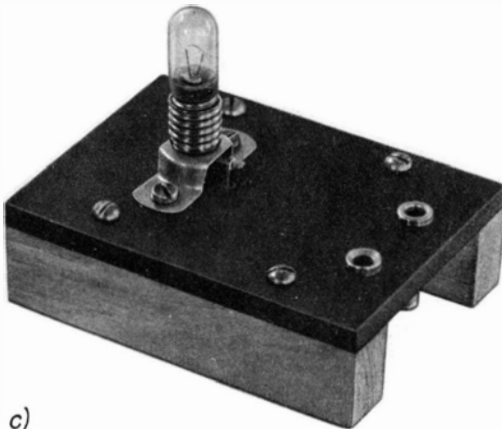
Noch einfacher ist das *Lampenbrett* (Bilder 23c und 23d). Wir können uns lange Hartpapierstreifen (60 mm breit) besorgen und davon die gewünschten Längen absägen; erster Beginn einer Normung in unserer Werkstatt! Ebenso bei den beiden Standleisten aus Holz – sie haben wieder den Querschnitt 10 mm × 20 mm und werden in H mit Holzschrauben befestigt. Die Lampenfassung schrauben wir bei F an; durch V geht eine Verbindungsleitung von der Fassung zu einer der Telefonbuchsen. Die andere Leitung verläuft unterhalb der Platte von einer Fassungsschraube zur anderen Buchse.



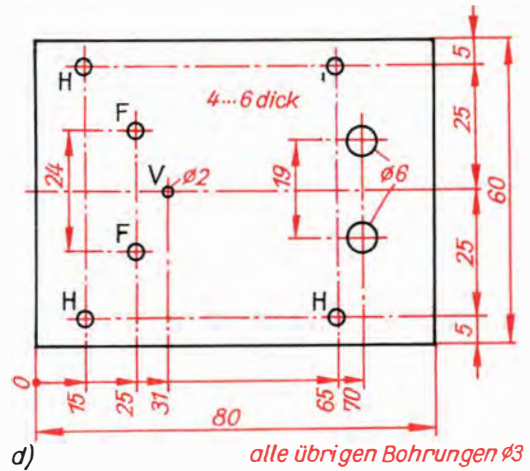
a)



b)



c)



d)

alle übrigen Bohrungen $\varnothing 3$

Bild 23. Die Verteilertafel (a), ihre Grundplatte (b), das Lampenbrett (c) und seine Grundplatte (d)

Versuche zum Ohmschen Gesetz und zu den Kirchhoffschen Gesetzen

Als Spannungsquelle benutzen wir unsere Schalttafel. Bei *Gleichstrom* wird die Spannung bei ausgeschaltetem Strommesser und die Stromstärke bei ausgeschaltetem Spannungsmesser gemessen. Beim Schätzen des eingestellten Widerstandswertes am Schiebewiderstand gilt diejenige Berührungsstelle zwischen Wicklung und Schleifer, die den eingeschalteten Bereich gerade abschließt.

Bei *Wechselstrom* können wir den Spannungsmesser eingeschaltet lassen. Da der Schiebewiderstand nur eine einzige Wicklung hat und deren Windungen auch noch Zwischenräume haben, stört uns die Selbstinduktion nicht. (Bei enggewickelten Spulen und Wechselstrom sieht das Ohmsche Gesetz anders als bei Gleichstrom aus.)

Strom und Spannung an einem Widerstand

- Bei einer Spannung $U = 6\text{ V}$ (Spannungswähler auf 7 V stecken, Strommesser ausgeschaltet) soll ein Strom $I = 0,6\text{ A}$ (Spannungsmesser ausgeschaltet) eingestellt werden; der Schleifer unseres Schiebewiderstandes steht dann etwa in der Mitte. Nach dem *Ohmschen Gesetz*

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

muß der Teilwiderstand

$$R = \frac{6\text{ V}}{0,6\text{ A}} = 10 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 10\ \Omega \text{ groß sein.}$$

- Wir wollen ohne Veränderung des Widerstandes, also für $R = 10\ \Omega$, den Strom auf $I = 1,2\text{ A}$ erhöhen. Dafür ist nach $U = R \cdot I$ eine Spannung von

$$U = 10\ \Omega \cdot 1,2\text{ A} = 10 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot 1,2\text{ A} = 12\text{ V erforderlich;}$$

der Versuch bestätigt unsere Überlegung (Spannungswähler auf 14...15 V). Wir halten fest:

Beim Verdoppeln der Spannung verdoppelt sich auch der Strom (bei gleichem Widerstand).

- Bei $U = 12\text{ V}$ schalten wir den vollen Widerstand $R = 20\ \Omega$ ein. Welcher Strom fließt in diesem Fall? Wir berechnen

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12\text{ V}}{20\ \Omega} = \frac{12\text{ V} \cdot \text{A}}{20\text{ V}} = 0,6\text{ A,}$$

bestätigen dies durch den Versuch und halten fest:

Beim Verdoppeln des Widerstandswertes geht der Strom auf die Hälfte zurück (bei gleicher Spannung).

Das Ohmsche Gesetz ist für das weitere Verstehen der Zusammenhänge so grundlegend, daß wir die Versuchsreihe – bei der wir zunächst *überlegen*, dann *rechnen* und zum Schluß im Experiment *überprüfen* – erst dann beenden, wenn unsere Berechnungen praktisch bestätigt werden.

Anschließend führen wir Versuche mit zwei Widerständen durch. Dazu brauchen wir einen zweiten (gleichen) Schiebewiderstand oder einen Festwiderstand von beispielsweise $R_2 = 5\ \Omega$; den ersten Schiebewiderstand stellen wir auf $R_1 = 10\ \Omega$ ein.

Wir schalten Widerstände parallel

Bild 24a zeigt, wie beide Widerstände mit Hilfe der Verteilertafel an die Schalttafel angeschlossen werden. Am Spannungswähler greifen wir, bei 3 V beginnend, eine solche Spannung ab, daß der eingeschaltete Strommesser der Schalttafel einen Strom $I = 1\text{ A}$ anzeigt (es können auch 0,9 A oder 1,1 A sein; den entsprechenden Wert merken wir uns jedenfalls). Dann schalten wir Strommesser und Schalttafel ab, trennen an der Verteilertafel die Verbindung zum Widerstand R_1 und legen in die Trennstelle nach Bild 24b den ausgeschalteten Strommesser A_1 . Nach dem Einschalten des Hauptschalters lesen wir nun am Strommesser $I_1 = 0,35\text{ A}$ ab.

Nach erneutem Abschalten und Einbau des Strommessers in die Leitung zu R_2 messen wir $I_2 = 0,65\text{ A}$. Beim Vergleich der drei Stromwerte erkennen wir, daß der Strom durch beide Widerstände (der Gesamtstrom I) gleich der Summe der beiden Teilströme I_1 und I_2 ist: $I = I_1 + I_2$. Das ist das *1. Kirchhoffsche Gesetz*.

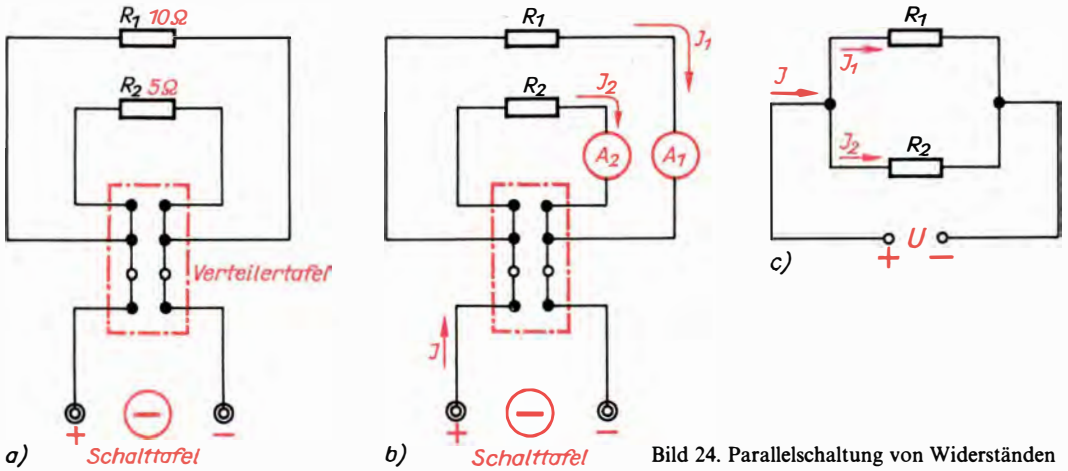


Bild 24. Parallelschaltung von Widerständen

Vergleichen wir die Teilströme mit den Teilwiderständen, fällt das nahezu gleiche Verhältnis von 1:2 auf. Aber, und das prägen wir uns gut ein, das Verhältnis der beiden Ströme ist dem Verhältnis der Widerstände umgekehrt proportional:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

Vergrößern wir einen Teilwiderstand, so sinkt die zugehörige Stromstärke – und umgekehrt.

Auch für die *Parallelschaltung* muß das Ohmsche Gesetz gelten. Wir messen deshalb die an beiden Widerständen gemeinsam liegende Spannung (diesmal bei eingeschaltetem Strommesser): $U = 3,3\text{ V}$. Als Gesamtwiderstand berechnen wir

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3,3\text{ V}}{1\text{ A}} = 3,3\ \Omega.$$

Nach Vergleich mit $R_1 = 10\ \Omega$ und $R_2 = 5\ \Omega$ ist festzustellen, daß der Gesamtwiderstand kleiner als der kleinste Teilwiderstand ist. Soll der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung aus den Teilwiderständen berechnet werden, müssen wir stets erst den Kehrwert der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände ermitteln; es gilt

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Mit den Werten unseres Beispiels erhalten wir

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{10\ \Omega} + \frac{1}{5\ \Omega}$$

Der Hauptnenner (das kleinste gemeinsame Vielfache der Teilnenner) beträgt hier $10\ \Omega$, so daß wir

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{10\ \Omega} + \frac{2}{10\ \Omega} = \frac{3}{10\ \Omega}$$

schreiben können. Nun bilden wir den Kehrwert und berechnen

$$R = \frac{10\ \Omega}{3} = 3,33\ \Omega.$$

Das stimmt recht gut mit dem nach dem Ohmschen Gesetz ermittelten Wert überein.

Bild 24c zeigt die Parallelschaltung zweier Widerstände, nur das Wesentliche ist dargestellt: Spannungsquelle, Widerstände, Verbindungsleitungen und Ströme.

Wir schalten Widerstände in Reihe

Nach Bild 25a verbinden wir die beiden hintereinandergeschalteten Widerstände mit der Schalttafel, schalten den Strommesser ein und erhöhen von 15 V an die Spannung am Spannungswähler so weit, bis wieder ein Strom von $I = 1\text{ A}$ fließt. Dann Strommesser ausschalten und Spannungsmesser einschalten: $U = 15\text{ V}$. Der Gesamtwiderstand beträgt jetzt

$$R = \frac{U}{I} = \frac{15\text{ V}}{1\text{ A}} = 15\ \Omega.$$

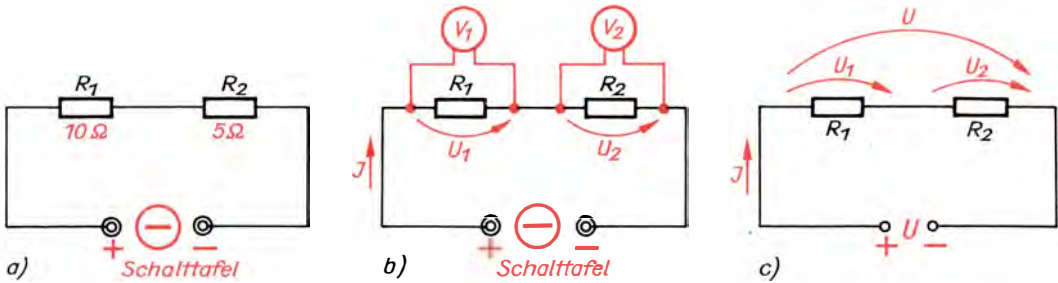


Bild 25. Reihenschaltung von Widerständen

Das ist die Summe der Teilwiderstände:

$$R = R_1 + R_2 = 10 \Omega + 5 \Omega = 15 \Omega.$$

Wir schalten den Spannungsmesser wieder aus, legen ihn nach Bild 25b mit zwei Leitungen parallel zum Widerstand R_1 und lesen $U_1 = 10 \text{ V}$ ab. Anschließend messen wir in der gleichen Art die Teilspannung über R_2 : $U_2 = 5 \text{ V}$. Es gilt also

$$U = U_1 + U_2.$$

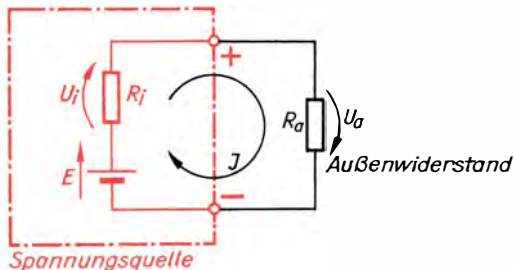
Das ist das 2. Kirchhoffsche Gesetz. Die Summe der Teilspannungen U_1 und U_2 ist gleich der Gesamtspannung U .

Aus dem Vergleich der Teilspannungen mit den Teilwiderständen folgern wir

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Vergrößern wir einen Teilwiderstand, so steigt auch die zugehörige Spannung – und umgekehrt. Bild 25c zeigt das Wesentliche der Reihenschaltung.

Bild 26. Innenwiderstand und Außenwiderstand bilden eine Reihenschaltung



Die Gesetze der Reihenschaltung und der Parallelschaltung von Widerständen halten wir gut auseinander und merken uns: *Bei der Reihenschaltung fließt durch alle Widerstände derselbe Strom, und bei der Parallelschaltung liegt an allen Widerständen dieselbe Spannung.*

Bei den Versuchen ist uns ganz sicherlich die Spannungsdifferenz zwischen Einstellung (am Spannungswähler) und Anzeige (am Strommesser) aufgefallen. Das liegt am *Innenwiderstand* unserer Spannungsquelle. Ebenso wie der Strom von 1 A bei der Reihenschaltung über $R_1 = 10 \Omega$ einen Spannungsabfall $U_1 = R_1 \cdot I = 10 \Omega \cdot 1 \text{ A} = 10 \text{ V}$ hervorruft, fällt auch eine Spannung $U_i = R_i \cdot I$ über dem Innenwiderstand R_i ab. Er muß in unserem Fall etwa $R_i = \frac{U_i}{I} = \frac{3 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 3 \Omega$ betragen

(Bild 26). Zwischen den Klemmen der Spannungsquelle liegt nicht nur die dem Strom antreibende Spannung, die sogenannte *Urspannung* E , sondern in Reihe dazu auch ein Widerstand – der Innenwiderstand R_i . R_i und R_a (ein Außenwiderstand oder mehrere) bilden stets eine Reihenschaltung. Je kleiner R_a wird, um so mehr steigt I an, und um so größer wird U_i ; die Klemmenspannung (vom Spannungsmesser angezeigt) geht gegenüber der am Spannungswähler eingestellten Urspannung immer weiter zurück. »Gemischte« Schaltungen (Widerstände nebeneinander und hintereinander) werden stufenweise nach in sich geschlossenen Gruppen berechnet; man ersetzt jede Gruppe nach und nach durch einen einzigen Widerstand. Die Widerstände und die Zweigströme können einzeln gemessen werden; die Ströme dadurch, daß man in jeden Zweig vor oder hinter den Zweigwiderstand einen Strommesser schaltet.

Über die Chemie zur elektrischen Energie

So fing es an

Der italienische Physiker *Alessandro Volta* (1745 bis 1827) stellte eine Kupferplatte und eine Zinkplatte mit geringem Abstand nebeneinander in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure (Bild 27) und konnte so an den Platten eine elektrische Spannung abnehmen und damit experimentieren. Chemische Vorgänge und Wanderungen von Ionen und Elektronen sind die Ursache der Spannung, *chemische Energie wird in elektrische Energie verwandelt*.

Das war das erste »galvanische« oder *Primärelement*; primär (lateinisch *primus* = der erste), weil es als erste Einrichtung ohne Hilfe schon vorhandener elektrischer Spannungsquellen Spannung und Strom liefern kann. Der *Akkumulator* braucht dagegen zunächst eine Stromquelle (Ladegerät), mit der er (dadurch an zweiter Stelle stehend) erst aufgeladen werden muß. Man nennt ihn deshalb *Sekundärelement* (lat. *secundus* = der zweite). Eine *Batterie* ist stets eine Zusammenstellung von zwei oder mehreren Elementen.

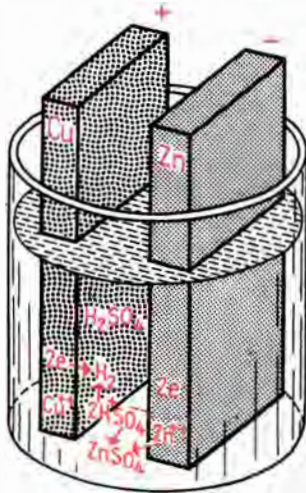


Bild 27.
Volta-Element

Wir bleiben bei den Primärelementen. Bild 28a zeigt ein Volta-Element mit Kupferplatte und Zinkplatte, daher auch *Kupfer-Zink-Element* genannt. Es ist mit Hilfe zweier *Holtzscher* Klemmen aufgebaut und hat heute keine technische Bedeutung mehr.

Zu Versuchszwecken und für Fernmelde- oder Alarmanlagen (Klingel, Fernsprecher) gut zu gebrauchen sind das *Daniell-Element* und vor allem das *Leclanché-Element*, beide nach ihren Erfindern benannt. Beim *Daniell-Element* (Bild 28b) steht ein Kupferstab in einem porösen Tonzylinder mit einer Lösung von Kupfervitriol (Kupfersulfat, CuSO_4) und der Tonzylinder wiederum in einem Glasgefäß mit verdünnter Schwefelsäure. Der Tonzylinder ist von einem Zinkblech, das ebenfalls in der Schwefelsäure steckt, umgeben. Der an diesem Blech frei werdende Wasserstoff wird auf seiner Wanderung zum Kupferstab vom Kupfervitriol aufgenommen und unwirksam gemacht. Er kann nicht, wie beim einfachen Volta-Element, eine »Polarisation« (Gegenspannung) hervorrufen. Dadurch liefert dieses Element eine gleichbleibende Spannung von etwa 1,5 V. Die Flüssigkeiten in den Elementen heißen stets *Elektrolyt* (griech. *Lýein* = lösen) und die Metall- und Kohleteile *Elektrode* (griech. *hodós* = Weg).

Das *Leclanché-Element* (Kohle-Zink-Element, Bild 28c) hat als Elektrolyten nur in reinem Wasser aufgelöstes Salmiaksalz (Ammoniumchlorid, NH_4Cl) und als Elektroden einen Zinkzylinder und, darin stehend, einen Kohlestab. Um diesen ist ein durchlässiger Beutel mit Braunstein (Mangandioxid, MnO_2) gebunden. Er fängt den für die Spannung nachteiligen Wasserstoff auf dessen Wanderung zur Kohle auf und verbindet ihn mit Sauerstoff zu unschädlichem Wasser (H_2O). Dadurch kann auch dieses Element lange Zeit (bis zu einem Jahr) eine gleichbleibende Spannung von etwa 1,5 V liefern. Bei Kurzschluß erhalten wir nur einen geringen Dauerstrom, weil der schon erwähnte innere Widerstand groß ist. Das Ohmsche Gesetz ist nun einmal – wie alle Naturgesetze – ständig wirksam und nicht zu umgehen.

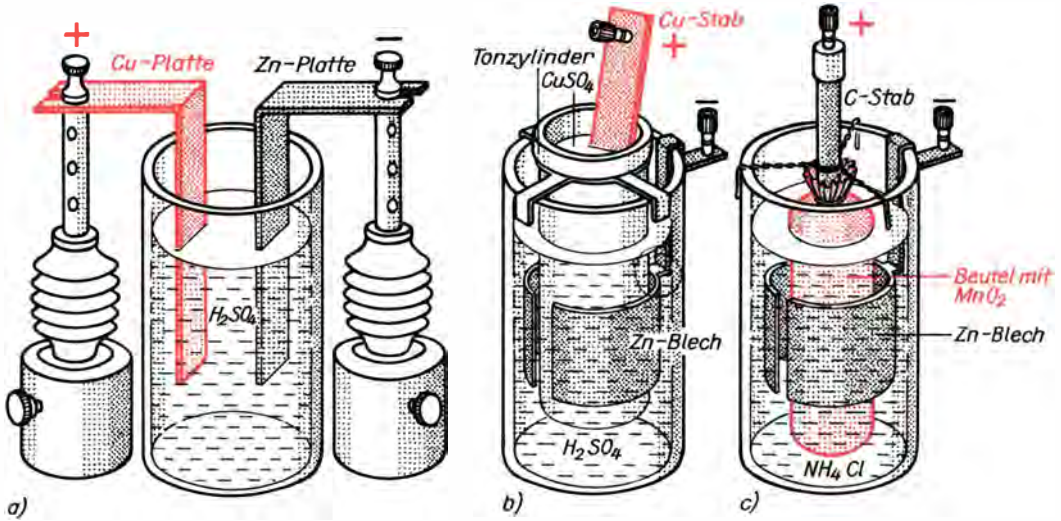
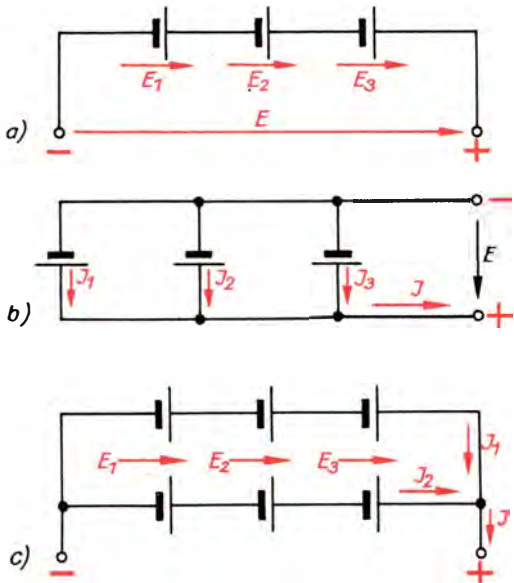


Bild 28. Primärelemente: a) Volta-Element, b) Daniell-Element, c) Leclanché-Element

Wir schalten Elemente zu Batterien

Bild 29. Reihenschaltung (a), Parallelschaltung (b) und gemischte Schaltung (c) von Elementen



Um die Spannung zu erhöhen, schalten wir die Elemente hintereinander (in Reihe, in Serie). Jede positive Elektrode wird mit einer negativen (das ist immer das Zink) verbunden, und an beiden Enden bleiben eine positive und eine negative Elektrode zu unserer Verfügung frei. Mehrere Elemente ergeben so (Bild 29a) – in Analogie zur Reihenschaltung von Widerständen – eine Gesamtspannung

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Bei drei gleichen Elementen mit $U_e = 1,5\text{V}$ bedeutet das

$$U = 3 \cdot U_e = 3 \cdot 1,5\text{V} = 4,5\text{V}.$$

Mit den Elementen schalten wir aber auch gleichzeitig deren Innenwiderstände in Reihe. Bei drei gleichen Elementen verdreifacht sich der Innenwiderstand. Deshalb kann einer Batterie nach Bild 29a kein größerer Strom als einer einzelnen Zelle entnommen werden (beim Kohle-Zink-Element etwa 0,1 A Dauerstrom).

Kommt es uns vor allem auf die Stromstärke an, so schalten wir unsere drei gleichen Elemente mit Hilfe der Verteilertafel parallel (Bild 29b), wir verbinden also alle positiven Elektroden miteinander und ebenso alle negativen. An der Verteilertafel nehmen wir die Spannung ab: nur 1,5V. Dafür

zeigt der Strommesser bei einem Kurzschluß den *dreifachen* Wert an! Hier wirkt neben dem Ohmschen Gesetz auch das erste Kirchhoffsche Gesetz für parallelgeschaltete Widerstände, denn das sind jetzt die inneren Widerstände der einzelnen Elemente. Drei Elemente parallelgeschaltet, das bedeutet, *ein dreimal so großes Element* zu bauen. Dreimal so groß ist auch die Oberfläche der Elektroden im Elektrolyten geworden. Der Strom findet jetzt den dreifachen Querschnitt auf seinem Weg vor, stößt also nur auf ein Drittel des Widerstandes vom einzelnen Element. Berechnet wird das nach der Gleichung

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

bzw. in unserem Beispiel

$$I = 3 \cdot I_e = 3 \cdot 0,1 \text{ A} = 0,3 \text{ A.}$$

Der dritte Fall ist der anspruchsvollste: Wir brauchen höhere Spannung *und zugleich* höheren Strom. Folgerichtig verbinden wir (beispielsweise) drei Elemente in Reihe (Bild 29c); das ergibt $3 \cdot 1,5 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$. Mit den zweiten drei Elementen machen wir es ebenso; wir haben jetzt zwei Batterien zu je $4,5 \text{ V}$ mit beispielsweise $0,1 \text{ A}$. Diese beiden Batterien schalten wir parallel zueinander (als ob es einzelne Elemente wären) und erhalten eine neue Batterie mit ebenfalls $4,5 \text{ V}$ – aber nun schon mit etwa $0,2 \text{ A}$, also der doppelten Stromstärke jeder der beiden Teilbatterien. Diese »gemischte« Schaltung wird viel benutzt. Eine *Flachbatterie* (»Trockenbatterie«) hat drei hintereinandergeschaltete Elemente (Monozellen) und $3 \cdot 1,5 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$ Spannung. Dabei ist der kurze Kontaktstreifen stets der positive Pol (*Anode*), in Schaltzeichnungen durch einen längeren Strich dargestellt, und der lange Kontaktstreifen der negative Pol (*Katode*), durch einen kurzen Strich gekennzeichnet. Diese Zeichen sind genormt.

Wenn wir einmal starke Ströme (etwa 10 A und mehr) brauchen, dann schalten wir ein halbes Dutzend oder mehr solcher Taschenlampenbatterien parallel; die Stromstärke ist erstaunlich hoch. Die Zellen sind kleine *Leclanché*-Elemente – nicht etwa trocken, sondern mit Holzmehl und anderen Mitteln im Elektrolyten, um die Flüssigkeiten gewissermaßen festzuhalten. »Feuchtbatterien« wäre besser ausgedrückt. Die Zinkelektrode ist zugleich das Gefäß; alles ist dicht verschlossen, damit die Feuchtigkeit nicht verdunstet.

Aus mechanischer Energie wird elektrische Energie

Von den Wirkungen des elektrischen Stromes hat die magnetische die größte Bedeutung und den größten Anwendungsbereich gefunden – mehr als die chemische und die Wärmewirkung. Wir erinnern uns: Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem *Magnetfeld* umgeben; es entsteht und verschwindet mit dem Strom. Ein Querschnitt durch dieses Magnetfeld ergibt die bekannten *Feldlinien*. Der dänische Physiker *Hans Christian Oersted* (1777–1851) hat diesen *Elektromagnetismus* als erster entdeckt. Bei Versuchen mit einer Voltaschen Batterie beobachtete er, daß eine Magnetnadel durch den elektrischen Strom abgelenkt wird.

Das Magnetfeld eines einzelnen Leiters ist naturgemäß recht schwach, und es dauerte auch nicht lange, da kamen die Forscher auf den Gedanken, den Draht zu einer Spule aufzuwickeln und so die magnetische Wirkung des Stromes erheblich zu verstärken. Eine solche stromdurchflossene Spule wirkt wie ein Magnet; stecken wir einen Weicheisenkern hinein, so ist die Wirkung noch größer, und wir haben das, was in der Elektrotechnik als *Elektromagnet* bezeichnet wird. Daß auch schon eine kernlose, stromdurchflossene Spule als Magnet mit zwei Polen wirkt, wollen wir in einem kleinen Grundversuch nachweisen.

Ein Spulenmodell für den Feldliniennachweis

Bild 30 zeigt das Modell einer Spule mit 13 Windungen von etwa 25 mm Durchmesser; geeignet ist dafür Kupferdraht ($1,5 \text{ mm}$ Durchmesser). Der Abstand der einzelnen Windungen voneinander ist 5 mm . Es ist nicht schwer, aus etwa 125 cm Kupferdraht über einem Besenstiel oder ähnlichem die Wendel (als Spulenmodell) zu biegen. Wir brauchen in halber Höhe eine glatte Ebene, aus der dann die oberen Hälften aller Windungen herausragen. Wir machen es ebenso, wie Buchbinder gelegentlich Listenwerke und Verzeichnisse mit einer Rückwendel zusammenfügen: Wir fädeln (drehen)

die Wendel durch vorbereitete Löcher in einer Hartpapierplatte (2 mm). Die Löcher liegen in 5 mm Abstand in zwei Reihen, die 25 mm Abstand haben; die eine Reihe ist um 2,5 mm gegen die andere verschoben. Die Löcher, deren Durchmesser etwas größer als der des Drahtes ist, beginnen gleich an einer Schmalseite der Platte; sonst könnten wir mit dem Hineindrehen nicht beginnen. Dagegen hören sie schon etwa 25 mm vor der anderen Schmalkante auf; bei einer Plattengröße von 110 mm × 80 mm bleiben an beiden Seiten der Wendel etwa 25 mm frei.

Anfang und Ende der Wendel liegen unterhalb der Platte; dort werden sie mit zwei Anschlußbuchsen verbunden. Das Ganze wird auf vier GummifüÙe gesetzt (mit Alleskleber angeklebt). Es empfiehlt sich, die Oberfläche der Platte durch weiÙe Lackfarbe oder aufgeklebtes, glattes Papier hell zu halten, damit man die Feldlinien besser erkennen kann. Jetzt wollen wir unseren Versuch durchführen, und zwar in zwei Teilen.

Der *erste Teilversuch* ist sehr leicht: Wir legen unser Spulenmodell an Gleichstrom (1...1,2 A). Mit einem KompaÙ stellen wir fest, daÙ das eine Ende der Spule einen *Südpol*, das andere einen *Nordpol* bildet; die stromdurchflossene Spule verhält sich ungefähr wie ein Magnet. Legen wir ein längliches Stück Weicheisen in die Spule, so können wir das noch besser beobachten. Mit der Stromrichtung ändert sich auch die magnetische Polarität (Nordpol und Südpol); bei dem Wechselstrom unserer Schalttafel (mit 50 Hz) geschieht dieser Wechsel hundertmal in der Sekunde. Die winzigen »Elementarmagneten« im Eisen sind zwar beweglich genug, um die Polaritätsänderung mitzumachen, aber die KompaÙnadel mit ihrer viel größeren Gesamtmasse ist zu träge, um so schnell zu reagieren.

Bild 30. Wendel als Spulenmodell

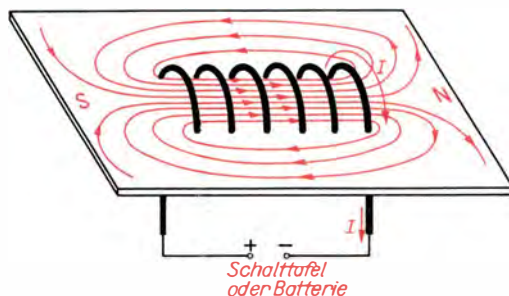
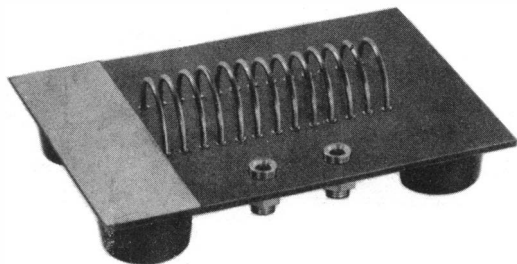


Bild 31. Feldlinienverlauf einer stromdurchflossenen Spule

Deshalb kann man wohl einen Elektromagneten mit Wechselstrom betreiben, wenn man nur die Anziehungskraft braucht; für Versuche zur Polarität und mit Feldlinien ist jedoch Gleichstrom nötig.

Der *zweite Teilversuch* soll uns die magnetischen *Feldlinien* (früher meist »Kraftlinien« genannt) zeigen. Unsere Stromstärke aus der Schalttafel ist dafür zu schwach. Streuen wir feine Eisenfeilspäne auf die stromdurchflossene Spule, so zeigen sich innen einige deutliche Linien; aber außen ist das Bild nicht überzeugend. Wir speisen besser die Spule mit fünf oder sechs frischen, parallelgeschalteten Taschenlampenbatterien zu 4,5 V. Sie liefern 20 A und mehr! Die Eisenfeilspäne werden gleichmäßig – etwa mit einem Salzstreuer – draufgestreut. Nur eine, höchstens zwei Sekunden lassen wir den starken Strom hindurch und klopfen dabei leicht an die Platte; schon sehen wir sehr schöne Feldlinien, wie sie das Bild 31 schematisch zeigt. Es ähnelt dem bekannten Feldlinienbild eines Stabmagneten mit dem Unterschied, daß bei diesem die »inneren« Feldlinien naturgemäß unsichtbar verlaufen. Aber die Gleichartigkeit der magnetischen Wirkung ist nachgewiesen, und darauf kam es uns an.

Wer einen Akkumulator besitzt, kann ihn sehr gut als Stromquelle benutzen; wir wissen ja, daß er infolge seines geringen inneren Widerstandes eine große Stromstärke liefert. Vorsichtshalber schalten wir dabei einige Windungen unseres Schiebewiderstandes in Reihe; ein bis zwei Sekunden halten Batterie und Widerstand die Überbelastung aus.

Elektromagnetismus und Induktion

Wir wissen also: Jeder stromdurchflossene Leiter hat ein im Querschnitt kreisförmiges Magnetfeld um sich – mit dem Leiter als Mittelpunkt. Der Richtungssinn der Feldlinien ist willkürlich festgelegt worden. Eine Spule verstärkt die Wirkung mit der Zahl ihrer Windungen. Nun werden die meisten Leser sicherlich schon einmal mit zwei Stahlmagneten »gespielt« oder, richtiger gesagt, experimentiert haben; mit Nachdenken spielen ist schon ein Experimentieren. Ungleiche Pole zogen dabei einander kräftig an; die Magneten knallten aneinander. Einen gleichnamigen Pol konnten wir mit dem entsprechenden (gleichen) Pol des anderen Magneten fortdrücken. Hält man beide Magneten beim Anziehungs- und Abstoßungsversuch in der Hand, so ist man von der fühlbaren Wirkung der unsichtbaren Kräfte im unsichtbaren Kraftfeld immer wieder beeindruckt, vor allem beim Abstoßen. Man erlebt die Kräfte, die zwei Magnetfelder – als Wirkungsbereiche der Magneten – aufeinander ausüben; dabei ist es gleichgültig, ob man Dauermagneten (Stahl, keramische Dauermagneten) oder Elektromagneten nimmt. Die Forscher, unter ihnen der Franzose *André Marie Ampère* (1775–1836) und der schon genannte *Hans Christian Oersted*, ließen zwei magnetische Kraftfelder aufeinander einwirken. Sie setzten einen beweglichen, stromdurchflossenen Leiter durch einen Stahlmagneten oder einen Elektromagneten in Bewegung und entdeckten so das *elektromotorische Prinzip*, die Tatsache, daß man einen stromdurchflossenen Leiter mit seinem Magnetfeld durch ein anderes Magnetfeld bewegen kann. »Motor« kommt vom Lateinischen *movère* = bewegen; *motum* heißt »das Bewegte«.

Diese Entwicklung führte zu Meßgeräten, zum Telegraf, Relais, Fernsprecher und schließlich zum umlaufenden Elektromotor. Aus elektrischer Energie entstand Bewegungsenergie, mechanische Energie. Der englische Naturforscher *Michael Faraday* (1791–1867) ging aber noch weiter. Er sagte sich: Wenn ich mit elektrischem Strom Magnetismus hervorrufen kann, dann müßte ich umgekehrt mit dem Magnetismus Strom erzeugen können. Diesen für die damalige Zeit geradezu genialen Gedanken setzte er in die Wirklichkeit um. Faraday begriff, daß die *Bewegung* entscheidend war. Aus

einem Magnetfeld und einem stromdurchflossenen Leiter konnte man Bewegung schaffen, also elektrische Energie in mechanische verwandeln. Warum sollte man nicht entsprechend aus Bewegung und Magnetismus einen elektrischen Strom erzeugen, das heißt mechanische Energie in elektrische umwandeln können?

Wir kennen den Faradayschen Grundversuch hierzu: Eine Spule ist an ein empfindliches elektrisches Meßgerät, beispielsweise ein Galvanometer oder ein Milliampereometer, angeschlossen. Stoßen wir einen kräftigen Stabmagneten in die Spule hinein, so entsteht in den von den bewegten magnetischen Feldlinien »geschnittenen« Windungen eine *elektrische Spannung* und, da der Stromkreis durch das Meßgerät geschlossen ist, auch ein Strom. Das Galvanometer schlägt nach einer Seite aus, solange sich der Magnet in die Spule hineinbewegt. Liegt er still in der Spule, fließt kein Strom mehr. Wir ziehen den Magneten schnell aus der Spule heraus: Sofort entstehen wieder Spannung und Strom; aber dieser ist, wie das Galvanometer anzeigt, entgegengesetzt zum ersten gerichtet. Wir haben »Wechselstrom« erzeugt – genau eine Periode, einen Hin- und einen Hergang. Unser Netzstrom hat 50 solcher Perioden in der Sekunde. Wer sich mit diesen Versuchen näher befassen will, der baut am besten dazu das später beschriebene Galvanometer (vgl. S. 103).

Wir bauen einen Elektromagneten

Der Elektromagnet hat in der Technik überall dort, wo es auf große Feldstärken ankommt, den Dauermagneten aus Stahl und den keramischen Dauermagneten verdrängt. Der Elektromagnet braucht zwar elektrischen Strom, aber er läßt sich dadurch auch beliebig schalten (von Null bis zu verhältnismäßig großen Tragkräften einstellen). Wir bauen ihn aus einer Rundspule N_2 (vgl. unsere Werkstattnormen) mit 3000 Windungen eines Kupferlackdrahtes CuL (0,50 mm Durchmesser), aus dem Innenpol N_4 , der in dieser Spule als Kern steckt, und dem Außenpol N_5 , an dessen Mittelstück der Innenpol mit einer Mutter M10 festgeschraubt wird (Bild 32). Die Pole sind aus Weicheisen. Die Maße (in mm) siehe Tabelle S. 41.

Den Rundspulenkörper kleben wir aus Papier (mehrere Lagen ergeben das Rohr) und Pappe oder

Bild 32. Der Elektromagnet



Rundspule (N_2)	Innenpol (N_4)	Außenpol (N_5)
$a_1 = \varnothing 50$	$a_1 = \varnothing 12$	$a = 57$
$a_2 = \varnothing 15$	$a_2 = M10$	$b = 72,5$
$a_3 = \varnothing 13$	$b_1 = 85$	$c = 50$
$c = 65$	$b_2 = 70$	$d = 2,5$
$d = 3$		$e = \varnothing 10$
3000 Windungen		$f = 26$
CuL 0,50		$g = 25$

Hartpappe zusammen. Gewickelt wird die Spule mit unserer Wickelvorrichtung, die sich hier wieder einmal bewähren kann; eine Windung legt sich, von unserer Hand geführt, sauber neben die andere. Bei der nächsten Schicht laufen die Windungen dann wieder zur Ausgangsseite zurück und so fort. Die gesamte Wicklung wird mit einer Bandage aus Papier umhüllt, das mit Schellack getränkt wurde. *Vorsicht mit den beiden Drahtenden!* Sie werden an zwei bewegliche, stärkere Kupferdrähte (Litze) gelötet. Diese Anschlußdrähte befestigt man so am Magneten, daß die Lötstellen vor jeder Zugkraft geschützt sind. Es ist besonders ärgerlich, wenn der Anfang des Spulendrahtes im Innern der Spule abbricht. Vor dem Zusammensetzen lackieren wir die Eisenteile.

Der Gleichstromwiderstand der Spule beträgt 32...35 Ω . Bei 24 V fließt daher ein Strom von etwa 750 mA. Die *Amperewindungszahl*, das Maß für die *magnetische Durchflutung* Θ (sprich: theta) einer Spule, ist gleich dem Produkt aus Stromstärke I und Windungszahl N : in unserem Falle also $\Theta = I \cdot N = 0,75 \text{ A} \cdot 3000 = 2250 \text{ A}$ (oder auch Amperewindungen).

Solche Spulen werden vor allem in der Fernmeldetechnik sehr viel verwendet: in der Klingel, im Summer, Relais, Telegrafen, Fernsprecher. Die großen Spulen der Motoren, Stromerzeuger, Magnetkrane sind grundsätzlich ebenso aufgebaut, und beim Transformator gehören zu einem Eisenkern zwei Spulen. Sobald eine Spule mit Wechselstrom betrieben werden soll, nimmt man keinen *massiven* Weicheisenkern, sondern setzt diesen aus einzelnen Blechen oder Drähten, die durch Lack oder sehr dünnes Papier voneinander isoliert sind, zusammen. Dadurch vermeidet man Verluste durch unerwünschte, zusätzliche Ströme im Kern.

Unser Elektromagnet (Bild 32) mit Innen- und Außenpol erzeugt eine Anziehungskraft von etwa 100 N (früher 10 kp). Das ist sehr viel, und wir müssen unsere Uhr vor dem Arbeiten mit dem Magneten weit entfernt davon ablegen. Ist der rückwärtige Pol nicht als »Außenpol« an beiden Seiten nach vorn gezogen, so ist die magnetische Wirkung infolge des viel längeren Luftweges viel geringer. Mit und ohne Außenpol läßt sich der Kern leicht an einem Grundbrett befestigen.

Induktionsversuche

Mit dem Galvanometer und unserem Elektromagneten können wir folgenden Versuch machen: Wir schließen die Magnetspule an das Galvanometer an, und sobald wir nun einen Magnetpol an den Weicheisenkern halten, schlägt das Meßgerät aus – genauso, als hätten wir den Stabmagneten in die leere Spule gestoßen. Das rasche Entfernen des Magneten vom Kern wirkt sich ebenso aus wie das Herausziehen aus der Spule. Und warum? Weil der unmagnetische Weicheisenkern beim Annähern eines starken Magneten selber zum Magneten wird und sein Kraftfeld mit den Feldlinien aufbaut. Wir erinnern uns an die lange Kette von Büroklammern, die wir nach und nach an einen Magneten hängen können! Die winzigen »Elementarmagnete« liegen in unmagnetischem Eisen ungeordnet, so daß keine Wirkung nach außen auftritt. In einem magnetischen Kraftfeld ordnen sie sich (nach dem Gesetz, daß ungleichnamige Pole einander anziehen), und das Eisenstück wird dadurch zum Magneten (Bild 33).

Nimmt man das Eisen aus dem Magnetfeld heraus, so löst sich im Weicheisen die Ordnung

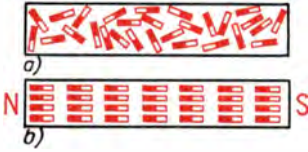


Bild 33. Anordnung der Elementarmagneten: a) im un-magnetischen Eisen, b) im magnetischen Eisen

wieder auf; es wird wieder unmagnetisch. Bei Stahl bleibt die Ordnung jedoch bestehen; einmal magnetisierter Stahl bleibt ein Magnet. Wegen dieser Eigenschaft können wir auch leicht Magneten aus Stahlstäben herstellen: Wir bestreichen den Stab mit einem Pol eines starken Magneten mehrmals in derselben Richtung, oder wir legen den Stab in eine Spule und schicken eine Zeitlang einen recht starken Strom hindurch. Mancher Bastler magnetisiert so seine Schraubenzieher, damit kleine Schrauben an ihnen haften bleiben.

Wir können sehr viele Variationen unserer Versuche durchführen; den Magneten langsamer und schneller bewegen, Abstände verändern, Windungszahlen verändern und anderes mehr. Immer bleibt die Forderung: Die Windungen der Spule müssen von einem *bewegten* Magnetfeld »geschnitten« werden; dann entsteht in ihnen eine Spannung durch *Induktion* (lat. *inducere* = hineinführen). Ob wir ein gleichbleibendes Magnetfeld relativ zur Spule bewegen oder ob wir immer an derselben Stelle in oder an der Spule ein Magnetfeld schnell entstehen und dann wieder zusammenfallen lassen – das ist gleichgültig. Nur die Feldlinien, die die Windungen *senkrecht durchlaufen*, wirken sich voll aus. Ist die Spule an ein Meßgerät angeschlossen, so haben wir einen geschlossenen Stromkreis; in ihm fließt dann ein elektrischer Strom. Das ist das *elektrodynamische Prinzip*: Hier wird eine elektrische »dynamis« erzeugt, eine Kraft, wie das griechische Wort »dynamis« auf deutsch heißt. Spannungserzeuger und Stromerzeuger (meist einfach *Generatoren*, also mehrdeutig »Erzeuger« genannt) hießen lange Zeit hindurch *Dynamomaschinen*. Diese beiden Grundsätze, das *elektromotorische* und das *elektrodynamische* Prinzip, sind die Grundlage zum Verständnis der meisten Geräte, die wir bauen. Wir finden sie leicht überall wieder: *die Physik in der Technik*. Denn das allen technischen Maschinen und Verfahren Gemeinsame ist das *Naturgesetz!*

Zur Wiederholung: Arbeit, Energie und Leistung

Elektrische Energie ist die Fähigkeit des elektrischen Stromes, *Arbeit* zu verrichten. Dabei wird die potentielle Energie elektrischer Ladungen in elektrodynamische Energie umgewandelt, die weiter in mechanische oder chemische Energie und in Wärmeenergie umgewandelt werden kann. Die *elektrische Leistung* P kennzeichnet die Menge der Energie, die ein elektrisches Gerät in der Zeiteinheit abgeben kann. Sie ist abhängig von der Spannung U und dem Strom I :

$$P = U \cdot I.$$

Dazu haben wir bereits ein Beispiel gerechnet.

Oft ist entweder nur der Strom oder nur die Spannung bekannt. Auch dann können wir die Leistung berechnen, allerdings müssen wir dann den Widerstand des Gerätes kennen. Aus dem Ohmschen Gesetz folgt sowohl $U = R \cdot I$ als auch $I = \frac{U}{R}$. Setzt man diese Beziehungen der Reihe nach in die Leistungsgleichung ein, ergibt sich

$$P = U \cdot I = R \cdot I \cdot I = R \cdot I^2 \text{ und}$$

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}.$$

Zwei Beispiele dazu:

1. Durch ein Meßgerät mit $R_1 = 80 \Omega$ fließt ein Strom von $I = 0,3 \text{ A}$. Welche Leistung wird im Meßgerät umgesetzt?

$$\begin{aligned} P &= R \cdot I^2 \\ &= 80 \Omega \cdot (0,3 \text{ A})^2 = 80 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot 0,09 \text{ A}^2 \\ &= 7,2 \text{ V} \cdot \text{A} = 7,2 \text{ W}. \end{aligned}$$

2. Ein Spannungsmesser mit $R_1 = 80 \Omega$ hat bei $U = 24 \text{ V}$ Vollausschlag. Wie hoch ist seine Belastung?

$$\begin{aligned} P &= \frac{U^2}{R} \\ &= \frac{(24 \text{ V})^2}{80 \Omega} = \frac{576 \text{ V}^2 \cdot \text{A}}{80 \text{ V}} = 7,2 \text{ W}. \end{aligned}$$

Für die Elektrotechnik ist das eine sehr geringe Leistung; üblich sind oftmals die Vielfachen der Grundeinheit Watt, nämlich *Kilowatt* ($1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$) oder *Megawatt* ($1 \text{ MW} = 10^3 \text{ kW} = 10^6 \text{ W}$).

Mit der Größenordnung Megawatt arbeiten nur Kraftwerke und Großverbraucher.

Wie in der Mechanik gilt auch in der Elektrotechnik, daß Leistung die Arbeit (bzw. Energie) je Zeit ist: $P = \frac{W}{t}$. Daraus folgt für die Arbeit (bzw.

Energie) allgemein

$$W = P \cdot t$$

und für die *elektrische Arbeit* (oder *elektrische Energie*) speziell

$$W = U \cdot I \cdot t.$$

Maßeinheiten sind die Wattsekunde (Ws), wobei 1 Ws = 1 J (Joule, sprich dschul) ist, die Wattstunde (Wh), die Kilowattstunde (kWh) und die Megawattstunde (MWh).

Ein Beispiel:

Eine 100-W-Glühlampe wird täglich im Durchschnitt 4 Stunden betrieben. Wie groß ist der jährliche »Energieverbrauch« (die Energie wird nicht *verbraucht*, sondern in Licht und Wärme *umgewandelt*), und wieviel kostet er? Wir rechnen das Jahr mit 365 Tagen und wissen, daß 1 kWh 0,08 M kostet.

$$\begin{aligned} W &= P \cdot t \\ &= 100 \text{ W} \cdot 365 \cdot 4 \text{ h} = 146000 \text{ Wh} = 146 \text{ kWh}. \end{aligned}$$

Die Kosten K erhalten wir durch Multiplikation der Energie mit den Kosten einer Kilowattstunde (K_E):

$$\begin{aligned} K &= W \cdot K_E \\ &= 146 \text{ kWh} \cdot 0,08 \frac{\text{M}}{\text{kWh}} = 11,68 \text{ M}. \end{aligned}$$

Damit sind wir in der Lage, unseren Energieverbrauch im Haushalt jederzeit zu berechnen und auch die entstehenden Kosten oder (und das ist noch bedeutender!) Überlegungen für sinnvolle Einsparungen zu begründen.

Unsere Stromerzeuger entstehen

Wir bauen zwei Modelle, ein leichtes, einfaches und ein gewichtigeres. Beide sind überraschend vielseitig verwendbar: als Erzeuger von Wechselspannung und Gleichspannung mit Dauermagneten

und mit »Fremderregung« – bei dieser wiederum als Innenpol- und als Außenpolmaschine. Das sind schon sechs Varianten; hinzu kommt noch: Die Stromerzeuger sind – mit einer entsprechenden Stromquelle – auch als Motoren zu verwenden!

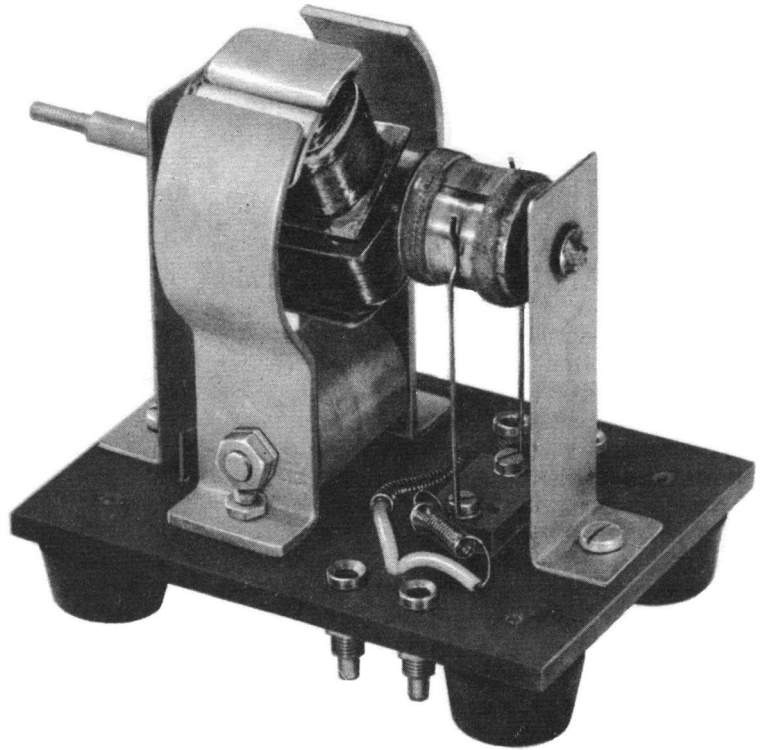
Es zeigt sich deutlich, wie eng diese beiden Prinzipien zusammenhängen: das elektrodynamische und das elektromotorische; wir sehen auch, wie eng die physikalischen Erscheinungen zusammengehören: *Magnetismus* und *elektrischer Strom*. Es ist nun auch leicht zu verstehen, worauf die Wirkung solcher Maschinen beruht, was sich in ihnen abspielen muß. Beim Stromerzeuger werden Drahtwindungen von bewegten Feldlinien senkrecht »geschnitten«; beim Motor bewegt ein Magnetfeld ein anderes. Welcher Teil jeweils feststeht und welcher bewegt wird, ist grundsätzlich einerlei; dadurch sind verschiedene Bauarten möglich. Und weil Stromerzeuger und Motor einander physikalisch und technisch so nahe verwandt sind, behandeln wir sie als »elektrische Maschine« auch gemeinsam.

Zuerst die kleine elektrische Maschine I

Im Bild 34 sehen wir das gesamte Modell. Auf der Grundplatte mit zwei Anschlüssen für die Ständerwicklung und den weiteren beiden für den Läufer sind befestigt: zwei Lagerböcke, das Brettchen für die beiden Stromabnehmer (*Bürsten*); auch heute noch so genannt, weil bei den ersten Maschinen hierfür Metallbürsten verwendet wurden, der Ständer mit dem feststehenden Magnetfeld.

Der Ständer (*Stator*) ist, wie der Name sagt, stets der feststehende Teil; in ihm dreht sich der Läufer (*Rotor*). Er wird wegen seiner T-Form auch »Anker« genannt. Wir wollen ihn besser *Läufer* nennen. Wir sehen diesen Läufer mit Antriebswelle, den beiden offenen Spulen zwischen kreisförmig ausgebogenen Enden der senkrechten Magnetpole, den »Polschuhen« (so genannt, weil sie den Polen – diese verlängernd – wie Schuhe angezogen werden). Die Polschuhe dienen dazu, den magnetischen Kraftfluß mit möglichst geringem Verlust durch den Luftzwischenraum auf die Kerne der Läuferspulen zu übertragen.

Bild 34. Unsere kleine elektrische Maschine I



Mit dem Läufer beginnen wir

Die *Läuferwelle* wird aus einem 4 mm dicken Eisenstab auf 116 mm Länge geschnitten; ein Ende erhält (für spätere Zwecke) ein 15 mm langes Gewinde M4. Nun folgt der *Kern der Läuferspule*, gleich mit Polschuhen in zwei Hälften hergestellt: Jede Hälfte wird nach Bild 35a aus Weicheisenblech (1 mm dick) gebogen. Wie das ohne großen Aufwand erfolgt, zeigt Bild 35b. Wir schneiden den Läuferblech-Rohling etwas länger als notwendig zu, schlagen mit einem 4 mm breiten und halbrund gefeilten Eisenstück die Wellenrundung ein (1.), ebnen dann die »hochkommenden« Blechenden wieder (2.) und kanten zum Schluß – bei beiden Blechen gemeinsam – die Polschuhhälften ab (3.). Anschließend werden beide Läuferbleche über der Läuferwelle fest miteinander vernietet; die Welle muß unver-

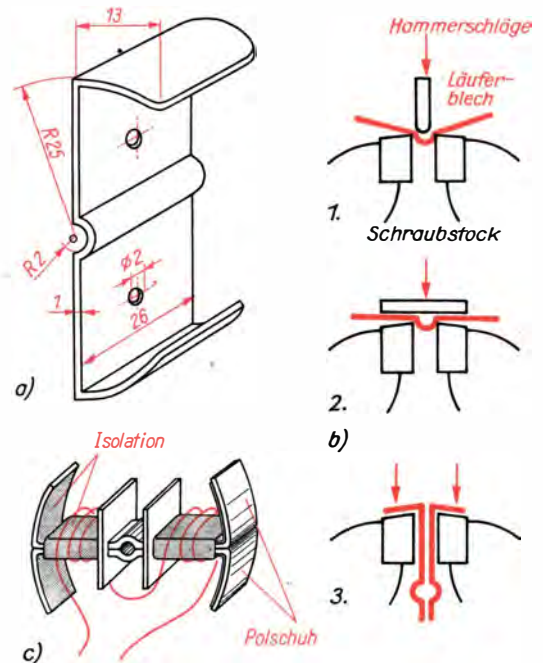


Bild 35. So fertigen wir den Läuferkern: a) das fertige Läuferblech, b) Biegen der Läuferbleche im Schraubstock, c) Läuferkern

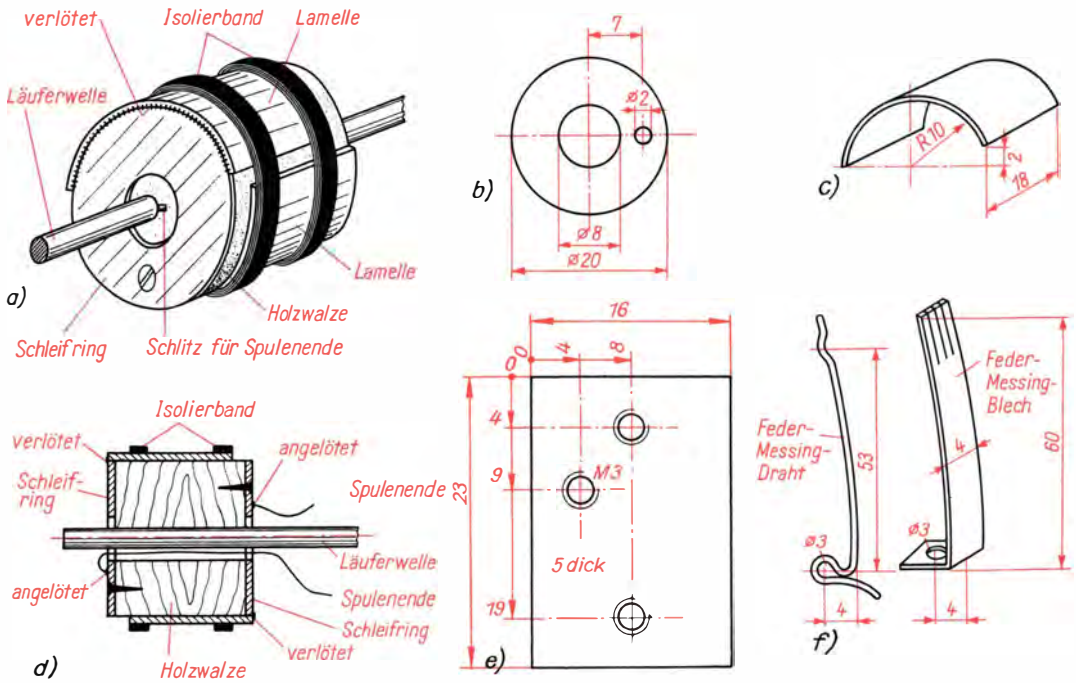


Bild 36. Der Kollektor und das Bürstenbrettchen: a) Kollektor mit Schleifring-Lamellenträger, b) Schleifring, c) Lamelle, d) Schnitt durch den fertigen Kollektor, e) Bürstenbrettchen, f) mögliche Bürstenkonstruktionen

dann mit kleinen Querstreifen zu verkleben. Die Pappscheiben werden mit Alleskleber zusätzlich befestigt; zwei kleine Holzstücke zwischen den beiden Scheiben (über der Welle) können die Festigkeit noch weiter erhöhen. Der Läufer soll sich ja sehr schnell drehen.

rückbar sitzen. Zum Schluß versuchen wir, die Polschuhe noch leicht zu runden (mit vorsichtigen Hammerschlägen oder mit einer Zange); sie dürfen später die Ständerpole nicht berühren.

Bild 35c zeigt zugleich, wie die beiden *Spulen* gewickelt werden, mit der Hand diesmal, weil der Spulenkörper nicht in unsere Wickelvorrichtung eingebaut werden kann. Jede Spule erhält 200 Windungen (Kupferlackdraht CuL 0,4). Wir beginnen an einer Wellenseite und wickeln stets in derselben Richtung, als wäre die Welle gar nicht vorhanden. Beide Wicklungen oder beide Hälften der Wicklungen, links und rechts von der Welle, sollen ja einen einzigen Elektromagneten bilden. Auf die vorletzte Lage legen wir einen Papierstreifen, damit die oberste Lage glatt und ordentlich aussieht; wir können diese Lage noch mit farblosem Lack oder etwas Alleskleber überziehen. Alle äußeren Flächen (außer Welle und Drähten) streichen wir mit Aluminiumbronze an. *Vorsicht mit den Drahtenden, damit sie nicht abbrechen!*

Der Läuferkern sitzt in der Mitte der Welle, also 45 mm von jedem Ende entfernt. Um Kurzschlüsse zu vermeiden, wird der Kern überall, wo sich später Wicklungsdrähte und Leitungen befinden, mit Lack oder Isolierband (oder mit beiden) isoliert, mit dem Isolierband umwickelt. Die runden Außenflächen der Polschuhe müssen dabei frei bleiben oder später von Lack und Isolierband mit Hilfe einer Rasierklinge wieder befreit werden. Die Spulen werden durch diese Isolation (Kernfläche und äußere Seitenfläche) sowie an der Wellenseite durch zwei 25 mm × 35 mm große Rechtecke aus Pappe (Bild 35c) begrenzt. Die Pappscheiben haben einen Schlitz, durch den wir sie über die Läuferbleche schieben können. Die beiden offenen Stellen sind

Wir *prüfen jetzt die Wicklung* auf erwünschten Stromdurchgang und auf (unerwünschten) Masse-

schluß. 4 V Gleichspannung schalten wir in Reihe mit unserem Spannungsmesser (an der Schalttafel ausgeschaltet und über die Apparateklemmen eingeschaltet!) an die Spulenenden. Zeigt das Meßgerät Spannung an (durch den Spannungsabfall in der Spule weniger als 4 V), so ist der Durchgang in Ordnung. Andernfalls müssen wir die Spule nochmals wickeln. Nun lösen wir den Kontakt an einem Spulenende und legen ihn an eine blanke Stelle der »Masse«, das heißt, wir verbinden einen Pol der Spannungsquelle mit den Eisenteilen. Jetzt darf der Spannungsmesser nichts anzeigen, andernfalls haben wir »Masseschluß« und müssen die Spule ebenfalls nochmals wickeln.

In 12 mm Abstand vom Läuferkern sitzt der 20 mm lange *Kollektor*, an dem Spannung und Strom abgenommen oder – wenn das Modell als Motor arbeitet – zugeführt werden. Der Kollektor (»Sammler«) ist eine Walze, ein Stück Besenstiel von 20 mm Durchmesser, und als Stromabnehmer doppelt verwendbar: mit zwei seitlichen Metallringen als Schleifringe für Wechselstrom und zwei Lamellen auf der Rundung für Gleichstrom (alle aus Messingblech, 0,5...1 mm dick).

Bild 36a zeigt den Aufbau des Kollektors. Auf der Holzwalze, dem Schleifring- und Lamellenträger, liegen zwei der Walzenrundung angepaßte *Lamellen* (gebogene Kupfer- oder Messingstreifen, Bild 36c), voneinander durch einen sehr kleinen Zwischenraum getrennt. Eine Lamelle ist mit dem einen Messing- oder Kupferschleifring (durchbohrte Scheibe, Bild 36b) auf der einen Stirnseite der Walze verlötet, die andere mit dem anderen Ring auf der anderen Seite. Die Lamellen sind etwas kürzer als die Walze, damit sie nicht die falschen Ringe berühren; sie werden mit schmalen Isolierbandstreifen und Alleskleber auf der Walze festgehalten. Die seitlichen Schleifringe sind mit je einer versenkten Holzschraube an der Walze zu befestigen. Die Holzwalze erhält eine Längsbohrung von 3,8 mm Durchmesser für die Läuferwelle; sie muß auf ihr sehr fest sitzen. Mit der Laubsäge sägen wir neben diese Bohrung einen kleinen Schlitz (etwa 1...2 mm tief); er ist der Weg für das Spulenende, das dann mit dem Schleifring der vom Läufer abgewandten Kollektorseite verlötet wird. Das andere Spulenende hat einen kürzeren Weg: Es wird an den nächstliegenden Schleifring angelötet. Ein Hinweis zur Montage: Die Welle wird an der Stelle, an die der Kollektor kommen soll, etwas angeraut

und mit Alleskleber bestrichen. Das lange Spulenende wird in den Schlitz neben der Walzenbohrung geführt und dort mit etwas Klebstoff befestigt. Dann schieben wir den Kollektor auf die Welle und richten ihn aus. Anschließend werden die Spulenenden an die Schleifringe gelötet. Auf die Läuferwelle – außerhalb des Lagerbockes – gehört dann noch (am Schluß aufzusetzen) eine Antriebscheibe (etwa 25 mm Durchmesser) mit Rille. Sehr gut geeignet ist eine anschraubbare Scheibe aus einem Metallbaukasten. Über das frei liegende Gewinde, das für spätere Versuche bestimmt ist, können wir ein Stück Isolierschlauch schieben. Damit ist der bewegliche Teil der Maschine fertig.

Wellenlager und Grundbrett folgen

Läufer und Welle sollen sich drehen – also müssen zwei *Lager* gebaut werden. Wir fertigen sie sehr einfach nach dem Haltewinkel N_6 (Bild 8) mit folgenden Größen in mm an: $a = 65$; $b = 15$; $c = 26$; $d = 1$; $e_1 = 4$; $e_2 = 4,2$; $g_1 = g_2 = 13$; $f_1 = 12$; $f_2 = 7$ (bei $h_1 = h_2 = 0$). Zwei solcher Lagerböcke brauchen wir; sie werden aus Eisenblech ausgeschnitten und gebogen. Die Lagerbohrung (am längeren Schenkel) wird sorgfältig gebohrt (4 mm); die Welle muß sich leicht drehen lassen, ohne daß sie klappert. Die beiden kurzen Schenkel, die auf dem Grundbrett befestigt werden sollen, erhalten je eine Bohrung für die Befestigungsschraube. Beide Lagerböcke werden zum Schluß mit Aluminiumbronze angestrichen.

Das *Grundbrett* besteht aus einer 4...6 mm dicken Hartpapierplatte, 110 mm × 80 mm groß. Bild 37 zeigt das Bohrschema und gibt zugleich die nötigen Gewindemaße für die Metall-Befestigungsschrauben an, die ohne Mutter verwendet werden können: L_1 und L_2 für die Lagerböcke, B für das Bürstenbrettchen, weitere vier in den Ecken zum Befestigen der üblichen Gummifüße. $T_1...T_4$ sind die Bohrungen für zwei Paar Telefonschrauben, S_1 und S_2 für den Ständer. Spannung und Strom werden über *Bürsten* vom oder zum Kollektor geführt. Wir stellen sie aus Messingfederdraht (1 mm Durchmesser) oder aus Messingfederblech durch Biegen her (Bild 36f). Da wir wahlweise Wechselspannung oder Gleichspannung abnehmen wollen, ist der Kollektor mit seitlichen Schleifrin-

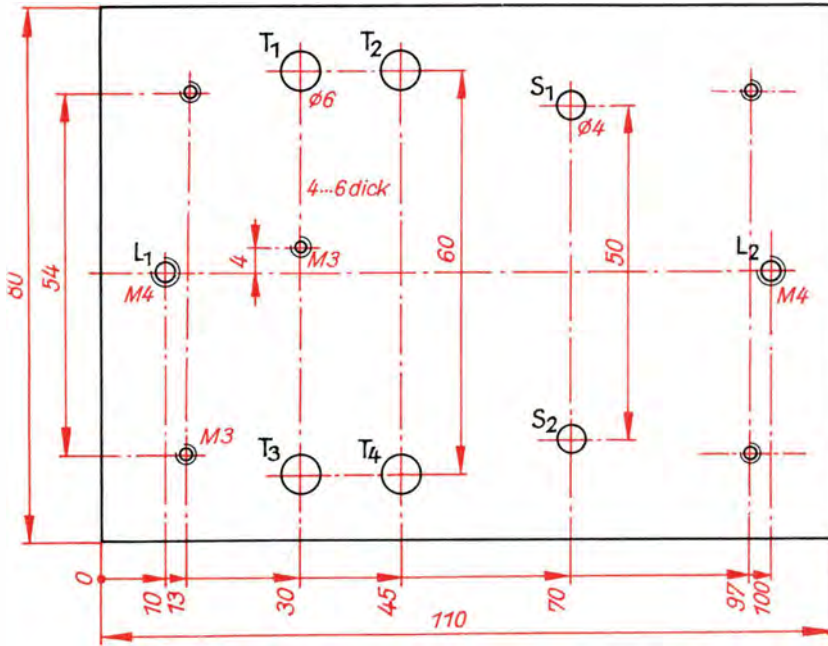


Bild 37. Grundbrett für die Maschine I

gen (für Wechselspannung) und mit Lamellen als Stromwendern (für Gleichspannung) an seiner gekrümmten Oberfläche ausgestattet. Wir könnten nun ein Paar Bürsten für die Ringe und ein zweites für die Lamellen einsetzen; besser (und reibungssparend) ist jedoch die Lösung, ein einziges Paar auf einem drehbaren Bürstenbrettchen anzubringen und dieses nach Bedarf so festzuschrauben, daß die Bürsten entweder auf den Lamellen oder auf den Schleifringen liegen.

Bei zwei Paar Bürsten brauchen wir noch ein weiteres Paar Telefonbuchsen; die vier Messingdrähte oder Federbleche werden – paarweise senkrecht zueinander angeordnet – auf dem Grundbrett verschraubt und mit den beiden Buchsenpaaren fest verbunden. Für die »Umschaltlösung« bauen wir ein Bürstenbrettchen aus Hartpapier (5 mm dick, Bild 36e). Die beiden symmetrisch angeordneten Bohrungen mit Gewinde M3 sind für die Befestigungsschrauben der Bürstenfedern bestimmt; bewegliche Drahtwendeln verbinden diese mit den Buchsen. Die Schraubengewinde dürfen nicht aus dem Bürstenbrettchen unten herausragen. In die dritte Bohrung mit Gewinde greift von der Unterseite des Grundbretts eine Metallschraube ein: Sie

hält das Bürstenbrettchen entweder senkrecht zur Läuferachse fest (Gleichstromabnahme) oder um 90° gedreht (Wechselstromabnahme). Die Bilder 34 und 38 machen diese beiden Stellungen deutlich. Der »verdrehte« Fall ist seltener; wir machen die Versuche zur Wechselstromerzeugung (Bürsten auf Schleifringen) vor allem am Anfang und benutzen die Maschine I dann fast nur noch als Antriebsmotor – vorwiegend mit Gleichstrom, auf alle Fälle mit den Bürsten auf den Lamellen.

Um auf Wechselstromentnahme zu schalten, lösen wir das Bürstenbrettchen, ziehen die Bürsten nach unten seitlich unter dem Kollektor fort, drehen das Brettchen um 90° (die Zuleitungswendeln dehnen sich dabei etwas aus) und schieben die Bürsten beide von derselben Seite der Läuferwelle auf die Schleifringe. Das Brettchen hat eine solche Größe, daß man es auch in der neuen Stellung anschrauben kann und daß die Federn mit dem richtigen Druck an den Schleifringen liegen.

Bei Federdraht können wir auch das Brettchen lockern, um 45° drehen, jede Bürstenfeder um die Kollektorkante auf einen Schleifring legen und das Brettchen wieder festschrauben (immer von der Unterseite des Grundbrettes aus). Das geht leichter

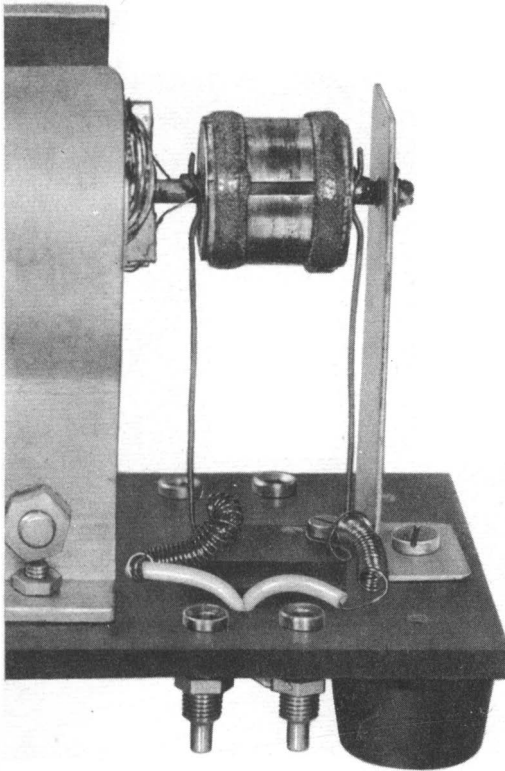


Bild 38. Stellung der Bürsten bei Wechselstromerzeugung

und schneller; aber die Federbürsten müssen dann meist etwas nachgebogen werden. »Try it!« (Versuchen Sie es!) pflegte Michael Faraday zu sagen. In der Elektrotechnik haben die Stromerzeuger zwei Kollektoren nebeneinander, einen mit Schleifringen und den zweiten als Stromwender (*Kommutator*, lat. *commutare* = wechseln, ändern) mit Lamellen; dazu gehören zwei Paar Bürsten.

Die Spule ist zur Drehung vorbereitet, jetzt fehlt noch das *magnetische Feld*, dessen Feldlinien die umlaufende Spule durchdringen sollen.

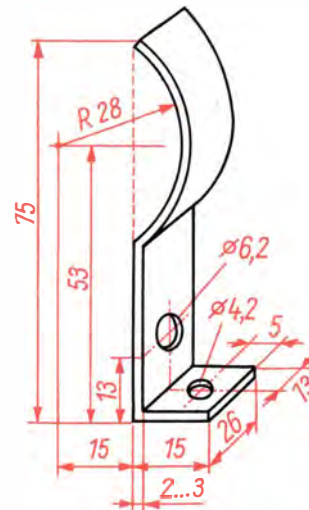
Der Ständer mit Dauermagneten oder Elektromagneten

Bild 34 zeigt die Form des Ständers. Unten liegt ein Magnet, senkrecht zur Läuferwelle, an beiden Seiten des Magneten befindet sich als Verlängerung

je ein Ständerblech als Polschuh aus Weicheisenblech (2...3 mm dick). Diese beiden – einander gleichen – Ständerbleche bauen wir nach Bild 39 zuerst. Vor allem die innere Hohlfläche (Zylinderfläche) muß sehr sauber auf den Halbkreis von 28 mm Radius gearbeitet werden, denn in ihr sollen die abgerundeten Polschuhe der Läufermagneten umlaufen. Der Luftzwischenraum zwischen Läuferpolen und Ständerpolen muß so klein wie möglich sein; je geringer er ist, um so besser wirken die Magnetfelder aufeinander ein, und um so besser arbeitet unsere Maschine. Damit beide Ständer wirklich genau die gleiche Form erhalten, stellen wir aus harter Pappe oder aus Blech eine Schablone (Lehre) her, mit der wir die Form des Ständerbleches bei der Bearbeitung genau prüfen. Die Rundung wird über einem Rundeisen oder Rohr desselben Durchmessers (56 mm) gebogen. Die Oberflächen werden sauber geglättet und mit Aluminiumbronze gestrichen.

Der Hauptteil des Ständers ist der *Magnet*. Wir beschreiten wieder zwei Wege, um auch vergleichen zu können; mit einem *Dauermagneten* und mit einem *Elektromagneten*. Den Dauermagneten setzen wir aus runden flachen keramischen Magneten mit 6 mm Innendurchmesser und 15...25 mm Außendurchmesser so zusammen, daß sich eine Gesamtlänge von 30 mm ergibt, also beispielsweise aus fünf

Bild 39. Ständerblech der Maschine I



Magneten mit 6 mm Dicke. Genaugenommen brauchen wir das gar nicht zu tun: Wir lassen die einzelnen runden Magnetscheiben einfach aufeinanderzurollen; sie setzen sich dann ganz allein richtig zusammen! Das sieht fast wie ein Zauberkunststück aus. Wenn diese Magneten den Platz zwischen den Ständern nicht ganz ausfüllen, legen wir eine eiserne Unterlegscheibe entsprechender Größe dazu; es darf kein Luftzwischenraum entstehen.

Die Dauermagneten müssen durch einen Stab fest verschraubt und gehalten werden. Wir dürfen aber, um einen magnetischen Kurzschluß zu vermeiden, keinen Eisenkern verwenden und bauen einen »Kern« aus Aluminium oder Messing. Wir schneiden dazu einen Stab von 6 mm Durchmesser auf eine Länge von 47 mm. Beide Enden erhalten auf 8 mm ein Gewinde M6. Dann bleiben für den Magneten 31 mm übrig.

Um alle Teile für die elektrische Maschine I fertig zu haben, stellen wir auch gleich den Elektromagneten her. Sein Kern muß aus Weicheisen sein. Unter Weicheisen verstehen wir kein »weiches«, sondern nicht härteres und nur geringfügig magnetisierbares Eisen (z. B. großer Nagel oder Schraube M8 mit gewindefreiem Teil). Physikalisch gesehen, könnten wir ihn ebenso wie den Nichteisen-Halterstab bauen; aber dann besteht eine Gefahr: Die gewickelte Spule ist, im Gegensatz zu den aneinandergereihten Magneten, etwas nachgiebig. Beim Anziehen der Muttern am Kern könnten die Ständerbleche zusammengedrückt werden, so daß der Läufer oben anstieße. Wir schneiden daher einen 8-mm-Weicheisenstab auf die Länge von 47 mm, drehen an beiden Enden 8 mm Länge auf einen Durchmesser von 6 mm ab und schneiden darauf ein Gewinde M6. Steht uns keine Drehmaschine zur Verfügung, so müssen wir die 2 mm vom Umfang abfeilen. Damit das schön gleichmäßig rund und mittig erfolgt, gehen wir nach Bild 40 vor (die roten Flächen werden jeweils abgefeilt):

Wir feilen zunächst an allen vier Seiten je 1 mm ab; es entsteht (1. bis 4.) ein quadratischer Querschnitt mit 6 mm Seitenlänge. Nun wird aus dem Quadrat ein Achteck (5.), indem wir die vier Ecken abfeilen; über das Sechzehneck (6., auf gleiche Weise entstanden) erhalten wir schließlich (7.) den Kreisquerschnitt mit 6 mm Durchmesser und können auf diese Enden das Gewinde M6 auf 8 mm Länge schneiden. Das Mittelstück des Spulenkernes mit 8 mm Durchmesser ist 31 mm lang und sichert

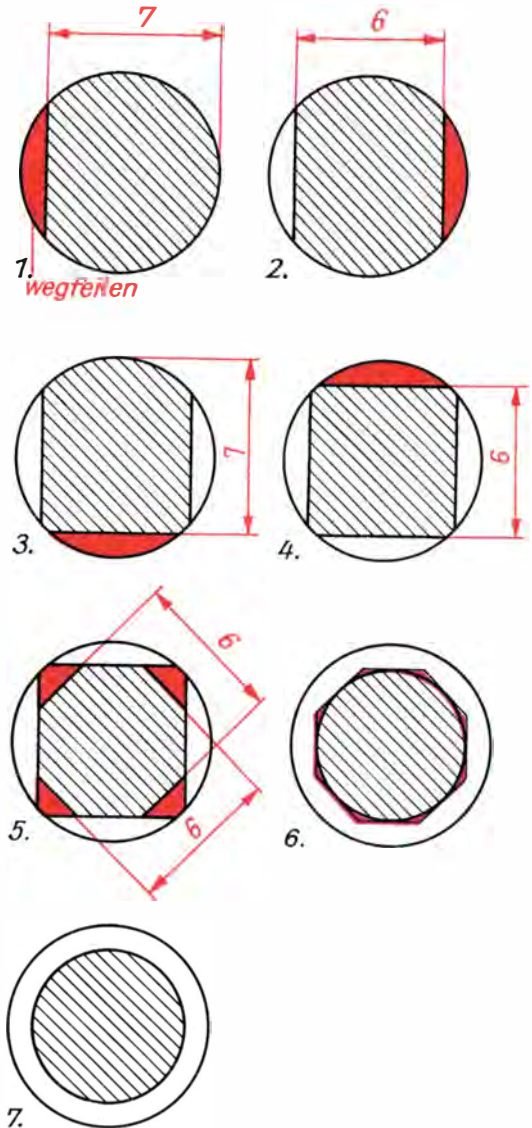


Bild 40. So werden die Kernenden abgefeilt

durch seinen größeren Durchmesser den genauen Abstand der Ständerbleche.

Hinzu kommt ein Rundspulenkörper nach unserer Norm N₂ (Bild 8, Maße in mm): $a_1 = 24$; $a_2 = 10$; $a_3 = 8$; $c = 31$; $d = 1,5$. Das Rohr kleben wir aus Zeichenkarton am einfachsten gleich über

den Eisenkern; mehrere Lagen miteinander verkleben. Die Seitenscheiben sind aus Pappkarton. Der ganze Körper ist mit Schellack zu tränken. Die Spule wird aus etwa 1000 Windungen (Kupferlackdraht CuL 0,4) auf der Vorrichtung gewickelt; den Spulenkörper müssen wir daher vom Kern abziehen können. Die Drahtenden werden in üblicher Weise vorsichtig behandelt, etwa 150 mm lang gelassen und auf etwa 80 mm Länge mit Isolierschlauch überzogen. Die Spule decken wir mit schellackgetränktem Papier ab; wir legen sie dann einstweilen beiseite.

Die Montage der elektrischen Maschine I

1. Einen Lagerbock mit Schraube M4 am Grundbrett festschrauben.
2. Läuferwelle mit Läufer und Kollektor in beide Lager einstecken; zweiten Lagerbock festschrauben.
3. Läuferwelle gegen Längsspiel sichern – am besten durch zwei Unterlegscheiben, die außen auf der Welle (gleich neben den Lagern) angelötet werden.
4. Ein Ständerblech mit Schraube M4 auf dem Grundbrett anschrauben: Die Schraube wird von unten eingesetzt und erhält oben die Mutter.
5. Der Nichteisen-Haltestab für die Magneten erhält eine Mutter an einem Ende und wird von außen durch das Ständerblech gesteckt.
6. An der Innenseite des Ständerbleches die Dauermagneten (gegebenenfalls mit großer eiserner Unterlegscheibe) auf den Stab schieben.
7. Das andere Ständerblech auf das noch freie Ende des Magnet-Haltestabes stecken und hier verschrauben.
8. Dieses zweite Ständerblech wird in gleicher Weise wie das erste mit dem Grundbrett verbunden.
9. Die Bürsten mit Schrauben M3 auf dem Bürstenbrettchen befestigen und über zwei Drahtwendeln mit einem Buchsenpaar verbinden.
10. Das Bürstenbrettchen mit einer Schraube M3 (von unten) am Grundbrett anschrauben; die Bürsten werden so gebogen, daß sie leicht und sicher am Kollektor anliegen und ausreichenden Kontakt haben.

11. Wir schmieren die beiden Lager und prüfen, ob Läufer und Kollektor leicht laufen; wenn das der Fall ist, können wir mit den Versuchen beginnen.

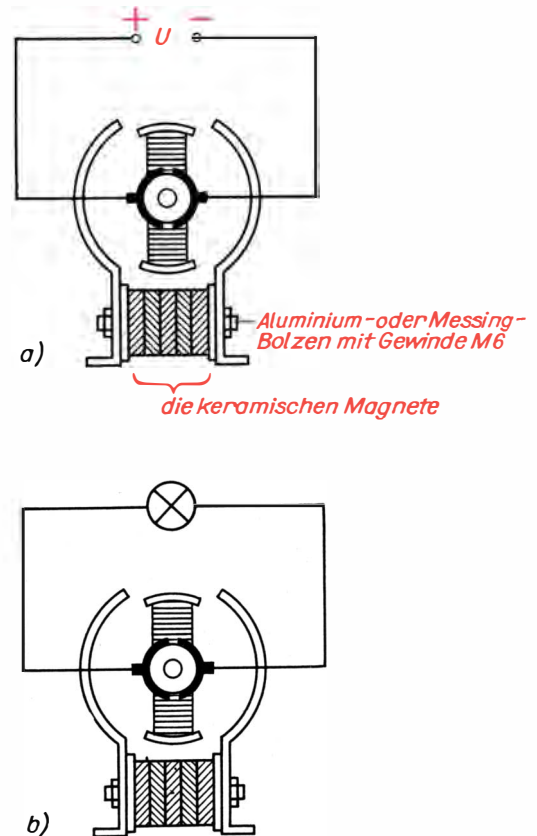
Experimente mit der elektrischen Maschine I

Stromerzeuger und Motor mit Dauermagneten

Versuch 1:

Die Maschine I als Gleichstrom nach Bild 41a verschiedene Gleich 4...15 V (über die Kollektorbür-

Bild 41. Die kleine elektrische Maschine I als Gleichstrommotor (a) und als Gleichstromerzeuger (b)



fer und beobachten den Lauf des Motors und den Stromverbrauch: 0,15...0,3 A. Die Bürsten schleifen auf den Lamellen.

Versuch 2:

Die Maschine I als Gleichstromerzeuger. Bild 41b zeigt, daß diesmal kein Strom zugeführt, sondern vielmehr eine kleine Glühlampe 4 V/0,3 A als Verbraucher an die Bürsten gelegt wird. Treiben wir die Maschine mit irgendeiner Antriebsvorrichtung an – beispielsweise mit einem Nähmaschinenmotor oder mit Handantrieb und einer zweifachen Übersetzung entsprechend dem Bild 42 – so leuchtet die Glühlampe auf, allerdings nur schwach. Warum nicht heller? Wir wissen, daß jeder umlaufende Stromerzeuger zunächst Wechselstrom erzeugt; das liegt in seiner Natur und Bauart. Um Gleichstrom zu erhalten, haben wir den Kollektor mit zwei Lamellen als Stromwender (Kommutator) hinzugebaut; dieser schaltet den Strom bei jedem Wechsel der Stromrichtung so um, daß die Stromrichtung stets die gleiche bleibt. Solche Zusatzeinrichtungen »verbrauchen« immer Energie – wir kennen das auch von den Gleichrichtern an der Schalttafel. Mit den Meßgeräten unserer Schalttafel messen wir am laufenden Stromerzeuger (nach Bild 43): die Spannung bei Leerlauf (ohne Stromverbraucher) $U_L = 3\text{ V}$, den Strom bei Kurzschluß (Strommesser an die Bürsten geschaltet) $I_K = 0,2\text{ A}$.

Die Wirkung des Stromwenders läßt sich sehr gut beobachten, wenn wir an Stelle des Glühlämpchens ein Galvanometer schalten – etwa das auf den S. 103ff. beschriebene mit einem Meßbereich von 2 mA und 100 mV. Wir drehen den Läufer mit den Fingern, einmal langsamer, einmal schneller: Der Zeiger schlägt nach derselben Seite aus; wir haben (stoßartigen) Gleichstrom.

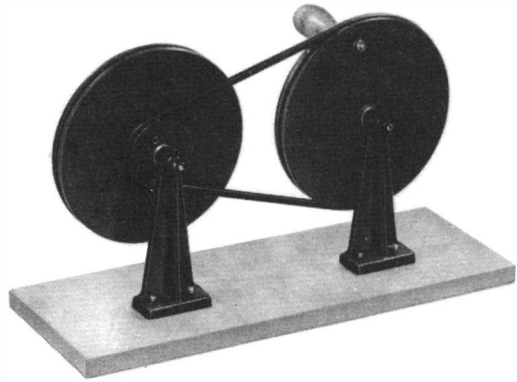


Bild 42. Antriebsvorrichtung: Scheibendurchmesser z. B. zweimal 150 mm und einmal 50 mm

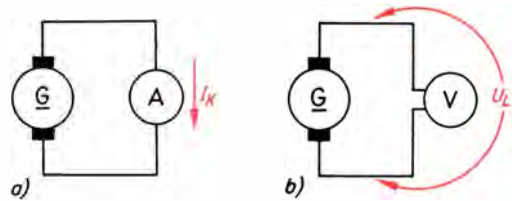


Bild 43. Messen des Stromes bei Kurzschluß (a) und der Spannung bei Leerlauf (b)

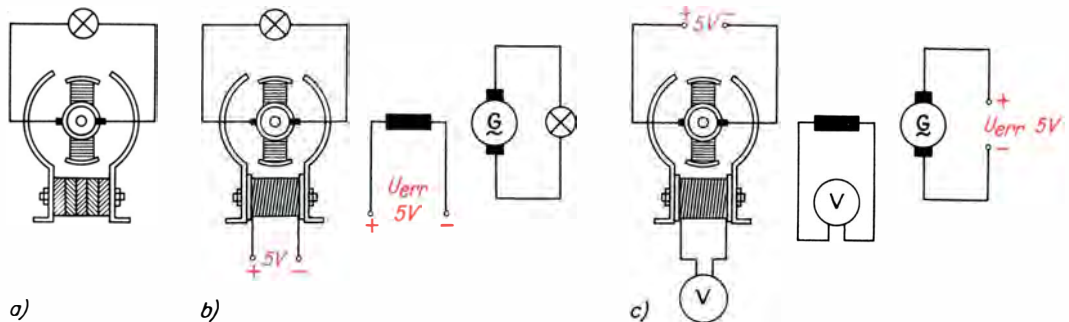


Bild 44. Versuche mit der Maschine I: a) Wechselstromerzeuger, b) fremderregte Außenpolmaschine, c) Innenpolmaschine

Versuch 3:

Die Maschine I als Wechselstromerzeuger. Wir lösen das Bürstenbrettchen, ziehen die Bürsten vom Kollektor ab und drehen das Brettchen um 90° . Dann legen wir die Bürsten an einer Seite der Läuferwelle an die beiden Schleifringe des Kollektors und schrauben das Brettchen wieder fest. Nun gilt das Bild 44a. Zum Vergleich führen wir zuerst den Versuch mit »Fingerantrieb« und Galvanometer durch. Dessen Zeiger schwingt jetzt hin und her und zeigt eindeutig den Wechselstrom an. Durch einen Motor angetrieben, bringt die Maschine als *Wechselstromerzeuger* das Glühlämpchen $4\text{ V}/0,3\text{ A}$ zum hellen Leuchten. Wir messen wieder: $U_L = 4\text{ V}$, $I_K = 0,23\text{ A}$. Es fehlt also nicht mehr viel an der Leistung des Glühlämpchens. Damit sind die Versuche mit dem Dauermagnet-Ständerfeld beendet, nun wird der Dauermagnet gegen den Elektromagneten eingetauscht.

Die Maschine I wird durch einen Elektromagneten fremderregt

Der Umbau geht so vor sich:

1. Haltestab der Dauermagneten abschrauben und herausziehen.
2. Ein Ständerblech abschrauben; die Magneten beiseite legen.
3. Elektromagnet-Kern am zweiten (stehengebliebenen) Ständerblech anschrauben; Spule auf den Kern schieben.
4. Die beiden Drahtenden der Spule durch eine Bohrung unter das Grundbrett führen und hier mit dem (bisher freien) Buchsenpaar verbinden.
5. Das erste Ständerblech auf das freie Kernende stecken, mit ihm verschrauben und am Grundbrett festschrauben.

Versuch 4:

Die Maschine I als Wechselstromerzeuger mit Bürsten auf den Schleifringen. Bild 44b zeigt die Schaltung: Der Ständerfeldmagnet wird mit (beispielsweise) 5 V Gleichspannung erregt; an die Bürsten (den Läufer) wird das Glühlämpchen gelegt. Daneben ist das symbolisch gezeichnet (das G stammt von der Bezeichnung Generator). U_{err} ist die Erregerspannung, die wir an den Ständerfeldmagneten (Erregermagneten) legen. Die angetrie-

bene Maschine läßt das Glühlämpchen $4\text{ V}/0,3\text{ A}$ aufleuchten; eine höhere Erregerspannung verstärkt die Wirkung. Messungen ergeben bei $U_{\text{err}} = 5\text{ V}$: $U_L = 4\text{ V}$, $I_K = 0,26\text{ A}$. Unser Modell ist hier als *Außenpolmaschine* geschaltet. Das bedeutet, daß die »Pole« der feststehenden Ständerfeldmagneten (bei uns freilich nur einer) außen im Gehäuse liegen – um den Läufer herum angeordnet. Die elektrischen Maschinen der Praxis haben stets mehrere, oft sogar sehr viele einzelne Magnetfelder (paarweise gegenüberliegend) im Ständergehäuse.

Versuch 5:

Die Maschine I als Innenpolmaschine. Selbstverständlich wollen wir auch diese Maschine aufbauen. Wir sehen aus Bild 44c, daß die Anschlüsse umgekehrt sind: Die Erregerspannung $U_{\text{err}} = 5\text{ V}$ — (Gleichspannung) liegt am Läufer (über die Bürsten); der erzeugte Strom wird an der Feldspule abgenommen. Alles ist umgekehrt: Der Läufer ist zum umlaufenden Magneten geworden und hat die bisherige Rolle des Ständers übernommen; im Ständer entstehen die Spannungen und Ströme. Hohe Spannungen sind vom Ständer leichter abzunehmen als von den schwieriger zu isolierenden Schleifringen und Bürsten; für Spannungen von $10000 \dots 20000\text{ V}$ baut man daher Innenpolmaschinen. Für unsere bescheidene Spannung ist diese Bauart ungünstiger. Unser Lämpchen leuchtet nicht auf; wir müssen ein schwächeres nehmen oder messen: Bei $U_{\text{err}} = 5\text{ V}$ — erhalten wir $U_L = 4\text{ V}$ ~ und $I_K = 0,07\text{ A}$ ~. Es ist also bewiesen, daß es auch »so herum« geht!

Leser, die eine logische Reihenfolge erwarten, werden jetzt vielleicht sagen: »Wenn wir schon einmal die Bürsten an den Schleifringen haben und mit Wechselstrom experimentieren, dann müßten wir jetzt noch versuchen, den Stromerzeuger mit zugeführtem Wechselstrom als Motor laufen zu lassen«. Das ist durchaus richtig, hat aber eine Schwierigkeit: Bei unserem Kollektor mit den zwei Lamellen haben wir die Gleichrichtung des Stromes in sehr langsamem Tempo durchgeführt. Schicken wir Wechselstrom von 50 Hz , das heißt 100 Wechseln der Stromrichtung je Sekunde, in unser Modell, so bleibt der Läufer zitternd stehen – 6000 Richtungsänderungen in der Minute kann er nicht folgen.

Wenn wir es versuchen wollen, schalten wir das Modell nach Bild 44c; der Läufer erhält eine – auch in der Drehung – gleichbleibende Polarität durch

Gleichstrom. An die Ständerwicklung legen wir (statt des Spannungsmessers) die Wechselspannung. Sofort wechseln die beiden Ständerpole 6000mal in der Minute ihre Polarität; 3000mal ist der eine ein Nordpol und der andere zugleich ein Südpol, und 3000mal je Minute, immer schön abwechselnd, ist die Polarität gerade umgekehrt. Der Läufer mit seiner gleichbleibenden Polarität muß sich nun sehr schnell drehen, um sich immer zur rechten Zeit – jede fünfzigstel Sekunde – mit seinem Dauer-Südpol auf den kurzlebigen Nordpol des Ständers zuzubewegen. Nur so kann er die Impulse, die magnetischen Anziehungskräfte, mitbekommen. Die Folge: Er muß sich dreitausendmal in der Minute drehen. Man nennt das *synchron* (gleichzeitig). Der Nachteil dieses *Synchronmotors* liegt auf der Hand: Er hat nur eine einzige Drehzahl, abhängig von seiner Polzahl und der Wechselstromfrequenz. Wird er so belastet, daß er einmal zurückbleibt, so fällt er »aus

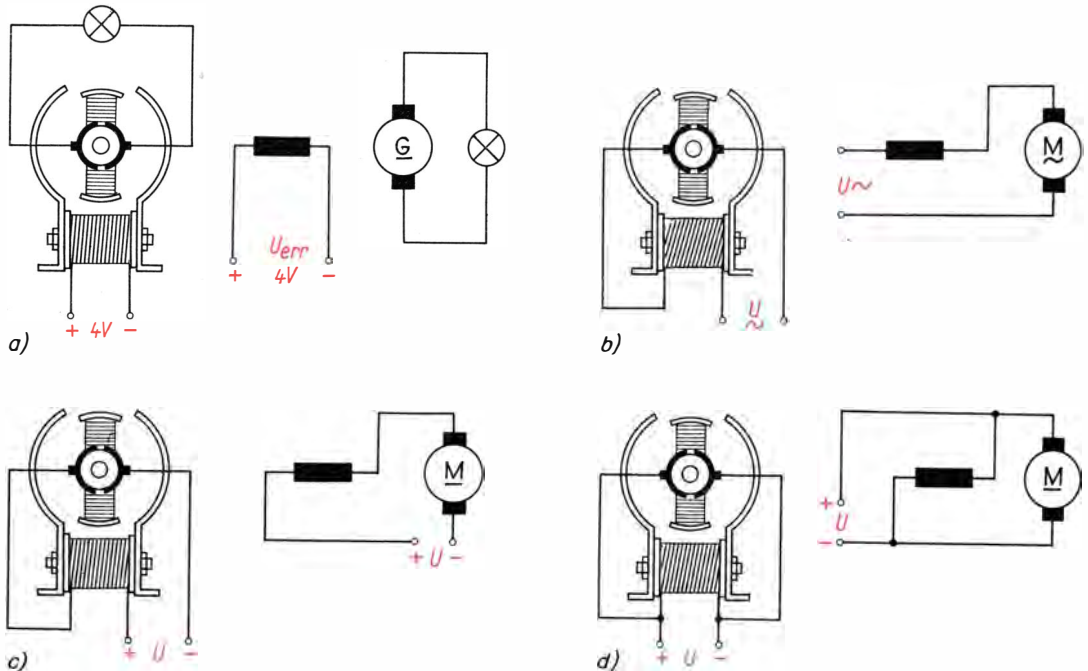
dem Tritt« und bleibt stehen. Er wird daher nur in Sonderfällen verwendet, wo es auf unveränderte Umdrehungszahl ankommt, beispielsweise als Antrieb in Uhren, Tonbandgeräten und Plattenspielern.

Wollen wir es versuchen, lieber Leser? Dann schalten wir, wie angegeben, und stecken auf das freie Läuferwellenende eine kleine Rolle mit einer aufgewickelten Schnur. Ziehen Sie die Schnur sehr schnell ab (Modell dabei festhalten!), so wie man einen Kreisel aufzieht! Wenn Sie etwas Glück haben, erreicht der Läufer die nötigen 3000 Umdrehungen je Minute und läuft synchron allein weiter (Synchronmotoren brauchen stets irgendeinen Anlasser). Grundsätzlich ist jedoch die Schaltung mit den Schleifringen hier nur zur Stromerzeugung gedacht.

Versuch 6:

Die Maschine I als Gleichstromerzeuger. Wir legen die beiden Bürsten in der bekannten Weise (durch Drehen des Bürstenbrettchens) von den Schleifringen wieder auf die Lamellen. Bild 45a zeigt die Anordnung schematisch und mit Symbol-Schalt-skizze. Zunächst legen wir das Galvanometer an die Stelle des Glühlämpchens, schalten die Fremd-

Bild 45. Weitere Versuche mit der Maschine I: a) fremderregte Maschine mit Stromwender als Gleichstromerzeuger, b) Wechselstrom-Hauptschlußmotor, c) Gleichstrom-Hauptschlußmotor, d) Gleichstrom-Nebenschlußmotor



erregung (4 V —) ein und drehen den Läufer mit den Fingern. Das Meßgerät zeigt die Stromstöße an – und alle in derselben Richtung, weil der Stromwender am Kollektor (der Kommutator) die zweite Richtung mit Hilfe der beiden Lamellen stets sofort umschaltet.

Wir können dann einiges verändern: Höhe der Erregerspannung und Richtung des Erregerstromes und anderes mehr. Anschließend legen wir das Glühlämpchen 4 V/0,3 A in den erzeugten Stromkreis; es zeigt sich ein mäßiges Leuchten, das durch höhere Erregerspannung verstärkt werden kann. Als Antrieb ist auch hier wieder ein kleiner Elektromotor oder eine mechanische Vorrichtung (s. Bild 42) geeignet. Messungen ergeben bei $U_{\text{err}} = 4 \text{ V}$ die Werte: $U_L = 3,5 \text{ V}$; $I_K = 0,22 \text{ A}$.

Versuch 7:

Die Maschine I als Wechselstrom-Hauptschlußmotor (Reihenschlußmotor). Hauptschluß oder Reihenschluß bedeutet, daß Ständerspule und Läuferpule in Reihe geschaltet sind (Bild 45b). Kennzeichen eines so geschalteten Motors: Mit wachsender Belastung steigt die Stromstärke im Motor, während seine Drehzahl sinkt. Der Motor entwickelt daher auch bei größerer Belastung starke Kräfte, wenn auch bei kleinerer Drehzahl. Wegen dieses Verhaltens wird er bei elektrischen Bahnen (Bergauffahrt!), Walz- und Hüttenwerken, Antrieben für Krane, Aufzügen und anderen Anlagen bevorzugt. In der Praxis haben alle Wicklungen geringen Ohmschen Widerstand, also verhältnismäßig wenige Windungen dicken Drahtes. Unser Modell läuft an Wechselstrom ($U = 17 \dots 20 \text{ V}$) mit $I = 0,4 \dots 0,5 \text{ A}$. Daß wir hier eine höhere Spannung (und damit eine größere Leistung) brauchen, liegt daran, daß der Wechselstrom in den Spulen einen zusätzlichen (induktiven) Widerstand zu überwinden hat. Außerdem ist das Stromwendersystem – genaugenommen – für Gleichstrom gedacht. Nur weil Läufer und Ständer hintereinanderliegen, wirken sie gleichsinnig, und der Motor läuft auch mit Wechselstrom (als »Universalmotor«). Am Strommesser können wir das Ansteigen der Stromstärke beobachten, wenn wir den Motor belasten, beispielsweise mit den Fingern bremsen.

Ein Nachteil unserer einfachen Bauart zeigt sich spätestens jetzt: Wenn der Läufer in Ruhe genau waagrecht zwischen den Ständerpolen liegt, dann läuft er nicht von selbst an, sondern muß etwas

angestoßen werden. Diese »tote Stellung«, bei der die entgegengesetzten, einander anziehenden Pole unmittelbar benachbart stehen, läßt sich bei zwei Polen eines Läufers nicht vermeiden. In der Praxis haben die Maschinen stets mehrere Polpaare im Ständer und im Läufer mit entsprechend vielen Spulen und Lamellen; da ist keine »tote Stellung« möglich, sondern stets irgendwo eine Drehkraft vorhanden, die den Läufer in Schwung bringt. Wir werden bei der großen elektrischen Maschine einen solchen Läufer bauen.

Versuch 8:

Die Maschine I als Gleichstrom-Hauptschlußmotor. Bild 45c zeigt, daß die Schaltung die gleiche wie beim vorhergehenden Versuch ist – nur ist die Stromart jetzt Gleichstrom. Als Spannung genügen $U = 5 \dots 12 \text{ V}$ —; der Motor läuft dann bei einer Stromstärke $I = 0,3 \dots 0,5 \text{ A}$ mit einer recht beachtlichen Kraft. Unsere elektrische Maschine I ist in dieser Anordnung am einfachsten und am besten zu verwenden. Den Drehsinn des Läufers ändern wir, indem wir die Anschlüsse entweder beim Ständerfeld oder zum Läufer vertauschen (umpolen).

Versuch 9:

Die Maschine I als Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Nach Bild 45d entnehmen wir unserer Schalttafel die Gleichspannung $5 \dots 7 \text{ V}$ gleichzeitig (nebeneinander) für beide Stromkreise: für den Läuferkreis und für den Erregerkreis (Ständerkreis). Für Versuchsänderungen ist es gut, als Erregerstromquelle zur Abwechslung eine Batterie zu benutzen, möglichst mit verschiedenen Spannungen. In dieser Schaltung läuft der Motor trotz der geringen Spannung ebenfalls gut; beim Abbremsen können wir feststellen, daß sich die Stromstärke nicht so stark erhöht wie bei der Hauptschlußschaltung. Bei den Motoren in der Praxis ist die Drehzahl von der Belastung fast unabhängig. Dagegen führt eine Schwächung des Ständerfeldes zu höheren Drehzahlen. Das merken wir schon, wenn wir das Ständerfeld an $7 \dots 8 \text{ V}$ — aus der Schalttafel und danach an eine Taschenlampenbatterie mit 4 V — legen. Die Drehrichtung ändern wir, indem wir (wie beim Reihenschlußmotor) die Anschlüsse entweder zur Feldspule oder zum Läufer vertauschen (umpolen).

Da der Gleichstrom-Nebenschlußmotor durch die Änderung der Ständerfeldstärke (und der Läuferspannung) sehr bequem in seiner Drehzahl zu

regeln ist, wird er sehr vielseitig verwendet, unter anderem zum Antrieb von Werkzeugmaschinen.

Zum Schluß dieser Versuchsreihe sei darauf hingewiesen, daß alle hier angegebenen Werte von Spannung und Strom am vorliegenden Modell gemessen worden sind. Es ist sehr wohl möglich, daß bei jedem anderen Modell andere und auch bessere Werte auftreten. Die Abhängigkeiten und Zusammenhänge sind jedoch überall gleich. Das gilt für alle in diesem Buch beschriebenen Modelle.

Wir bauen die große elektrische Maschine II

Die kleine elektrische Maschine, die wir gebaut und zu verschiedenen Versuchen verwendet haben, leistet schon allerhand. Man kann sie beispielsweise als Antriebsmotor lange Zeit laufen lassen, ehe die Bürsten erneuert werden müssen, weil sie durchgeschuert sind. Für höhere Ansprüche, das

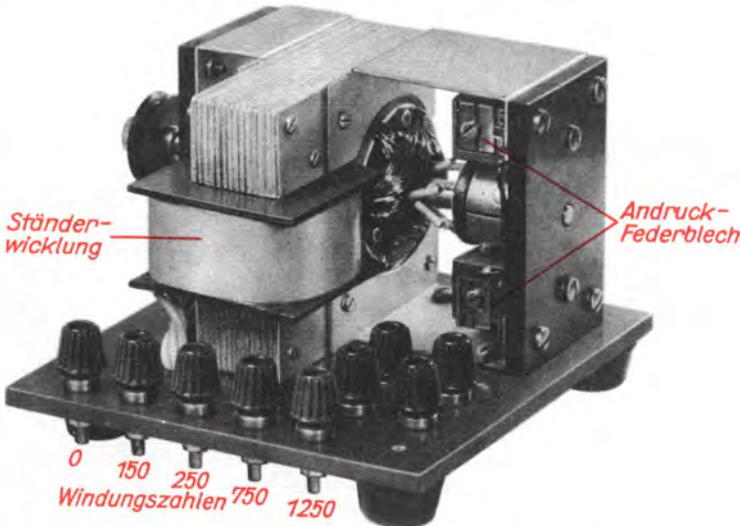
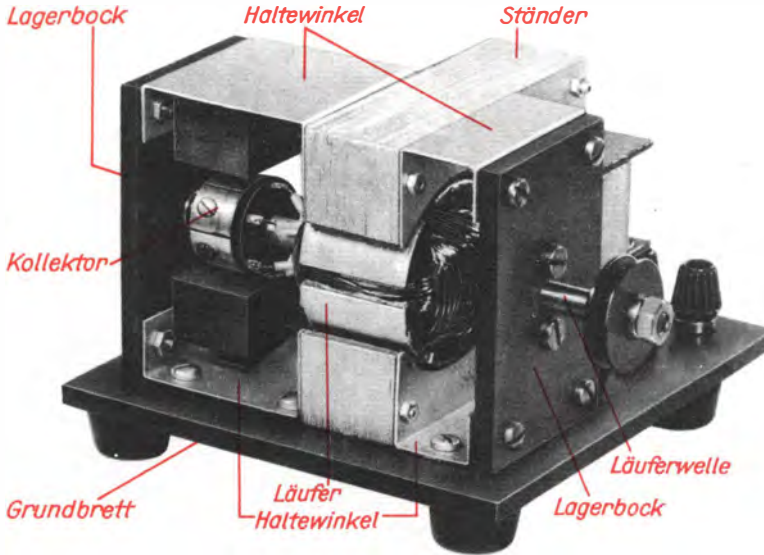


Bild 46. Unsere große elektrische Maschine II

heißt für größere Leistungen als Stromerzeuger und als Motor sowie für Dauerbetrieb, brauchen wir ein entsprechend größeres, kräftigeres Modell. Es ist nicht sehr schwierig zu bauen, da die einzelnen Teile grundsätzlich den Teilen des kleinen Modells entsprechen; sie sind nur größer, kräftiger und kommen in der Bauart ihren Vorbildern in der Technik wesentlich näher, etwa im »geblechten« (geblätternen) Magnetkern oder bei den Kohle-Stromabnehmern. Um möglichst viele verschiedene Versuche machen zu können, unterteilen wir die Ständerspule und bauen außerdem zwei verschiedene Läufer – einen mit nur zwei Wicklungen und zwei Polen und einen mit sechs Wicklungen und dementsprechend sechs Nuten. (Durch die sechs Wicklungen entstehen nicht etwa 6 Pole!) Der Ständer wird nur noch elektromagnetisch erregt; Dauermagneten wären hier nicht stark genug.

Bild 46 zeigt zwei Ansichten der Maschine. Sie besteht – wie das kleine Modell – aus Grundbrett, Ständer, Läufer (Anker), Kollektor, stromleitenden Kollektorbürsten mit Haltern, Lagerböcken mit Haltewinkeln und Apparatklemmen. Ständer und Läufer haben Wicklungen.

Zur Abwechslung beginnen wir diesmal mit dem *Grundbrett* aus Hartpapier (4...6 mm dick). Bild 47 zeigt das Bohrschema für Bohrungen und Gewinde; alle Maße sind in Millimetern angegeben. Die neun einfachen Bohrungen sind für die Apparatklemmen, die auf der Unterseite des Grundbrettes verschraubt werden. Die sechs Gewindelöcher M4 sollen die Metallschrauben zum Befestigen der Haltewinkel aufnehmen, die das Ganze zusammenhalten; wir können sie auch mit Schrauben und Muttern in einfachen Bohrungen befestigen, deren Durchmesser sich dann nach der Schraubenstärke richtet. Die vier Gewindelöcher M3 an den Ecken schließlich dienen zum Anbringen von Gummifüßen.

Aus Hartpapier fertigen wir auch anschließend die beiden *Lagerböcke* a und b an (Bild 48). Der rechte (Bild 48b) trägt zusätzlich die Bürstenhalterung. An den zweimal vier Eckbohrungen werden später die Winkel befestigt, die den Ständer in seiner Lage halten. Die Lagerböcke sollen 6 mm dick sein.

Nun zu den *Kernen am Ständer und Läufer*. Sie müssen aus dünn lackiertem Weicheisenblech zusammengesetzt werden; in massiven Teilen entstehen starke elektrische *Wirbelströme*, die die Lei-

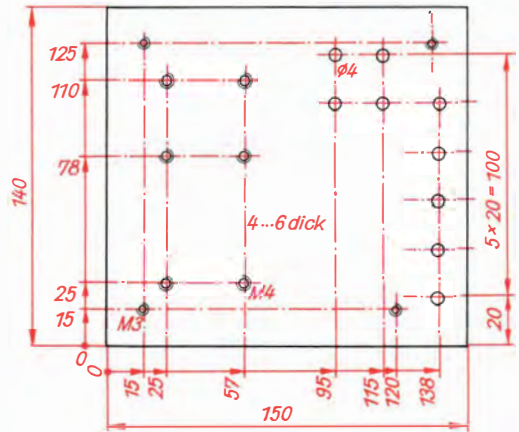


Bild 47. Grundbrett für die Maschine II

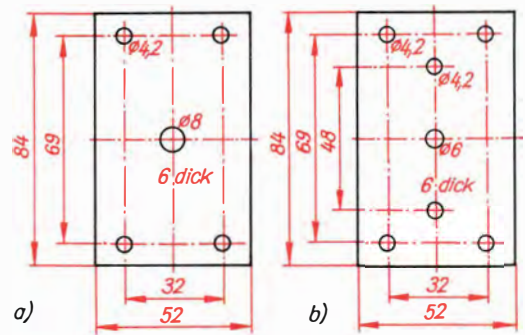


Bild 48. Lagerböcke der Maschine II

stung der Maschine erheblich verringern. Die elektrische Energie wird auf unerwünschten Seitenwegen teilweise verbraucht; da wir die Maschine II für möglichst große Leistung besonders sorgfältig bauen, müssen wir das folgerichtig verhindern. Das geschieht durch die genannte Art der »Blechung«; von einem Blech zum anderen können die unerwünschten Ströme nicht übertreten, und daher ist ihre Stärke wesentlich geringer. Das gilt freilich nur bei Wechselstrom (und seiner Abart Drehstrom), nicht aber für den – in diesem Fall angenehmeren – Gleichstrom. Beim Elektromagneten ist davon schon die Rede gewesen. Diese geblechte Bauart ist für uns sogar recht angenehm: Die einzelnen Bleche sind (nach einer Schablone) verhältnismäßig leicht herzustellen. Man muß bei den größeren

Stückzahlen nur etwas Ausdauer haben. Metallschrauben halten die zusammengepreßten Blechpakete dann fest zusammen.

Diesmal beginnen wir mit dem Ständer

Der Ständer hat eine eckige U-Form. Auf dem Mittelteil (dem Kern) sitzt die *Magnetspule*; die beiden Schenkel (an den Enden für den Läufer rund ausgeschnitten) sind die *Polschuhe*. Bild 49a bis d zeigt die vier Blechteile, die wir aus Weichblech (0,5...1 mm dick) anfertigen: bei 1 mm Stärke vom langen Polschuh (a) 30 Stück (oben und unten je 15), 28 vom kurzen Polschuh (b); 15 kurze (c) und 14 lange (d) Mittelstücke. Alles wird möglichst sauber nach einer Schablone (etwa aus Hartpapier) gefertigt. Es wäre zu umständlich, jedes Blech im ganzen anzufertigen; wir schichten daher abwechselnd ein Blech aus zwei langen Polschuhen mit kurzem Kernstück auf ein Blech aus zwei kurzen Polschuhen mit langem Kernstück (Bild 50a) – ähnlich wie in unserer Norm N₇

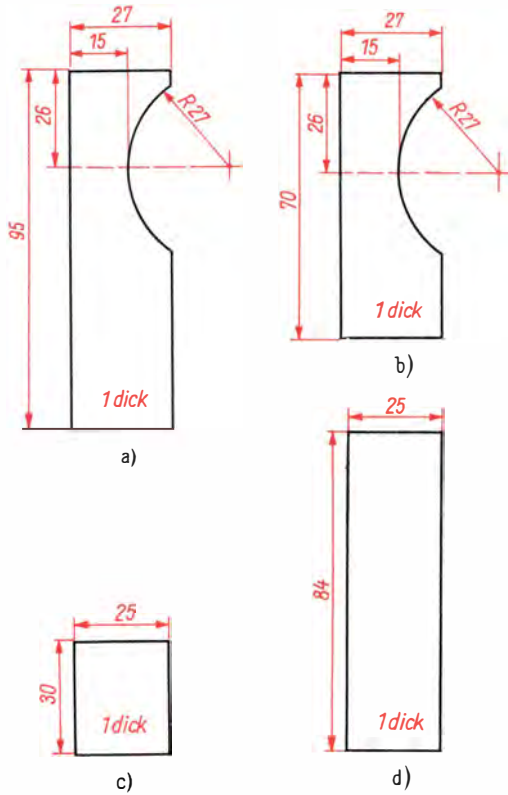


Bild 49. Ständerbleche für die elektrische Maschine II

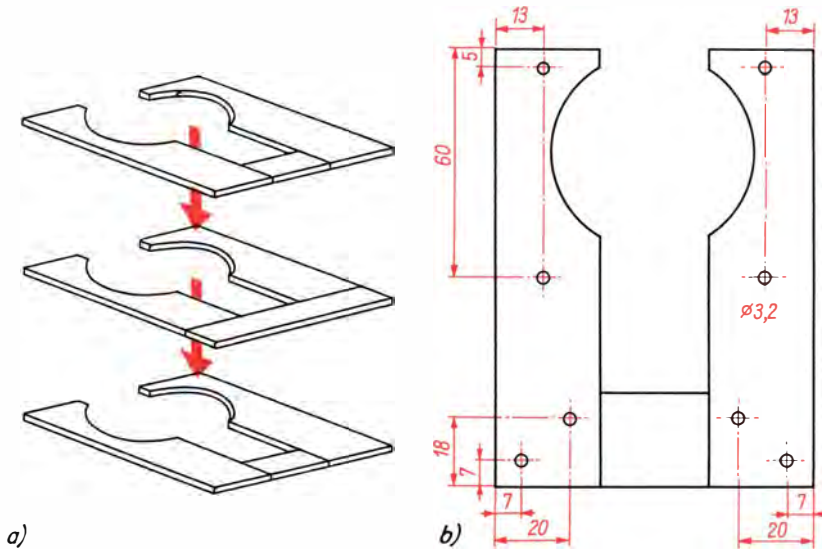


Bild 50. So werden die Ständerbleche geschichtet (a) und gebohrt (b)

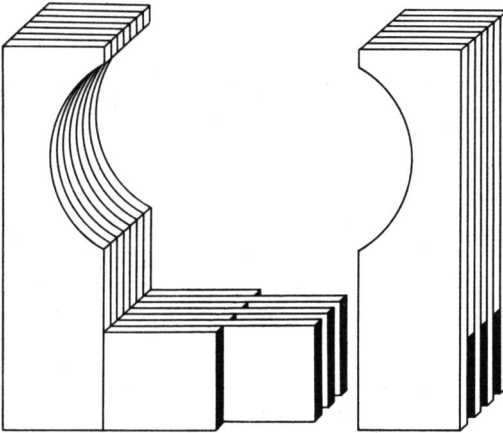


Bild 51. So setzen wir die Ständerbleche zu den Polschuhen zusammen

(Bild 8). Fertig aufeinandergepackt und mit Spannzwinde oder Schraubstock zusammengepreßt, ergeben die Bleche einen Block, der nach Bild 50b gebohrt wird. Dann werden die Bleche mit Schrauben und Muttern M3 fest verschraubt, und der ganze Ständer wird sauber befeilt. Wichtig ist, daß alle Bleche gegeneinander durch einen sehr dünnen Lack (Schellack) oder feines Seidenpapier isoliert sind. Dazu werden sie wieder auseinandergenommen, einzeln entgratet, mit Schellack beiderseits bestrichen und wieder ausgerichtet.

Wir setzen jetzt nach Bild 51 die Winkel zusammen; der linke stellt den einen Polschuh und das Mittelstück des Ständers dar. Er wird mit Spannzwinde oder Schraubstock an den ausgefüllten Teilen (also nicht an dem Ende mit den Hohlräumen, in die später der zweite Polschuh eingreift) kräftig zusammengepreßt und verschraubt. Der zweite Polschuh wird in derselben Weise gebaut. Etwa herausgetretener Schellack wird überall entfernt.

Der erste Läufer entsteht nach historischem Vorbild

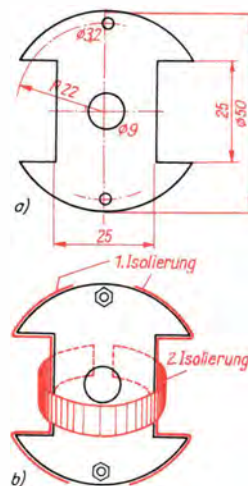
Wir legen unsere fertigen Teile einstweilen beiseite und nehmen uns das Material für den ersten der beiden Läufer, den *Doppel-T-Läufer*, vor – so benannt, weil man mit einiger Phantasie im Querschnitt zwei mit den senkrechten Balken aneinander-

gesetzte T erkennen kann. Dieser Läufer ist von *Werner von Siemens* (1816–1892) erfunden worden und wird heute kaum noch benutzt; für das Verständnis elektrischer Vorgänge ist er jedoch wichtig, weil er einfach aufgebaut ist.

Der *Läuferkern* wird aus 80...100 Einzelblechen gebaut. Die hohe Zahl braucht uns nicht abzuschrecken, denn sie sind aus Konservendosenblech wesentlich leichter als der Ständerkern herzustellen. Der Ständerkern ist etwa 30 mm breit; der Läuferkern soll ebenso breit sein. Er hat den im Bild 52a angegebenen Querschnitt. In den rechteckig ausgeschnittenen Stellen findet später eine Wicklung Platz; die bleibenden Kreissegmente bilden die Polschuhe (und Pole). Das Bild zeigt auch die Lage der Bohrungen: in der Mitte für die Welle, an den beiden Polen für die Metallschrauben, die die Bleche später zusammenhalten sollen.

Dazu sind noch zwei Hartpapierplatten mit denselben Maßen (1,5...2 mm dick) nötig; sie schließen das Blechpaket an beiden Seiten ab und müssen bei der Breite des Kernes mit berücksichtigt werden. Wir fertigen sie als erstes (mit den vorgeschriebenen Bohrungen) an; sie dienen zunächst als Schablone beim Anreißen und Ausschneiden der Bleche. Später tragen sie (als seitlicher Abschluß) die versenkten Schraubenköpfe und die Muttern; sie halten die dünnen Bleche dann glatt und fest zusammen.

Bild 52. Bohrschema (a) und Isolierungen (b) des Läuferkernes



Wir bohren am besten je etwa zehn Bleche mit der Schablone vor, spannen sie mit einer Schraubzwinge zusammen und feilen sie nach. Dann werden die Bleche einzeln mit Schellack bestrichen. Sind alle Bleche fertig, packen wir sie zwischen die beiden Hartpapierschablonen, richten sie gut aus, pressen sie (wieder mit Schraubzwinge) fest zusammen und verschrauben schließlich das ganze Kernpaket mit zwei Schrauben M3 so fest wie möglich (später die Schrauben noch einmal nachziehen). Die Schraubenköpfe müssen nicht unbedingt versenkt sein; das sieht nur etwas besser aus. Als letztes prüfen wir die Bohrung für die Welle auf Zentrierung und bohren sie auf 9 mm auf.

Es folgt die *Läuferwelle*. Sie wird von einem Eisenstab von 8 mm Durchmesser auf 150 mm abgeseigt, an einem Ende auf 30 mm Länge mit Gewinde M6 versehen und am anderen Ende auf 10 mm Länge auf einen Durchmesser von 6 mm gedreht oder (wie bei der Maschine I) gefeilt. Das Gewinde dient zur Aufnahme einer *Antriebscheibe*, der Absatz am anderen Ende der Welle zur Sicherung gegen Verschieben, vielleicht noch durch eine kleine Unterlegscheibe unterstützt. Genau die gleiche Welle brauchen wir auch zum Trommelläufer. Es empfiehlt sich daher, gleich zwei Stück anzufertigen, da wir einmal dabei sind.

Wir wollen den Läuferkern sofort auf die Welle bringen. Auf dieser wickeln wir uns deshalb eine etwa 40 mm lange Papierrolle bis zum Außendurchmesser 9,3 mm, tränken sie mit Schellack und drücken sie, ehe der Schellack ganz trocken ist, in die Kernbohrung. Wenn nötig, geben wir noch etwas Schellack hinzu. Danach wird die Welle mit einem Gummi- oder Holzhammer fest in den Läuferkern geschlagen, so daß dieser genau in der Mitte sitzt, 60 mm von jedem Wellenende entfernt. Er muß wirklich fest sitzen, denn die mechanischen Kräfte sollen an dieser Stelle übertragen werden. Sehr wichtig ist die *Prüfung*, ob der Läufer zwischen den Lagerböcken und den Ständer-Polschuhen richtig läuft, nicht schlägt und auch immer den gleichen Abstand von den Polschuhen hat. (Dieser Abstand soll möglichst klein sein, um den Weg der magnetischen Kräfte nicht zu erschweren.) Leider können wir diese Prüfung nur in der bereits aus Grundbrett, Ständer, Lagerböcken und Haltewinkeln zusammengebauten Maschine machen. Den Ständer können wir wiederum erst zusammensetzen, wenn wir seine Spule haben. Deshalb müssen wir den un-

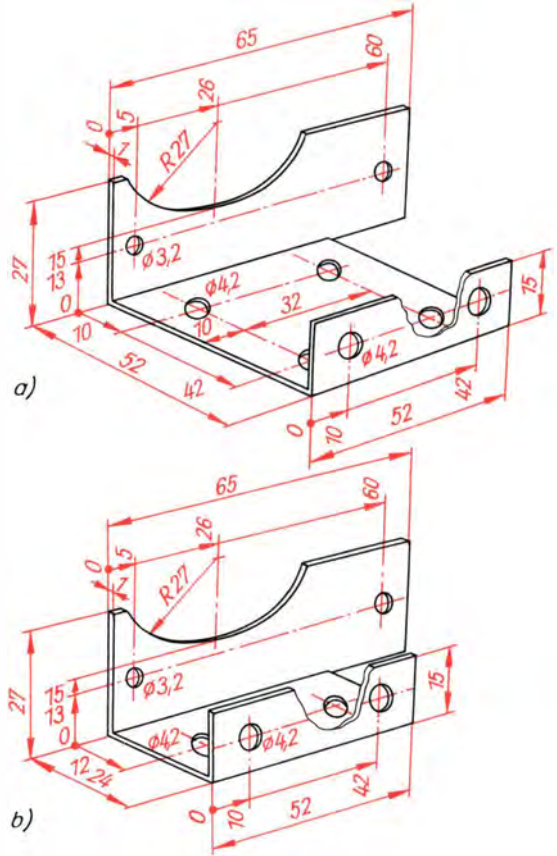


Bild 53. Ansicht der beiden Lagerbockwinkel

gewickelten Läufer einstweilen liegenlassen und mitten im Bau der elektrischen Teile mit der *Montage* beginnen und die Rundlaufprüfung nachholen!

Die letzten mechanischen Teile sind vier *Lagerbockwinkel*, zwei größere für die Kollektorseite und zwei kleinere für die andere Seite; einer davon immer für oben und einer für unten. Sie werden aus Eisenblech (1 mm dick) nach Bild 53 hergestellt und mit einem Schutzanstrich aus Aluminiumbronze versehen. Wir sehen: Die Winkelpaare unterscheiden sich in der Größe nur im waagerechten Mittelteil. Aber wir müssen bei der paarweisen Herstellung eines Paares beachten: Die beiden Winkel eines Paares sind jeweils symmetrisch zueinander gebaut, ähnlich wie zwei zu einem Paar gehörende Schuhe.

Sie können nicht untereinander ausgetauscht werden. Bei unseren Winkeln bedeutet das folgendes:

Der große Winkel (Bild 53a) sitzt (später) oben, er verbindet den oberen Polschuh mit dem Lagerbock am Kollektor. Halten wir das Blatt mit Bild 53 gegen das Licht und schauen auf die Rückseite, so sehen wir die Zeichnung symmetrisch hindurchschimmern; in *dieser* Form wird der *untere* Winkel gebogen. Halten wir einen Spiegel vor das Bild, so sehen wir den unteren Winkel ebenfalls als Spiegelbild richtig.

Der kleine Winkel (Bild 53b) ist die *untere* Verbindung zwischen dem (unteren) Polschuh mit dem Lagerbock am Antriebsrad. Das durchscheinende oder das Spiegelbild gibt die Zeichnung des zweiten (symmetrischen) kleinen Winkels wieder, der den oberen Polschuh mit dem Lagerbock am Antriebsrad verbindet. Warum ist nun im Bild 53 ein oberer und ein unterer Winkel abgebildet – ist das nicht besonders umständlich? Scheinbar ja; aber der Einfachheit und Verständlichkeit halber sollen die überall gültigen Maße nur einmal gebracht werden. Die großen Winkel liegen aber (teilweise) symmetrisch zu den kleinen – gewissermaßen mit dem Ständer als Symmetriefläche. Damit sind alle mechanischen Teile gefertigt, und wir kommen zu den *elektrischen Einrichtungen*.

Ständerwicklung, Läuferwicklung, Kollektor mit den Kohlebürsten und ihrer Halterung bilden den elektrischen Teil; hinzu kommen die Verbindungsleitungen und die neun Apparateklemmen. Die Anordnung der mechanischen und elektrischen Teile ist im Bild 46 zu sehen.

Zunächst die Ständerwicklung (Feldspule zur Felderregung)! Der Rechkant-Spulenkörper wird nach unserer Werkstattnorm N_1 aus schellackgetränkter Pappe nach folgenden Maßen in mm angefertigt: $a_1 = 60$, $a_2 = 33$, $a_3 = 30$, $b_1 = 55$, $b_2 = 28$, $b_3 = 25$, $c = 30$, $d = 2$. Die Pappe wird erst geschnitten, dann zum Spulenkörper verklebt und schließlich mit Schellack getränkt. Der Körper wird auf der Wickelvorrichtung mit 1250 Windungen Kupferlackdraht CuL 0,4 bewickelt. Um die Maschine recht vielseitig verwenden zu können, wird die Wicklung nach 150, 250 und 750 Windungen angezapft (Bild 54). Dabei ist der Draht ohne Unterbrechung in einer Schlaufe durch ein Loch heraus und wieder zurückzuführen. Die Schlaufe kleben wir mit Klebeband außen an, damit sie beim weiteren Wickeln nicht reißt; das gilt auch für den

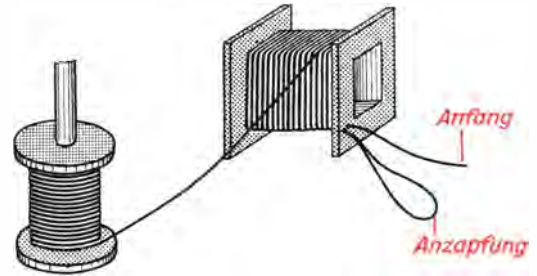


Bild 54. So wird die Wicklung angezapft

Drahtanfang. Die fertige Wicklung wird mit Zeichenkarton umwickelt, verklebt und mehrmals mit Schellack gestrichen. Wir sind nun soweit, den ersten Teil der *Montage* der Maschine II und die *Rundlaufprüfung* des Doppel-T-Läufers durchzuführen.

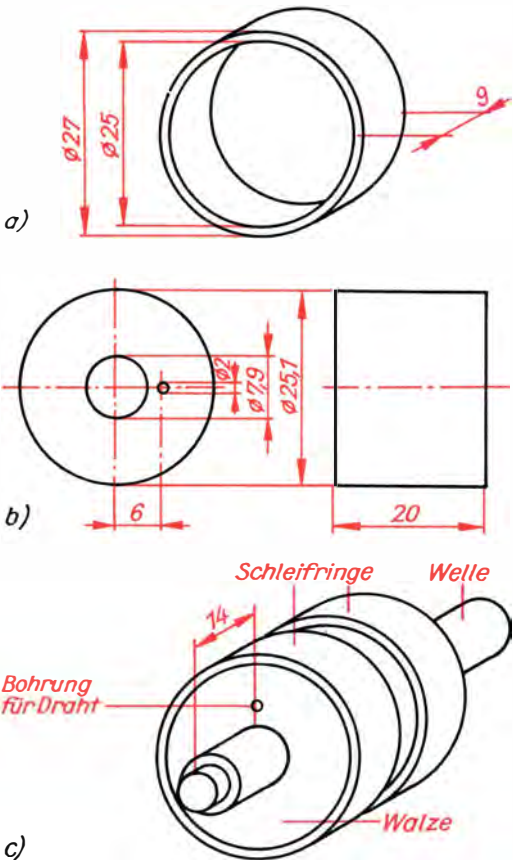
Wir beginnen mit der Fertigstellung des *Ständers* und setzen die soeben angefertigte Spule auf das Mittelstück des Ständerkerns, das bereits mit einem Polschuh verbunden ist. Dann setzen wir den zweiten Polschuh an (die Bleche schön ineinanderschieben!) und verschrauben ihn mit dem Mittelstück, dem eigentlichen Kern.

Die vier Haltewinkel (Lagerbockwinkel) werden an den Polschuhen befestigt; die beiden großen symmetrisch zueinander an der Kollektorseite; das Bohrschema (Bild 47) hilft dabei. Die rund ausgeschlittenen Schenkel bilden (viermal) den Abschluß der Polschuhe; zum Befestigen der Winkel müssen die vier Polschuhschrauben zunächst gelöst und dann – mit den Winkeln – wieder eingesetzt werden. Jetzt schrauben wir die zwei unteren Winkel (mit sechs Schrauben) – und damit zugleich den fertigen Ständer – am Grundbrett fest. Wir können vorher noch die vier Gummifüße und die neun Apparateklemmen befestigen und dann die Drahtenden der Feldspule (Ständerspule) auf der Unterseite des Grundbrettes mit angeklebten Lötösen an den vorderen fünf Klemmen anschließen. Die kurzen Zwischenstücke der Drähte müssen in Isolierschläuchen stecken, damit die Drähte nicht mehr abbrechen können. Diese fünf Klemmen sollen möglichst eine andere Farbe haben als die vier (im Quadrat angeordneten) zum Kollektor gehörenden. Die Windungszahlen werden auf dem Grundbrett (Zeichenkartonstreifen) gekennzeichnet. Alle außen-

liegenden Metallteile erhalten einen Schutzanstrich mit Aluminiumbronze.

Der *Lagerbock* der Kollektorseite wird an den Haltewinkeln angeschraubt; und nun kommen wir endlich zur *Laufprobe* unseres Läufers! Wir stecken das verjüngte Ende der Welle (6 mm Durchmesser) in das Lagerloch des Bockes, streifen den anderen Lagerbock über die Welle und befestigen ihn ebenfalls an den Haltewinkeln. Der Läufer – immer noch ohne Wicklung, also nur Läuferkern mit Welle – muß sich nun leicht drehen lassen. Der Kern soll dicht an den Polschuhen des Ständers vorbeilaufen, ohne irgendwo anzustoßen. Etwaige Mängel müssen jetzt beseitigt werden, beispielsweise durch

Bild 55. Kollektor: a) Schleifringe aus Messingrohr, b) Walze als Schleifringträger, c) fertig montierter Kollektor



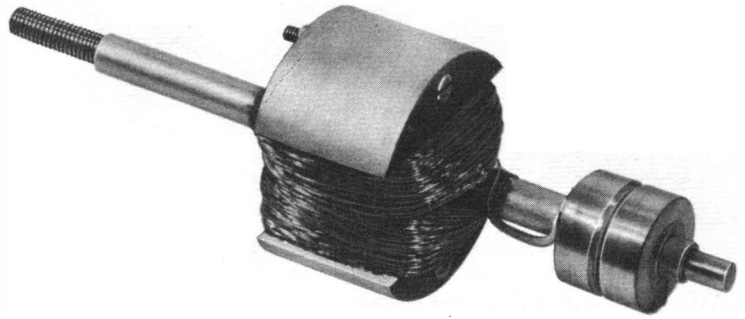
Aufbohren der Lagerlöcher oder Abfeilen an der Oberfläche des Läuferkerns.

Ist alles in Ordnung, so nehmen wir den Läufer wieder heraus, um die *Spulen* um den Kern zu wickeln. Das muß wegen der durchlaufenden Welle, die endgültig festsetzt, mit der Hand geschehen. Wir wickeln stets in derselben Richtung, als wäre die Welle gar nicht vorhanden. Wir brauchen keinen neuen Spulenkörper, weil dieser schon vom Läufer-Blechpaket gebildet wird. Aber vor dem Wickeln muß dieses Blechpaket, der Kern, überall dort, wo es mit dem Draht in Berührung kommt, sorgfältig isoliert werden; zunächst in den Aussparungen, dann um den ganzen Mittelteil herum (Bild 52b) und auf beiden Seiten noch ein Stück der Welle. Wir verfahren entsprechend wie bei der elektrischen Maschine I. Dann erst wird so viel Kupferdraht CuL 0,4 recht dicht und glatt auf den Kern gewickelt, wie daraufpaßt; der Außenkreis des Querschnittes darf dabei nicht überschritten werden. Insgesamt sind es etwa 2×250 Windungen. Die Wicklung wird nun auf Stromdurchgang und Masseschluß geprüft. Ist alles in Ordnung und brauchen wir nicht noch einmal zu wickeln, so tränken wir sie mit Alleskleber. Wir können zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit (Fliehkraft!) noch ein Band fest über die Wicklung legen und ebenfalls tränken. Zum Schluß werden die noch sichtbaren Eisenteile mit Aluminiumbronze gestrichen.

Anfang und Ende jeder Wicklung sind besonders empfindlich gegen Bruch; wir sichern sie daher in allen Fällen durch kleine Isolierschläuche, die mit einem Ende noch in der Wicklung festsitzen sollen.

Unser Doppel-T-Läufer ist nur für Wechselstrom bestimmt; daher genügen für ihn als Kollektor zwei einfache *Schleifringe*. Zwei Ringe aus Messingrohr (9 mm breit, Innendurchmesser 25 mm, etwa 1 mm dicke Wandung; Bild 55a), werden auf eine 20 mm lange Holz- oder Hartpapierwalze mit 25,1 bis 25,2 mm Durchmesser (etwa von einem Stiel) heiß aufgezogen (Bild 55b). Die erkaltenden Ringe ziehen sich zusammen und sitzen so sehr fest. Die Walze erhält in der Mitte eine Bohrung für die Welle (etwas kleiner als deren Durchmesser) sowie eine kleine Bohrung daneben für den Draht zum äußeren Schleifring. Dann wird die Walze mit den Ringen fest auf die Welle geschlagen, so daß sie 14 mm vom verjüngten Wellenende und 4 mm vom Lagerbock entfernt sitzt (Bild 55c). Wir verlöten

Bild 56. Doppel-T-Läufer mit Schleifringen



ein Drahtende aus der Läuferwicklung mit der Seitenkante des inneren Schleifringes; den anderen Draht führen wir durch die kleine Bohrung in der Ringwalze und löten ihn an der Kante des äußeren Ringes an. Beide Ringe dürfen einander nicht berühren. Bild 56 zeigt ihre Lage am Doppel-T-Läufer.

Zu den Schleifringen gehören zwei *Kohlebürsten*. Wir nehmen dazu keine richtigen Bürsten, sondern Kohlestäbe aus einer Taschenlampenbatterie (23 mm lang und mit einem Durchmesser von 5,8 mm). Wie kann man sie nun einbauen, so daß sie leicht beweglich sind und doch mit einem bestimmten Druck auf den Ringen liegen? Es gibt viele gute Lösungen. Wir lassen hier die Stäbe in je einer Bohrung (6 mm Durchmesser) zweier Hartpapierklötze gleiten und drücken sie mit federndem Messingblech an die Schleifringe. Die *Bürstenhalter* (Klötze) werden mit je einer Metallschraube M4 am Lagerbock angeschraubt, einer über und einer unter dem Kollektor. Sie werden mit einer entsprechenden waagerechten Bohrung mit Gewinde versehen, haben eine Fläche von 24 mm × 28 mm und sind 15 mm hoch (Bild 57). Da beim Kollektor mit Schleifringen die Kohlestäbe – den nebeneinanderliegenden Ringen entsprechend – oben und unten um 8 mm versetzt sind, sind es auch die Bohrungen. Da jedoch beim (noch zu bauenden) Kommutator beide Kohlestäbe übereinander liegen, bekommt der obere Klotz vorsorglich eine zweite Bohrung, genau über derjenigen des unteren Klotzes.

Im Bild 57 ist C die untere Bohrung für beide Läufer; B ist die obere Bohrung für den schon fertigen Kollektor zum Doppel-T-Läufer, A die Bohrung für den späteren Kommutator. Entsprechend ist die obere Messing-Andruckplatte doppelt so breit wie die untere. Die Messingfederbleche

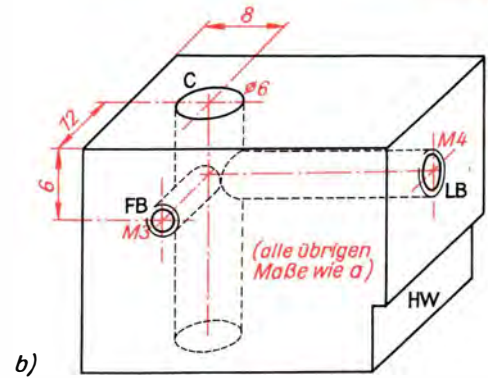
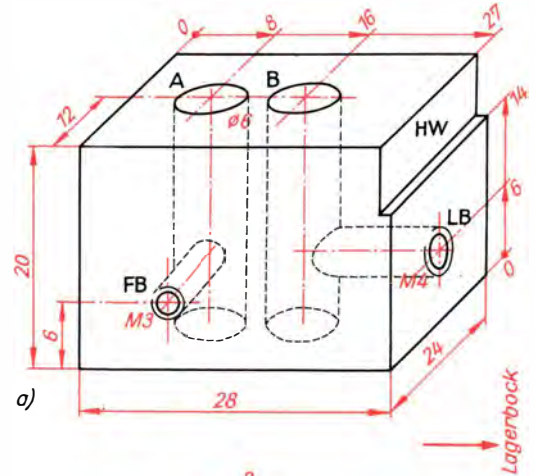


Bild 57. Bürstenhalter der elektrischen Maschine II

fertigen wir nach unserer Werkstattnorm N₆ (Bild 8) mit folgenden Maßen in mm an: a = 16, b = 18, c = 20 (für das obere Blech), c = 10 (für das untere Blech), d = 0,3...0,5, e₁ = 3,2, f₁ = 6, g₁ = 5,

$g_2 = h_1 = h_2 = 0$, Winkel etwa 85° . Jedes Blech wird mit einer Schraube M3 seitlich an einem Klotz befestigt. Wie stark der Druck auf die Stäbe sein muß, kann nur einzeln ausprobiert werden; jeder Stab muß den Strom sicher leiten, ohne die Welle wesentlich abzubremesen. Nach längerer Betriebszeit müssen die Stäbe erneuert werden. Die Stellung der Bürsten ist auf den Bildern 66 und 67 zu sehen.

Um die Welle gegen seitliche Verschiebung zu sichern, müssen wir noch einen festschraubbaren *Anschlagring* aus Hartpapier oder Metall anfertigen. Er hat die Maße: Durchmesser innen 8 mm, außen 15 mm, Breite 6 mm und erhält ein radial geschnittenes Gewinde M3 für eine Feststellschraube. Ein *Antriebsrad* (Scheibe mit Nut, beispielsweise 30 mm Durchmesser) für das Gewindeende der Läuferwelle mit Mutter und Gegenmutter ist das letzte Teil.

Der zweite Läufer entsteht nach technischem Vorbild

Um alles beisammen zu haben, was zur Vielweckmaschine II gehört, wollen wir anschließend den *sechsnutigen Trommelläufer (Trommelanker) mit Kommutator* (Bild 58) bauen. Unser Doppel-T-Läufer kann mit Schleifringen nur Wechselstrom abgeben; als Läufer eines Gleichstromerzeugers müßte er an Stelle der Schleifringe einen Kommutator haben (s. Maschine I, S. 45). Alle übrigen Teile der Maschine bleiben unverändert. Der Bau dieses Trommelläufers ist freilich schwieriger – aber auch reizvoller.

Wir beginnen mit dem *Trommelläufer-Eisenkern!* Grundsätzlich wird er wie der andere Läufer hergestellt: das Blechpaket, begrenzt von den beiden

Hartpapierscheiben (1,5...2 mm dick), die zugleich als Schablonen dienen, das Pressen und Verschrauben und so weiter. Nur die Aussparungen sind anders; sie sind zahlreicher und etwas verwickelter und werden den Nuten der Maschinen der Praxis ähnlicher. An die Stelle der bisherigen zwei Wicklungen (die eigentlich nur eine darstellen) treten nunmehr sechs. Sie sind sinnreich miteinander verflochten, um einen ruhigen Lauf und ein Höchstmaß an abgegebener Energie zu gewährleisten.

Falls das Bearbeiten der 80...100 Bleche zu mühsam erscheint, können wir in diesem Falle gestrost dickeres Blech nehmen – aber höchstens 1 mm stark!

Wir rechnen wieder mit einer Läuferlänge von 30...32 mm (einschließlich der Hartpapier-Endscheiben). Daraus und aus der Blechdicke ergibt sich die Anzahl der Bleche; bei 1 mm Blechdicke also 28 oder 29 Stück. Bild 59a zeigt die Form eines fertigen Läuferbleches. Wir gehen so vor:

1. Bleche grob in Quadrate schneiden (55 mm × 55 mm).
2. Die Quadrate zusammenspannen (Spannzwinde, Schraubstock).
3. In der Mitte ein Loch bohren, etwa 7 mm Durchmesser.
4. Bleche wieder auseinandernehmen.
5. Eine Schablone nach Bild 60 aus Hartpapier herstellen; Bild 59a gibt die Maße an.
6. Auf einem 7-mm-Bolzen alle Bleche anreißen, rundschnneiden, entgraten, die drei Löcher (3,2 mm Durchmesser) bohren.
7. Alle Bleche mit Schellack streichen, zwischen die beiden Hartpapier-Abschlußscheiben packen, ausrichten, mit drei Schrauben M3 verschrauben, nochmals pressen, Schrauben nachziehen.

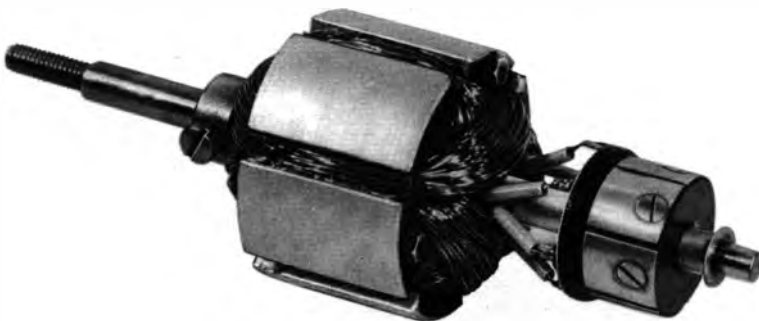


Bild 58. Trommelläufer mit Kommutator

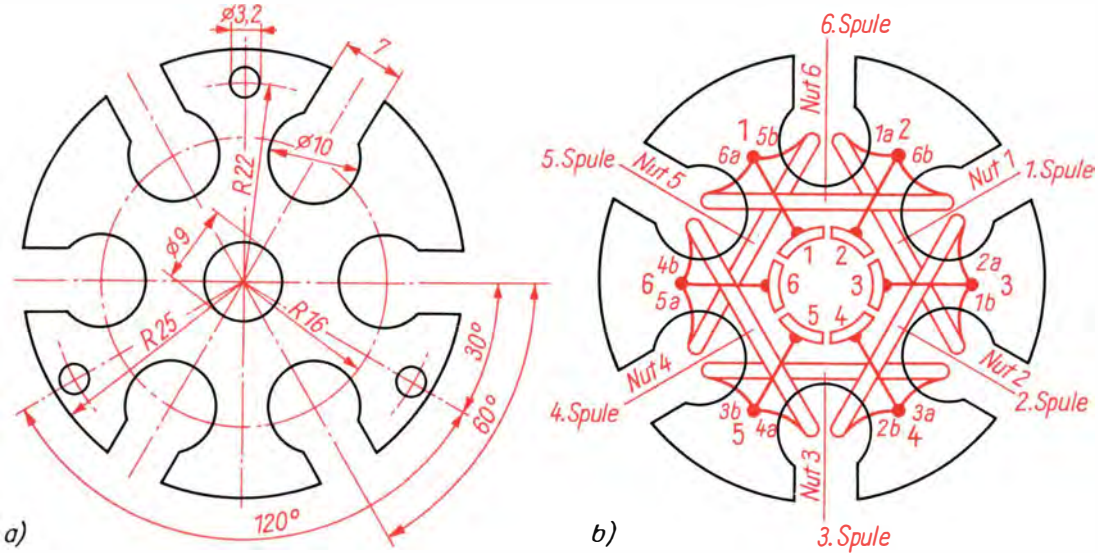
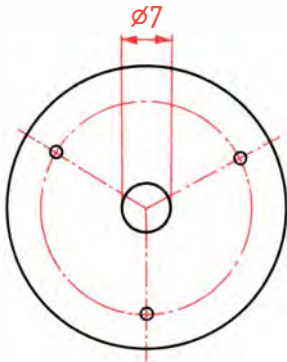


Bild 59. Läuferbleche für den Trommelläufer (a) und die Trommelläuferwicklung (b)

8. Auf einer der Hartpapierscheiben die Mittelpunkte für sechs Bohrungen anreißen, die Löcher mit Bohrer 10 mm bohren. Wer keine elektrische Bohrmaschine hat, bohrt besser »schubweise« – 1 bis 10 Bleche zugleich.
9. Wickelöffnungen (Nutenschlitze) mit Eisensäge einsägen, entgraten.
10. Wellenbohrung (Mitte) auf 9 mm aufbohren.
11. Welle herstellen – genau wie die zum Doppel-T-Läufer. Vorsorgliche Leser haben damals

Bild 60. Schablone für die Läuferbleche



gleich zwei Wellen angefertigt und sparen nun die Zeit ein.

12. Wie bei dem Doppel-T-Läufer: Papierrolle auf der Welle bis 9,3 mm Durchmesser (etwa 40 mm lang) wickeln, mit Schellack tränken, vor dem völligen Trocknen in die Wellenbohrung des Läuferkerns drücken.
13. Die Welle mit Gummi- oder Holzhammer in die Wellenbohrung schlagen, so daß der Läufer genau in der Mitte seiner Welle sitzt.
14. Der Läufer wird auf leichten und schlagfreien Lauf geprüft (siehe Doppel-T-Läufer); er wird dazu in die Maschine eingebaut. Den Läufer wieder ausbauen; gegebenenfalls leichtes Nacharbeiten.

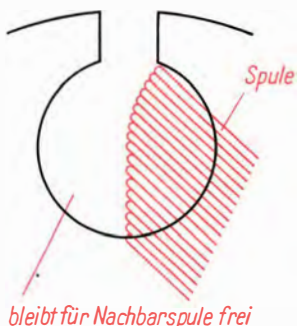
Damit haben wir den mechanischen Teil des Trommelläufers; es folgt der schwierigere elektrische Teil. Wer noch nicht mit der »Ankerwickel« zu tun gehabt hat, wird hier allerlei Neues lernen. Bild 59b zeigt, wie Läufer und Kommutator zueinander liegen; wie der Läuferkern mit sechs Spulen bewickelt wird, welche Spulen oben und welche darunter liegen; wie die Spulen miteinander verbunden werden und wie diese (sechs) Verbindungen an die sechs Lamellen des Kommutators geschaltet werden. Die Spulenenden sind jeweils mit a und b gekennzeichnet, die sechs Nutöffnungen mit Nut 1 bis Nut 6. Wir sehen, daß zwei Dreiecke von je drei Spulen gebildet werden. Das eine Dreieck liegt über dem anderen.

Alle Metallflächen in der Nähe der Drähte müssen isoliert werden. Wir legen mehrere Lagen von Isolierband nebeneinander, beginnen aber zunächst mit einer Lage an einer Seite. Das geht ringsherum um den Kern, und zwar in einer Nut beginnend, der Reihe nach alle Nuten durchlaufend, bis wir am Ausgangspunkt wieder angelangt sind. Dabei wird das Band innerhalb der Nutbohrungen mit einem runden Bleistift oder dergleichen sorgfältig an die Wand gedrückt. Bei 15-mm-Bandbreite müssen wir noch ein zweites Band in derselben Weise legen; die Welle wird an jeder Seite des Kernes 10 mm lang isoliert. Die Seitenteile aus Hartpapier isolieren selbst. Die Spulen werden zu je etwa 140 Windungen CuL 0,4 mit der Hand gewickelt. Dabei darf eine Spule immer nur eine Hälfte des Querschnittes der beiden zugehörigen Nuten (Löcher) beanspruchen.

Wir wickeln, wie im Bild 61 angedeutet. Nach jedem Wickeln muß die betreffende Spule auf Stromdurchgang und Masseschluß geprüft werden. Man vermeidet dadurch unter Umständen viel unnötige Arbeit. Das Wickeln beginnt bei Spule 1; sie liegt in den Nuten 6 und 2. Es folgt Spule 3 zwischen den Nuten 2 und 4, danach Spule 5 in den Nuten 4 und 6. Dann ist das erste Dreieck fertig, und wir legen über die an den Stirnseiten heraustretenden Spulenteile dieses unteren Dreiecks Isolierband und wickeln das zweite Dreieck aus Spule 2 zwischen Nut 1 und Nut 3, Spule 4 zwischen Nut 3 und Nut 5 und Spule 6 zwischen Nut 5 und Nut 1. Stets auf Stromdurchgang und Masseschluß prüfen!

Alle Drahtenden der Spulen werden etwa 50 mm

Bild 61. So belegt eine der beiden Spulen die Hälfte der Nut



lang in Isolierschläuchen an der Kommutatorseite herausgeführt; jedes Ende einer Spule wird mit dem Anfang der nächsten verdrillt: 1b (Ende) mit 2a (Anfang), 2b mit 3a, 3b mit 4a und so weiter. Die sechs verdrillten Doppel-Drahtenden werden gekennzeichnet, etwa mit den im Bild angegebenen Zahlen auf Leukoplaststreifen. Sie werden später mit den Lamellen des Kommutators verlötet. Wir bestreichen die fertige Wicklung mit Alleskleber und schneiden mit einer Rasierklinge alles Isolierband weg, das außerhalb der Nuten noch auf den gewölbten Außenflächen der Pole klebt. Vorsicht – nicht in die Nut schneiden! Zum Schluß werden diese Flächen mit Aluminiumbronze gestrichen.

Der Kommutator soll den erzeugten Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln. Er gehört zu den Kollektoren, die den entstehenden Strom sammeln und entweder als Schleifringe unverändert weiterleiten oder als Kommutatoren in Gleichstrom umändern. In je zwei gegenüberliegenden Läuferpulven (Doppelpulven) entstehen durch Induktion im Ständerfeld drei einfache Wechselspannungen, die miteinander verkettet sind. Bei jedem Umlauf des Läufers werden die drei Spannungen nacheinander je einmal erzeugt, denn die Spulen sind so angelegt, daß sie paarweise nacheinander das Ständermagnetfeld durchheilen. Der Kommutator schaltet dann immer im richtigen Augenblick auf die nächste Spule um.

Das Zusammenspiel von Kommutator und Läuferpulven

Bei einer einzigen (Doppel-)Spule ist es sehr einfach. Bei 0° , dem Beginn der Drehung, ist die Spannung gleich Null. Nach einer 90° -Drehung hat die Spannung ihren Höchstwert, bei 180° ihren zweiten Nullwert, bei 270° ihren Tiefstwert (den größten Wert im negativen Bereich) und bei 360° , dem Ausgangspunkt der nächsten Drehung, ihren dritten Nullwert, der zugleich der erste der nächsten Drehung ist (Bild 62a).

In diesem einfachen Fall schaltet der Kommutator stets nach 180° Drehung um, er kehrt die Stromrichtung um und schaltet dadurch den negativen Teil der Wechselspannungskurve in den positiven Kurvenbereich. Die Stromrichtung bleibt dadurch immer gleich; aber wir haben eine (durch die Nullpunkte) regelmäßig unterbrochene und dazu noch

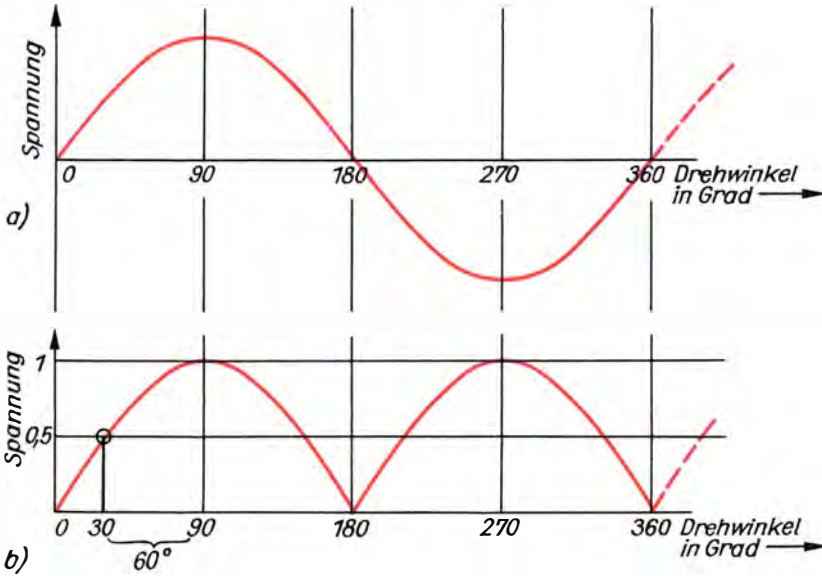
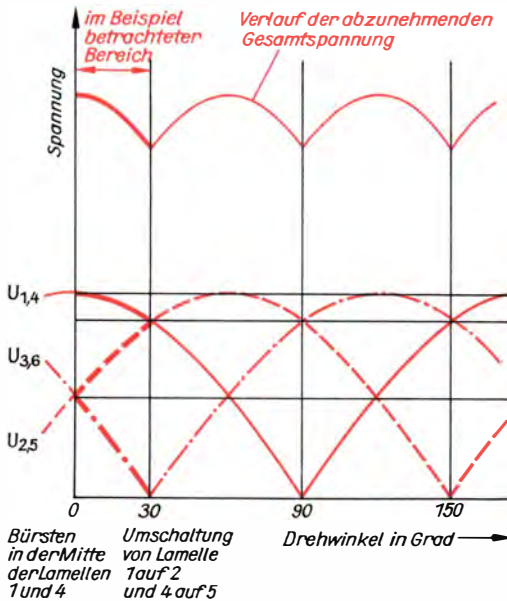


Bild 62. Gleichrichtung der vom Doppel-T-Läufer erzeugten Wechselspannung (a) durch einen Zwei-Lamellen-Kommutator (b)

Bild 63. Spannung am Kommutator der Maschine II mit Trommelläufer



nach einer ursprünglichen Sinuskurve verlaufende Gleichspannung, die ihren Namen nur mit Einschränkung verdient. Ihre Richtung (Polarität) ist zwar wirklich immer gleich, aber sie ist keineswegs schön glatt (Bild 62b). Eine solche Spannung erzeugt unsere kleine Maschine mit dem Zwei-Lamellen-Kommutator.

Um eine glattere (gleichmäßigere) und zugleich höhere Spannung zu bekommen, bauten wir drei Doppelspulen in den Trommelläufer ein und verbanden sie alle untereinander in sinnvoller Art. Wir nehmen als Beispiel an, daß die Bürsten genau in der Mitte der Lamellen 1 und 4 stehen. Die Drehrichtung des Läufers sei dem Uhrzeigersinn entgegengesetzt. In den Spulen 1 und 4 wird in diesem Moment der Höchstwert der Spannung $U_{1,4}$ erzeugt; die in den Nuten liegenden Wicklungen dieser beiden Spulen bewegen sich senkrecht durch die Feldlinien des Ständerfeldes. Die Spulen 6 und 3 hatten den Höchstwert der Spannung ($U_{6,3}$) 60° vor dem betrachteten Augenblick. Sie müssen demnach (vgl. Bild 62b) jetzt den halben Wert der Höchstspannung liefern, während die restlichen Spulen 2 und 5 den Höchstwert der Spannung $U_{2,5}$ erst nach einer weiteren Drehung um 60° erreichen. In dem von uns betrachteten Zeitpunkt geben sie also auch den halben Wert der Höchstspannung.

Lassen wir den Läufer um 30° entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn weiterwandern, dann sinkt $U_{1,4}$

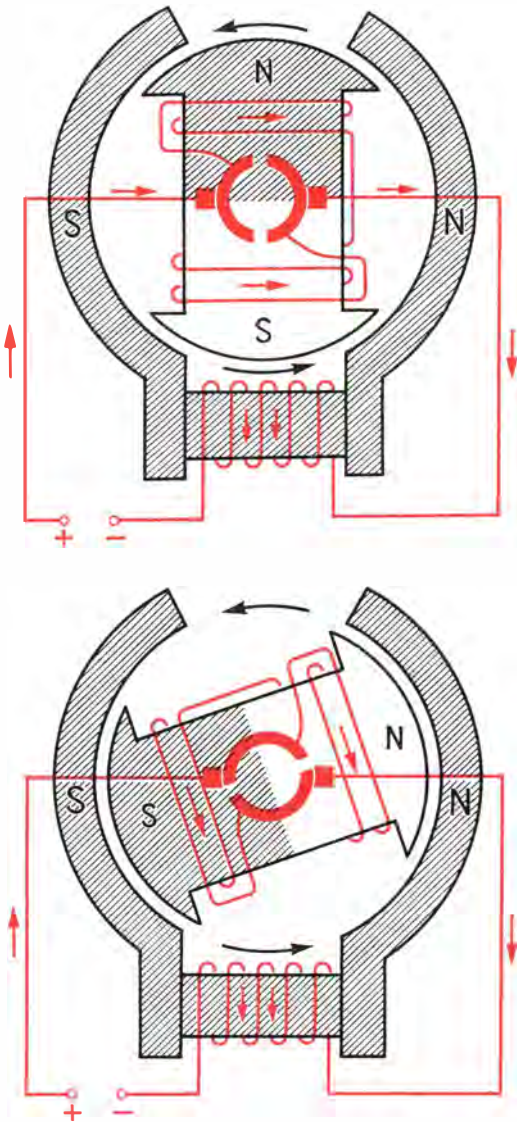


Bild 64. Wirkungsweise des Gleichstrom-Hauptschlußmotors

auf einen Wert zwischen $\frac{1}{2}$ und 1 der Höchstspannung; auf den gleichen Wert steigt $U_{2,5}$, während $U_{3,6}$ auf Null absinkt (Bild 63). In diesem Augenblick erfolgt die Umschaltung von Lamelle 1 auf 2 und von Lamelle 4 auf 5. Da alle sechs Spulen miteinander verbunden sind, ergibt sich die Ge-

samtspannung, die wir an unseren Bürsten abnehmen, durch die Addition aller Teilspannungen.

Maschinen mit noch mehr Nuten geben noch bessere Werte; für unsere Zwecke reicht jedoch unsere elektrische Maschine II völlig aus – nicht nur als Wechselstrom- und Gleichstromerzeuger und als Motor, sondern auch als Hilfe zum tieferen Verständnis der physikalischen Grundlagen der Umwandlung einer Energieform in eine andere.

Die Wirkung unserer Maschine als Motor – dem Läufer wird elektrische Energie über die Lamellen zugeführt – ist jetzt nicht mehr schwierig zu erkennen. Bild 64 zeigt, wie sich im Läufer durch Wicklung und Kommutator die Polarität ändert und dadurch stets magnetische Anziehung und Abstoßung zwischen Ständer und Läufer im Drehsinn wirken.

Nach diesem Ausflug in die Theorie wollen wir uns wieder der Praxis zuwenden und bauen. Der Kommutator zum Trommelläufer wird eine Art Gemisch aus dem Kollektor der Maschine I und dem unseres Doppel-T-Läufers. Bild 58 zeigte ein Foto des Kommutators mit Trommelläufer. An einem Ende einer Hartpapierwalze als Lamellenträger (Bild 65a) werden sechs Lamellen mit je einer versenkten Schraube ringsherum angebracht. Die Zwischenräume zwischen den Lamellen dienen als Isolation; wir füllen diese Abstände mit Alleskleber aus, um ein Verschmutzen zu verhindern. Werkstoff für die Lamellen, die alle einen Lötansatz haben, ist Messingblech (0,5...1 mm dick). Die Walze (der Lamellenträger) erhält in der Mitte eine Bohrung von 8 mm Durchmesser für die Läuferwelle. Die sechs Schrauben sitzen so weit an einem Ende der Walze, daß die Bürsten noch genügend »freies« Messing bestreichen können, selbst wenn wir über das andere Ende zur besseren Festigkeit noch einen schmalen Streifen aus Isolierband legen und kleben.

Der fertige Kommutator wird – am besten in einer Dreh- oder Bohrmaschine – mit Schmirgelleinen gesäubert und dann auf die Welle geschlagen. Er muß fest sitzen, 16 mm vom Wellenende und etwa 25 mm vom Blechpaket entfernt. Die Lamellen entsprechen im Sitz den Läuferpulven; jeder Lamellenzwischenraum liegt bei senkrechter Draufsicht mit einer Nut auf einer Geraden. Die Drahtenden der Spulen werden nach Bild 59b mit den Ansätzen der Lamellen verlötet. Zwischen Spule und Lamelle stecken je zwei verdrehte Drähte in

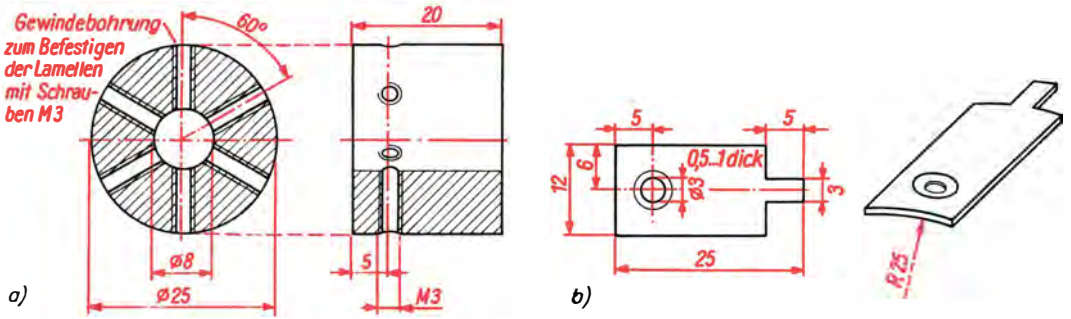
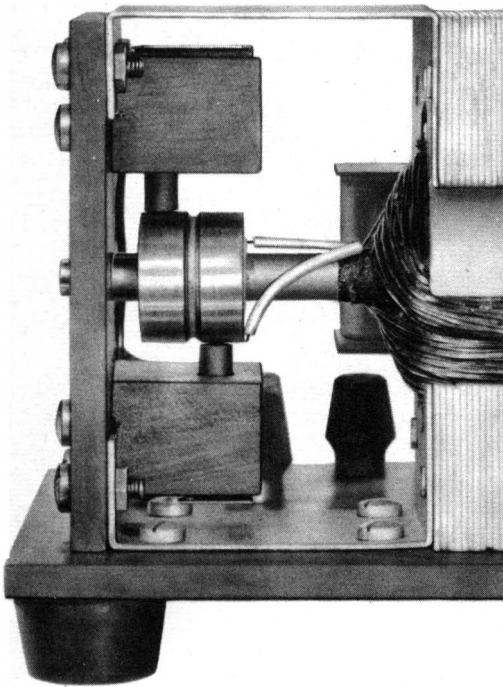


Bild 65. Lamellenträger (a) und Kommutator-Lamelle (b)

einem Stück Isolierschlauch. Auf das verjüngte Wellenende setzen wir eine Unterlegscheibe; am besten löten wir sie als Abgrenzung zum Hauptteil der Welle (mit dem Durchmesser 8 mm) an der Übergangsstelle an. Damit ist der Trommelläufer fertig.

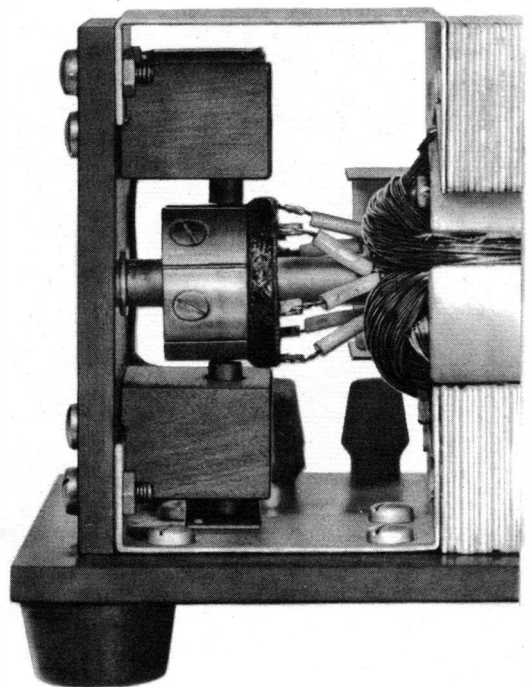
Bild 66. Kollektorbürsten in Schleifringstellung



Endmontage der Maschine II

Es wurde bereits beschrieben, wie Grundbrett, Ständer, Haltwinkel, Lagerböcke und die Anschlussklemmen zusammengesetzt werden. In diesem Zustand konnten wir die Läufer auf richtigen Lauf prüfen. Es fehlen nur noch die beiden Bürsten mit Haltern und Anschlüssen. Sie werden am Lagerbock b (Bild 48b) mit je einer Schraube M4 befestigt,

Bild 67. Kollektorbürsten in Kommutatorstellung



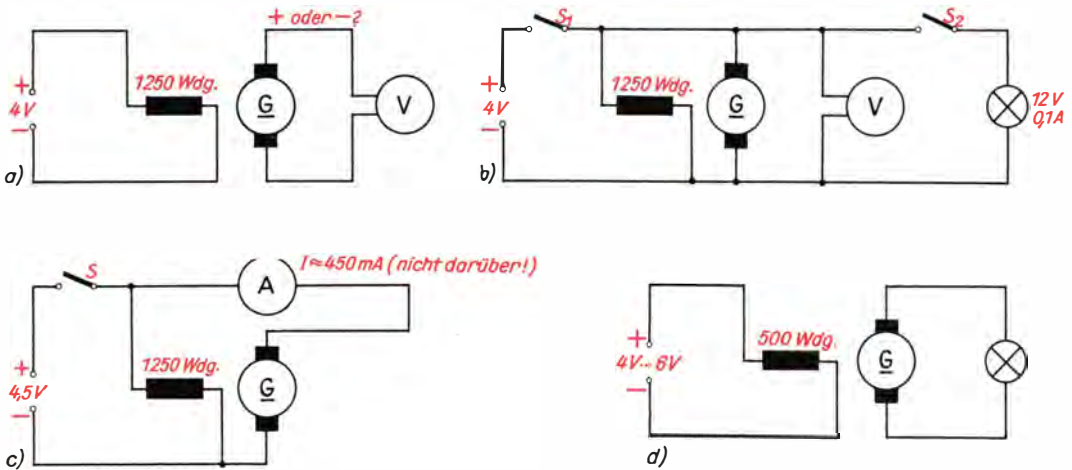


Bild 68. Versuche mit der Maschine II: a) wir bestimmen die Polarität der erzeugten Spannung, b) selbsterregter Nebenschluß-Gleichstromerzeuger (Dynamo), c) selbsterregter Hauptschluß-Gleichstromerzeuger, d) fremd-erregter Gleichstromerzeuger

Versuche mit der elektrischen Maschine II mit Trommelläufer

der Halter mit den zwei Bohrungen oberhalb des Kollektors. Jedes Andruckfederblech wird mit zwei der vier letzten Anschlußklemmen verbunden; die Anschlüsse sind zu löten.

Um den Läufer einzusetzen, lösen wir den Lagerbock nahe am Ständer, führen den Läufer durch die Ständerpole und stecken den Anschlagring auf die Welle. Der gelöste Lagerbock wird über die Welle (ohne Antriebsrad) gestreift und festgeschraubt. Der Anschlagring ist so anzuschrauben, daß die Welle nur das nötigste seitliche Spiel (etwa 0,5 mm) hat; zum Schluß wird das Antriebsrad befestigt (Gegenmutter nicht vergessen!). Beim Einführen des Läufers muß der Kollektor zwischen die Bürsten geklemmt werden; diese müssen also schon da sein. Die einzige untere sitzt gut in ihrer Bohrung auf dem Federblech; die obere müssen wir mit einiger Geschicklichkeit, notfalls mit Hilfe eines dünnen Bandes oder eines schmalen Werkzeuges, so lange festhalten, bis der Kollektor darunter ist. Dabei ist noch zu beachten: Die obere Bürste muß für die Schleifringe im äußeren Bohrloch (Bild 66), für den Kommutator im inneren Bohrloch (also genau über der unteren Bürste, Bild 67) sitzen. Nach dem Ölen der Lagerstellen wenden wir uns den Experimenten zu.

Um eine bessere Übersicht über die Versuchsergebnisse zu bekommen, führen wir die Experimente *systematisch* durch, nicht regellos. Die Versuche mit der Maschine I waren ein Beispiel für Systematik. Als Antrieb zur Stromerzeugung ist die Antriebsvorrichtung (Bild 42) mit der zweifachen Übersetzung geeignet, ferner können wir wieder kleinere Elektromotoren (beispielsweise von Nähmaschinen) benutzen. Die Drehzahl muß hoch genug sein; sonst erhalten wir zu niedrige Werte.

Die folgenden Experimente sind nur eine Auswahl; weitere Variationen sind durch Verändern

- der Größe und Polarität der Erregerspannung,
- der eingeschalteten Windungszahl der Feldwicklung,
- der Drehzahl des Antriebes

und anderer Größen möglich. Wir beginnen mit dem Trommelläufer zur *Stromerzeugung*.

Als Vorversuch bestimmen wir die *Polarität der erzeugten Spannung* (Bild 68a), indem wir ein Galvanometer anschließen, dessen Ausschlagrichtung bei bestimmter Stromrichtung bekannt ist; wir vergleichen damit (Selbstbau des Galvanometers s. S. 103). Die Richtung des Ausschlages wird durch Anschließen einer Monozelle mit entsprechendem Vorwiderstand vorher festgestellt. Eine weitere

Möglichkeit: Wir verwenden zum Nachweis angefeuchtetes Phenolphthaleinpapier; es rötet sich unter dem Minuspol, wenn beide stromführenden Drähte blank dicht nebeneinander daraufgedrückt werden.

Gleichstromgeneratoren

Wir führen nun zwei Versuche zum *dynamoelektrischen Prinzip* (nicht zu verwechseln mit dem elektrodynamischen, vgl. S. 42) durch. Dynamoelektrisches Prinzip bedeutet, daß man einen Teil der in einem Gleichstromerzeuger entstehenden elektrischen Energie zum Speisen der Ständerspule, also zur Felderregung, verwendet; dabei kann man in Reihe oder nebeneinander-(parallel-)schalten. Dieses Prinzip hat *Werner von Siemens* 1867 entdeckt und ihm auch den Namen gegeben. Die so geschalteten Stromerzeuger hießen danach *Dynamomaschinen*. Siemens benutzte den Restmagnetismus im Ständer, um zunächst einen schwachen Strom zu erzeugen; der vergrößert sofort das Ständerfeld. Dieses Feld induziert stärkere Ströme im Läufer, die wiederum das Feld verstärken. So schaukeln magnetisches Feld und Läuferstrom einander hoch – bis der induzierte Läuferstrom gerade so groß wird, daß er das vorhandene Feld aufrechterhält.

Versuch 1:

Wir haben in unserer Maschine nicht genügend Restmagnetismus; daher helfen wir kurze Zeit mit einer Taschenlampenbatterie oder mit Gleichstrom aus der Schalttafel nach – sozusagen zum magnetischen Anlassen. Nach Bild 68a bestimmten wir zunächst die Polarität der erzeugten Spannung. Der so gefundene Pluspol der Maschine wird dann mit demjenigen Ende der Spule verbunden, das vorher

am Pluspol der Spannungsquelle (zur Felderregung) lag. Bild 68b zeigt die so entstandene Schaltung, und zwar in Verbindung mit dem »Anlasserteil«. Sie ist eine Schaltung zum *selbsterregten Nebenschluß-Gleichstromerzeuger*. Die Feldwicklung liegt im Nebenschluß (parallel) zum Verbraucher (Glühlampe 12 V/0,1 A). »Angelassen« wird nur kurze Zeit, bis der Spannungsmesser einen Wert anzeigt, dann öffnen wir Schalter S_1 und schalten gleich danach mit S_2 die Glühlampe ein. Bei einer Ständerwindungszahl von 1250 werden wir etwa 12 V erreichen.

Versuch 2:

Selbsterregter Hauptschluß-Gleichstromerzeuger nach Schaltbild 68c. Die Feldwicklung liegt in Reihe mit dem Verbraucher (hier einem Strommesser). S ist zunächst geschlossen und wird geöffnet, sobald ein Strom fließt (bis etwa 450 mA). Beide Versuche können wir variieren, indem wir andere Windungszahlen der Feldwicklung (des Ständers) nehmen.

Versuch 3:

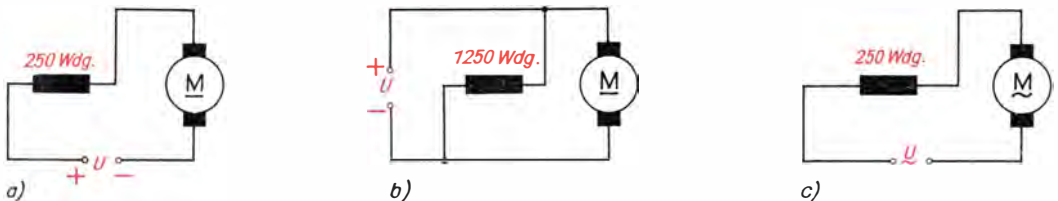
Fremderregter Gleichstromerzeuger nach Schaltbild 68d. Bei einer Erregerspannung U_{err} von 4 V – erhalten wir einen Kurzschlußstrom $I_k = 0,4 A$ – und eine Leerlaufspannung $U_L = 6 V$ –; bei $U_{err} = 6 V$ – ergeben sich $I_k = 0,75 A$ – und $U_L = 10 V$ –. Das ist eine beachtliche Leistung der Maschine. Wir können nun die Windungszahlen ändern und erneut messen.

Gleichstrommotoren und Universalmotor

Versuch 4:

Gleichstrom-Hauptschlußmotor nach Schaltbild 69a. Warum verwenden wir nur 250 Windungen? Weil durch den höheren Widerstand größerer Windungszahlen der Strom zu sehr geschwächt würde. Eigentlich müßten wir hierfür dickeren Draht in

Bild 69. Motorversuche: a) Gleichstrom-Hauptschlußmotor, b) Gleichstrom-Nebenschlußmotor, c) Wechselstrom-Hauptschlußmotor



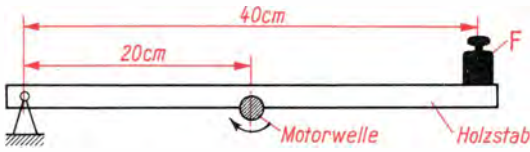


Bild 70. So belasten wir die Motorwelle

Feldwicklung und Läuferwicklung nehmen. Wir haben aber wenigstens einigermaßen gleichgroße Windungszahlen in beiden Wicklungen. Bei einer Spannung von $U = 11 \dots 24 \text{ V}$ — nimmt der Motor eine Stromstärke von $I = 0,6 \dots 0,7 \text{ A}$ auf. Nun können wir variieren.

Versuch 5:

Gleichstrom-Nebenschlußmotor nach Schaltbild 69b. Hier darf die Feldspule nicht zuviel Strom wegnehmen, daher die höchste Windungszahl. Bei $U = 8 \dots 24 \text{ V}$ — fließt ein Strom von $I = 0,7$ bis $0,85 \text{ A}$ —. Wir variieren, indem wir andere Windungszahlen der Feldspule einschalten, und beobachten die Wirkung auf die Drehzahl.

Versuch 6:

Wechselstrom-Hauptschlußmotor (Universalmotor) nach Bild 69c. Da sich in beiden Spulen die Selbstinduktion hemmend (induktiver Widerstand!) auswirkt, brauchen wir gleich eine höhere Spannung: $U = 18 \dots 24 \text{ V} \sim$; $I = 0,6 \dots 0,7 \text{ A} \sim$.

Einen *Wechselstrom-Nebenschlußmotor* gibt es nicht, weil sich die Selbstinduktion in den beiden Spulen verschieden auswirkt und bei Nebenschluß das richtige magnetische Zusammenwirken von Ständer und Läufer verhindert.

Wir nehmen die Charakteristik der Gleichstrommotoren auf

Versuch 7:

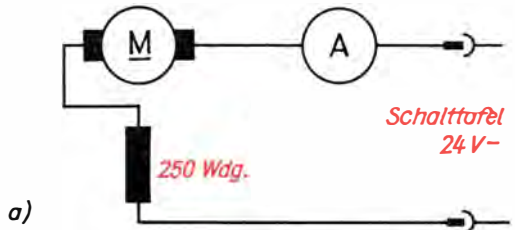
Zum Schluß der Versuchsreihe mit dem Trommelläufer wollen wir das *kennzeichnende Verhalten* (die *Charakteristik*) der Gleichstrommotoren aufnehmen. Das geschieht, indem wir den Motor verschieden belasten, die Belastungen und zugleich die dabei jeweils auftretenden Stromstärken und Drehzahlen je Minute ablesen! Die Drehzahl freilich nur, wenn wir einen Drehzahlmesser haben.

Wir belasten die Welle nach Bild 70 mit einem

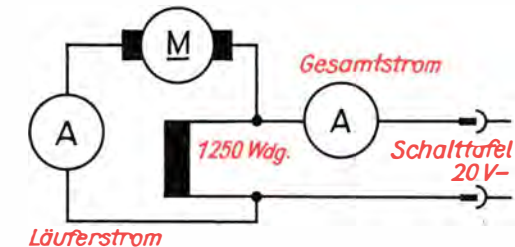
Holzstab (einseitigem Hebel). Dieser hat in seiner Mitte eine halbkreisförmige Aussparung, die genau eine Hälfte der Welle umschließt (Radius 4 mm). Der Stab hat einen rechteckigen Querschnitt (Höhe etwa 25 mm, Breite etwa 10 mm). Er ist auf einer Seite leicht drehbar gelagert und liegt mit der Aussparung auf der (sorgsam entfetteten) Läuferwelle zwischen Lagerbock und Antriebsrad. Für die Auflage der Wagestücke wird ein Brettchen angebracht. Diese Vorrichtung ist eine (auf den halben Wellenumfang wirkende) Bremse, deren Bremskraft wir verändern können. Mit Rücksicht auf die Erschütterungen kann man die Wagestücke auch in einer Kerbe des Stabes anhängen.

Die Schaltungen gehen aus Bild 71 hervor. Wesentlich sind die Strommesser. Das Schalttafelmeßgerät wird in beiden Fällen für den Gesamtstrom benutzt; für den Läuferstrom des Nebenschlußmotors müssen wir uns zusätzlich ein zweites besorgen. Der Versuch wird in zwei Teilen durchgeführt, einmal mit dem Nebenschlußmotor, zum anderen mit dem Hauptschlußmotor. Wir legen den letztgenannten an 20 V — und messen Gleichstrom I , Läuferstrom I_L und Drehzahl n zunächst ohne Belastung der Bremseinrichtung, dann nach-

Bild 71. Schaltung zum Bremsversuch am Hauptschlußmotor (a) und am Nebenschlußmotor (b)



a)



b)

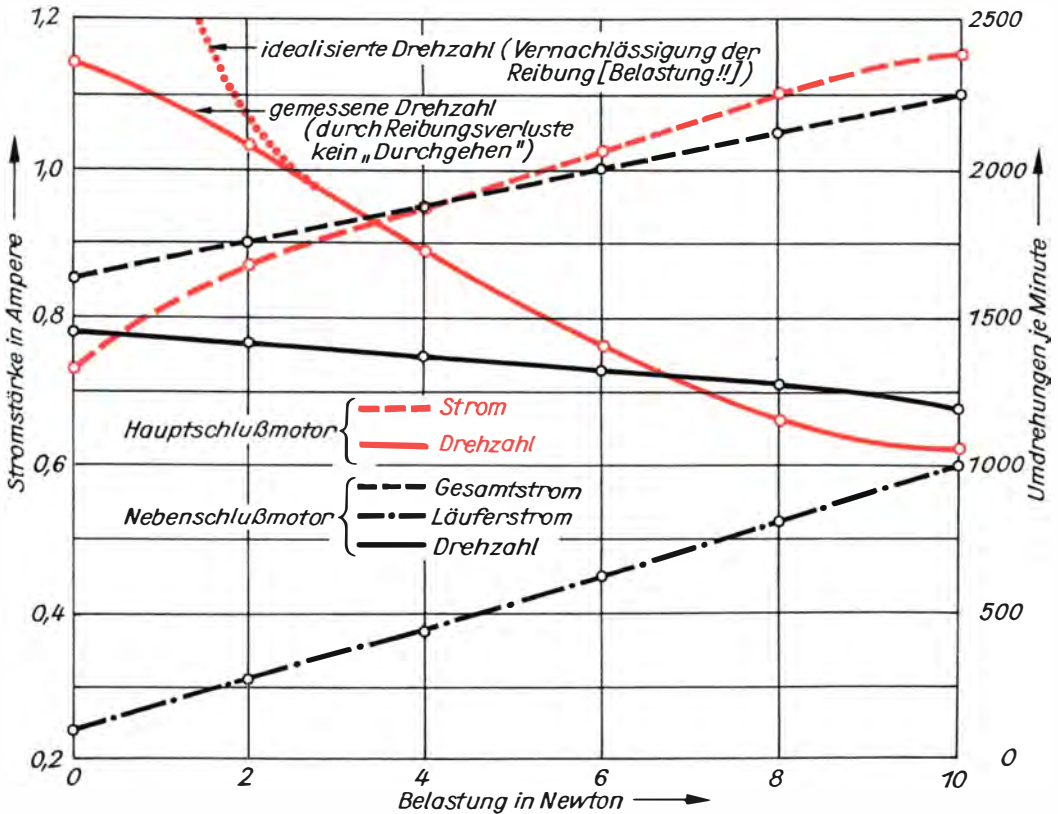
einander mit 2, 4, 6, 8 und 10 N (Newton; 1 N ≈ 0,1 kp) Belastung F . Beim Hauptschlußmotor, dessen Läuferstrom gleich dem Erregerstrom und dem Gesamtstrom ist, messen wir in derselben Weise nur Strom und Drehzahl. Die Messungen am Muster hatten folgendes Ergebnis (siehe Tabelle).

Tragen wir die Zahlenwerte in ein Diagramm ein, sieht die *Charakteristik* der beiden Motoren so aus, wie im Bild 72 dargestellt. Das sind außerordentlich aufschlußreiche Kurven, die wir uns sehr genau ansehen und einprägen wollen.

Beim *Hauptschlußmotor* bewirkt die steigende Belastung einen stark steigenden Strom bei stark abfallender Drehzahl. Die hohe Stromstärke bei großer Belastung macht ihn für alle Fälle geeignet,

Motorart	F in N	n in min^{-1}	I in A	I_1 in A
Nebenschlußmotor	0	1450	0,85	0,25
	2	1400	0,9	0,31
	4	1360	0,95	0,37
	6	1310	1	0,45
	8	1270	1,05	0,53
	10	1200	1,1	0,6
Hauptschlußmotor	0	2370	0,75	–
	2	2100	0,875	–
	4	1700	0,95	–
	6	1400	1,025	–
	8	1150	1,1	–
	10	1030	1,15	–

Bild 72. Charakteristik des Nebenschlußmotors und des Hauptschlußmotors



bei denen die Motorleistung auch bei starker Beanspruchung erhalten bleiben muß und bei denen man die verringerte Drehzahl in Kauf nehmen kann, beispielsweise bei elektrischen Triebwagen während des Anfahrens und Berganfahrens, bei Antrieben von Kranen, Aufzügen und in Walzwerken. Bei unbelastetem Hauptschlußmotor besteht die Gefahr, daß er »durchgeht«, das heißt, zu hohe Drehzahlen erreicht und auseinanderfliegt. (Unser Motor hat dafür zuviel Reibung als Belastung in den Lagern.) Die *Drehzahl* wird durch einen Vorwiderstand (veränderlicher Widerstand in Reihe geschaltet, Anlasser) verändert; er verringert die Spannung (Spannungsabfall!) und damit auch die Stromstärke. In der Praxis verschlechtert sich durch solche Art der *Drehzahldrosselung* die Wirtschaftlichkeit; man hilft sich dadurch, daß man parallel zur Ständerwicklung einen Widerstand schaltet, der einen Teil des Läuferstromes durchläßt. Der *Drehsinn* wird verändert, indem wir die Anschlüsse zum Ständerfeld *oder* die zum Läufer vertauschen.

Beim *Nebenschlußmotor* bleibt die Drehzahl auch bei größerer Belastung ziemlich konstant; nur die Stromstärke steigt. Er ist daher unter anderem zum Antrieb von Werkzeugmaschinen gut geeignet. Seine Drehzahl wird durch einen Anlasser in Reihe zum Läufer nach unten verändert; auch hier sinkt die Wirtschaftlichkeit durch Verlustwärme im Anlasser. Die Drehzahl erhöht sich, wenn man das Ständerfeld durch einen vorgeschalteten veränderlichen Widerstand schwächt. Das ist ein fast verlustfreies Verfahren. Der Läuferstrom wird dabei größer, die Drehkraft und die Drehzahl steigen. Wird der Ständerstrom unterbrochen, *so geht der Motor bei Leerlauf durch*; bei starker Belastung bleibt er stehen, weil die Drehkraft dann zu klein ist. Der *Drehsinn* des Läufers wird dadurch geändert, daß man die Anschlüsse des Läufers *oder* die der Ständerwicklung umpol.

Weitere Versuche, jetzt mit Doppel-T-Läufer

Versuch 8:

Zunächst der Nachweis, daß wir über die Schleifringe tatsächlich eine Wechselspannung erhalten! Wir schließen nach Bild 73a ein Galvanometer an den Läufer. Beim langsamen Drehen des Läufers pendelt der Zeiger des Meßgerätes langsam um

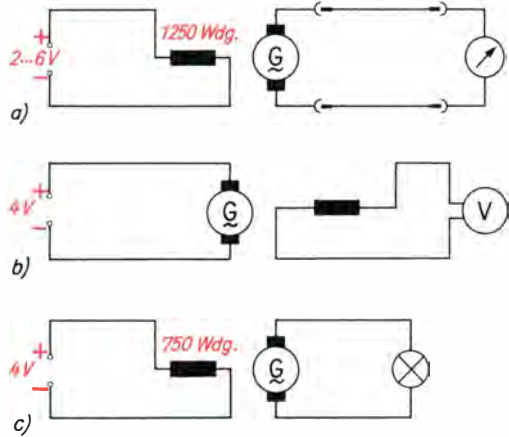


Bild 73. Weitere Versuche mit der Maschine II: a) Prüfung der Maschine mit dem Doppel-T-Läufer, b) fremderregter Wechselstromerzeuger (Innenpolmaschine), c) Außenpolmaschine

seinen Nullpunkt und zeigt dadurch an, daß und bei welcher Läuferstellung zum Ständer die Stromrichtung wechselt.

Versuch 9:

Fremderregter Wechselstromerzeuger nach Bild 73b. Wir erhalten bei einer Erregerspannung $U_{err} = 4\text{ V}$ — eine Leerlaufspannung $U_L = 5\text{ V} \sim$ und eine Kurzschluß-Stromstärke $I_K = 0,05\text{ A} \sim$. Bei diesem Versuch läuft die Maschine als *Innenpolmaschine*; wir nehmen die erzeugte Spannung an der Feldwicklung (am Ständer) ab und benutzen den Läufer zur Erregung — alles sozusagen verkehrt herum.

Versuch 10:

Wechselstromerzeuger als Außenpolmaschine nach Bild 73c. Bei $U_{err} = 4\text{ V}$ — erhalten wir $U_L = 6\text{ V} \sim$ und $I_K = 0,15\text{ A} \sim$, also eine erheblich größere Stromstärke als bei dem vorhergegangenen Versuch.

2. Kapitel

Elektroenergie wird verteilt

Leitungen und Netze, Knotenpunkte und Maschen

In Leitungen (Drähten, bei sehr großen Stromstärken auch Schienen) wird der Strom fortgeleitet. Je kleiner der Ohmsche Widerstand eines Leiters ist, um so besser leitet er, und um so geringer sind die Verluste durch *Spannungsabfall*. Der Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt wird als *spezifischer elektrischer Widerstand* bezeichnet, abgekürzt mit dem griechischen Buchstaben ρ (rho); er ist vom Werkstoff des Leiters abhängig. Da er auch noch von der Temperatur abhängt, gibt man die Werte bei 20°C an; die Maßeinheit ist $\Omega \cdot \text{m}$ (oder $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$). Die für uns wichtigsten Werte sind in Tabelle 3 im Tabellenanhang zu finden.

Der Widerstand R ist um so größer, je größer der spezifische Widerstand ρ und die Länge l des Leiters und je kleiner der Drahtquerschnitt A sind; es gilt

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}.$$

Da der (kreisförmige) Querschnitt eines Drahtes nach der Gleichung der Kreisfläche $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ er-

rechnet wird, läßt sich jeder Widerstand leicht ermitteln. Schauen wir uns dazu ein Beispiel an!

Aus Nickelindraht ($\rho = 0,4 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) von 0,5 mm Durchmesser soll ein Widerstand von 20Ω hergestellt werden. Welche Drahtlänge ist erforderlich?

$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \rho \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d^2}$. Diese Gleichung stellen wir nach l um:

$$l = \frac{R \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho} = \frac{20 \Omega \cdot \pi \cdot 0,5^2 \text{ mm}^2 \cdot \text{m}}{4 \cdot 0,4 \Omega \cdot \text{mm}^2} = 9,82 \text{ m}.$$

Wichtig ist die Belastbarkeit des Drahtes, die *höchste zulässige Stromstärke*; sie ist in Tabelle 5 auf S. 247 zu finden. Ein frei liegender oder frei gespannter Draht trägt die doppelte Belastung, weil die umgebende Luft kühlt. Im übrigen ist eine »Handwärme« des Drahtes bei unseren Geräten zulässig. Wir bemühen uns freilich immer, Kupferdraht zur Stromleitung zu verwenden; Aluminium (oder gar Eisen) hat wesentlich ungünstigere Leitfähigkeiten und ist auch weniger gut zu verarbeiten (es läßt sich sehr schwer löten und bricht leicht).

Wollen wir den Strom über mehrere und womöglich noch verschiedene geartete Wege gleichzeitig leiten, reicht das einfache Ohmsche Gesetz nicht mehr aus; da müssen wir die beiden Kirchhoffschen Gesetze anwenden.

Von den Kirchhoffschen Gesetzen zum Knotenpunktsatz und zum Maschensatz

Bei einer *Stromverzweigung* liegen mehrere Widerstände nebeneinander; sie stellen beispielsweise Glühlampen verschiedener Leistung für den Fall dar, daß wir das Modell des Beleuchtungssystems eines Hauses bauen wollen. Dann besagt das erste Kirchhoffsche Gesetz, daß der Gesamtstrom gleich der Summe der Teilströme ist. Da ein Stromverzweigungspunkt vom Elektrotechniker auch als *Knotenpunkt* bezeichnet wird, können wir das 1. Kirchhoffsche Gesetz zum *Knotenpunktsatz* verallgemeinern:

In jedem Knotenpunkt ist die Summe der zufließenden Ströme I_{zu} gleich der Summe der abfließenden Ströme I_{ab} .

Im Bild 74 ist ein Knotenpunkt von 5 Leitungen dargestellt; die Ströme I_1 und I_2 fließen zum Knotenpunkt, die Ströme I_3 , I_4 und I_5 fließen ab. Der Knotenpunktsatz lautet für diesen Fall $I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$ bzw. nach beidseitiger Subtraktion der abfließenden Ströme

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

In dieser Art (zufließende Ströme erhalten ein positives, abfließende ein negatives Vorzeichen) gestattet es der Knotenpunktsatz, unbekannte Ströme in Leitungsnetzen zu berechnen. Dazu wieder ein Beispiel.

Bild 75a zeigt ein Leitungsnetz mit sechs Leitungen, in denen Widerstände oder Spannungsquellen oder auch beide liegen; das vernachlässigen wir jedoch. Die drei bekannten Ströme haben die Werte $I_1 = 1\text{ A}$, $I_3 = 3\text{ A}$ und $I_5 = 5\text{ A}$. Unsere Aufgabe besteht nun darin, die Ströme nach Betrag und Richtung in den restlichen drei Leitungen zu ermitteln.

1. Wir errechnen die im Bild 75b eingetragenen Ströme I_2 , I_4 und I_6 ; sowohl die Zuordnung der

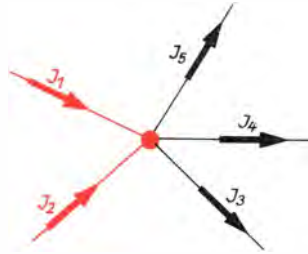


Bild 74. Zufließende und abfließende Ströme eines Knotenpunktes

Ströme zu den Leitungen als auch die Stromrichtungen werden willkürlich gewählt. Erhält einer dieser Ströme (oder auch alle) ein *negatives* Vorzeichen, so fließt er *entgegen* der angenommenen Richtung.

2. Nun sind die *Knotenpunktgleichungen* aufzustellen. Dabei darf ein beliebiger Knotenpunkt unberücksichtigt bleiben. Für die Berechnung von drei unbekanntem Strömen reichen drei voneinander unabhängige Gleichungen aus:

$$\text{Knotenpunkt 2: } +I_1 + I_4 - I_5 = 0,$$

$$\text{Knotenpunkt 3: } +I_3 + I_6 - I_4 = 0,$$

$$\text{Knotenpunkt 4: } +I_2 + I_5 - I_6 = 0.$$

3. Mit der ersten Gleichung berechnen wir den Strom I_4 :

$$I_4 = I_5 - I_1 = 5\text{ A} - 1\text{ A} = 4\text{ A}.$$

Nun läßt sich aus der zweiten Gleichung I_6 ermitteln:

$$I_6 = I_4 - I_3 = 4\text{ A} - 3\text{ A} = 1\text{ A}.$$

Bleibe zum Schluß noch I_2 nach der dritten Gleichung:

$$I_2 = I_6 - I_5 = 1\text{ A} - 5\text{ A} = -4\text{ A}.$$

Während die Ströme I_4 und I_6 in der angenom-

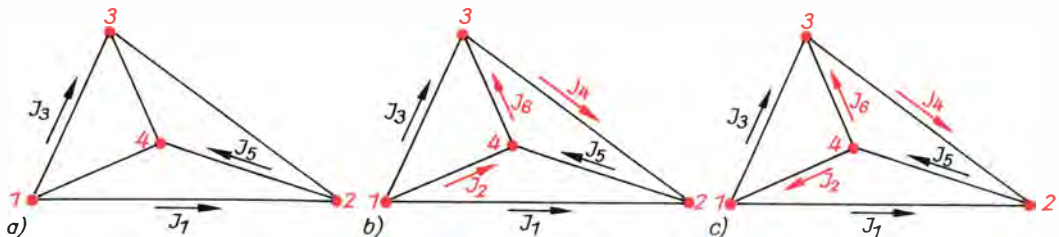


Bild 75. Berechnung unbekannter Ströme in einem Leitungsnetz

menen Richtung fließen, müssen wir die Stromrichtung von I_2 korrigieren; I_2 fließt entgegen der im Bild 75b eingetragenen Richtung.

4. Zur Kontrolle der Rechnung zeichnen wir das Leitungsnetz noch einmal (Bild 75c) mit den gegebenen und berechneten Strömen; zufließende und abfließende Ströme müssen den gleichen Wert haben:

Knotenpunkt 1: $I_2 = I_1 + I_3$
 $4\text{ A} = 1\text{ A} + 3\text{ A}.$

Knotenpunkt 2: $I_1 + I_4 = I_5$
 $1\text{ A} + 4\text{ A} = 5\text{ A}.$

Knotenpunkt 3: $I_3 + I_6 = I_4$
 $3\text{ A} + 1\text{ A} = 4\text{ A}.$

Knotenpunkt 4: $I_5 = I_2 + I_6$
 $5\text{ A} = 4\text{ A} + 1\text{ A}.$

So wie das 1. Kirchhoffsche Gesetz als Knotenpunktsatz für die Elektrotechnik bedeutungsvoll ist, existiert auch zum 2. Kirchhoffschen Gesetz die technische Verallgemeinerung (*Maschensatz*):

In einem geschlossenen Umlauf einer Netzmasche ist die Summe der Urspannungen E gleich der Summe der Spannungsabfälle U .

Unter einer *Masche* ist dabei ein Netzwerkausschnitt zu verstehen, der von einem geschlossenen Leiterzug begrenzt wird und in dem keine Querverleitung mehr vorhanden ist. Bild 76 zeigt ein einfaches Netzwerk mit zwei Maschen, d. h. zwei geschlossenen Stromkreisen mit einem gemeinsamen Leiterzug.

Gegeben seien die beiden Urspannungen $E_1 = 10\text{ V}$ und $E_2 = 5\text{ V}$ sowie die Widerstände $R_2 = 5\ \Omega$ und $R_3 = 5\ \Omega$; gesucht sind die Ströme in den Leiterzügen und die Spannungsabfälle über den Widerständen.

1. In jeder Masche wählen wir einen beliebigen Umlaufsinn und legen die Stromrichtungen fest. Die Richtungen der Teilströme müssen mit denen der zugehörigen Spannungsabfälle übereinstimmen.

2. Beim Aufstellen der Maschengleichungen werden Urspannungen und Spannungsabfälle *positiv* gerechnet, wenn ihre Richtungen mit dem gewählten Umlaufsinn übereinstimmen; im anderen Falle sind sie *negativ*.

Maschengleichung I: $E_1 - E_2 = U_2,$

Maschengleichung II: $E_2 = U_3 - U_2.$

Aus der ersten Gleichung folgt $U_2 = E_1 - E_2 = 10\text{ V} - 5\text{ V} = 5\text{ V}$ und aus der zweiten Gleichung: $U_3 = E_2 + U_2 = 5\text{ V} + 5\text{ V} = 10\text{ V}.$

Nach dem Ohmschen Gesetz müssen die Teilströme

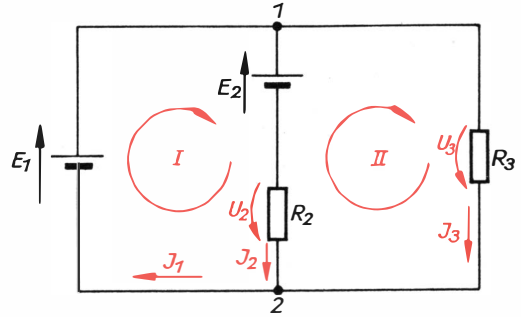


Bild 76. Einfaches Leitungsnetz aus zwei Maschen

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{5\text{ V}}{5\ \Omega} = 1\text{ A} \text{ und } I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{10\text{ V}}{5\ \Omega} = 2\text{ A}$$

betragen, die beide zum Knotenpunkt 2 fließen; für den abfließenden Strom I_1 gilt

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1\text{ A} + 2\text{ A} = 3\text{ A}.$$

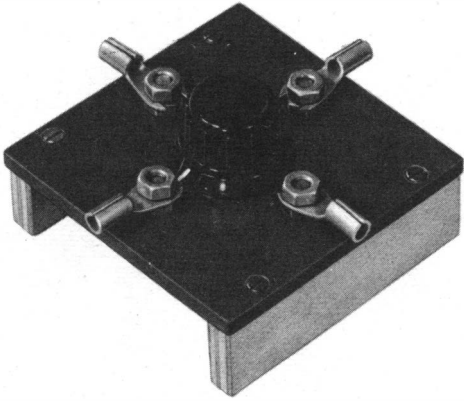
Knotenpunktsatz und Maschensatz sind die grundlegenden Beziehungen zur Berechnung von elektrischen Leitungsnetzen, in denen die Energie verteilt wird.

Wir bauen Schalter und Schaltungen

Für fast alle Versuche der Energieverteilung brauchen wir aber noch mehr als Leitungen; zunächst einmal *Schalter*, um die Stromkreise bequem öffnen und schließen zu können.

Ein Mehrzweckschalter entsteht

Der Aufbau der Schalter (Bild 77) ähnelt dem der Verteilertafel: Eine Hartpapierplatte (4...6 mm dick und 80 mm × 80 mm groß) ist mit zwei Sperrholzleisten verschraubt (jede 8...10 mm dick und 80 mm × 20 mm groß). Wir bohren nach Bild 78a das Mittelloch (6,1 mm Durchmesser) für die Kontaktwelle und die vier seitlichen Bohrungen mit Gewinde M5 für die vier Kontaktschrauben M5. Die vier kleinsten Bohrungen (3 mm Durchmesser) sollen die versenkten Holzschrauben aufnehmen, die Platte und Leisten verbinden. Die Kontaktwelle hat einen Durchmesser von 6 mm und eine Länge von 35 mm, davon 15 mm mit Gewinde M6. Auf



dem glatten Wellenteil wird ein Drehkopf mit Markierung befestigt. In jedes Gewindeloch schrauben wir eine Metallschraube M5 (etwa 20 mm lang) mit Rundkopf so weit von der Unterseite der Platte ein, daß der Kopf noch 3 mm von der Platte absteht. Auf der Oberseite der Platte wird je eine Mutter aufgeschraubt. Darauf stecken wir jeweils einen Kabelschuh für Bananenstecker und schrauben noch eine zweite Mutter darauf. Wer nur Flachkopfschrauben hat, muß in die Köpfe eine Vertiefung bohren, in der eine entsprechende Ausbeulung der Kontaktfeder einrasten kann. Am besten spannt man die Schraube in die Bohrmaschine und führt sie auf den fest im Schraubstock

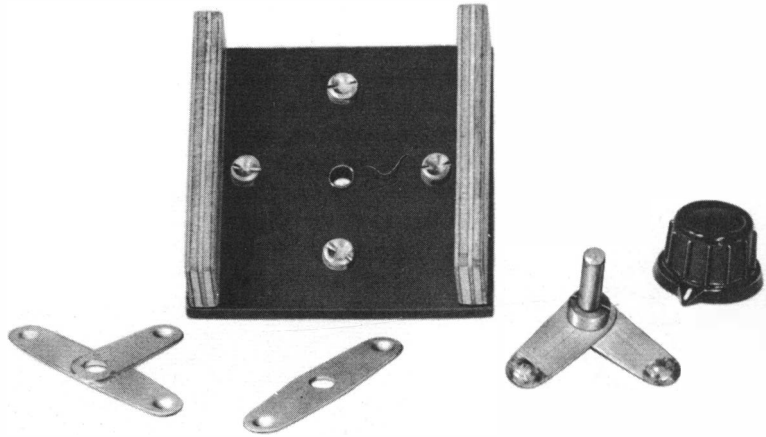
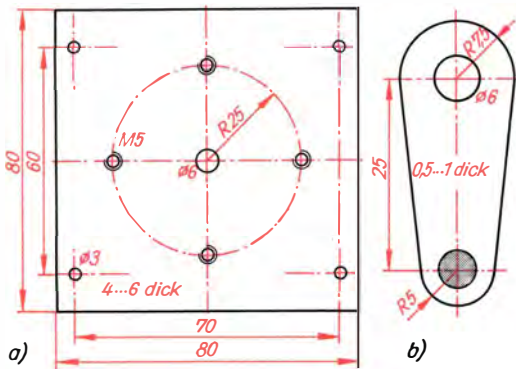


Bild 78. Schalterplatte (a) und Kontaktarm (b)



eingespannten Bohrer. Der Schlitz im Schraubkopf zwingt zur Vorsicht; der Kopf wird auf jeden Fall mit einem möglichst breiten Körner angekörrt.

Die *Kontaktwelle* wird von oben durch die Mittelbohrung gesteckt und auf der Unterseite mit einer Mutter so verschraubt, daß sie sich mit geringstem Spiel leicht drehen läßt. Schließlich wird auf der Welle (mit Mutter und Gegenmutter) eine der vier Kontaktfedern fest angeschraubt – je nachdem, welche Schalterart wir zusammenbauen. Diese Kontaktstreifen fertigen wir aus federndem Messingblech (0,5 mm dick) an, und zwar der Einfachheit halber aus neun Hälften (Armen) nach Bild 78b. Sie erhalten alle an dem breiteren Ende eine Bohrung (einspannen und gemeinsam bohren!) und am

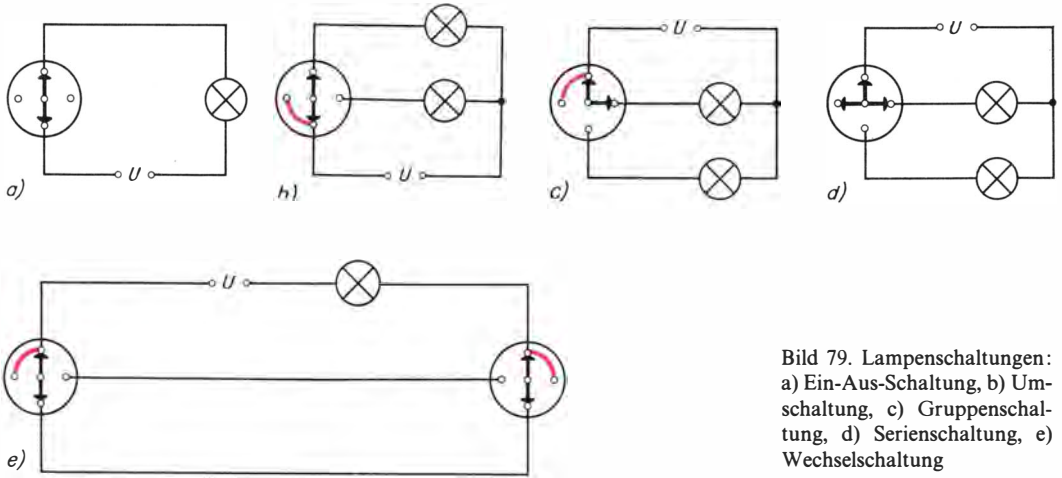


Bild 79. Lampenschaltungen: a) Ein-Aus-Schaltung, b) Umschaltung, c) Gruppenschaltung, d) Serienschaltung, e) Wechselschaltung

schmalen Ende eine Ausbuchtung (etwa 1,5 mm tief) mit etwa 5 mm größtem Durchmesser. Die Ausbuchtungen erzielen wir, indem wir das Blech auf Holz legen und mit einem am Ende halbkugelig zugefeilten Eisenstab von etwa 8 mm Durchmesser kräftig draufschlagen – ähnlich, wie man einen Durchschlag oder Körner handhabt. Mit dieser Ausbeulung schleifen die Streifen über die Schraubkontakte und rasten über den Schraubköpfen ein.

Von vier dieser Hälften werden je zwei so zusammengelötet, daß sie einen geraden Streifen bilden und die Bohrungen genau zusammenfallen. Die Mittelpunkte der Vertiefungen sind dann 50 mm voneinander entfernt. Zwei weitere Hälften löten wir zu einem rechten Winkel zusammen und die letzten drei zu einem T-förmigen Kontaktblech: zwei in einer Geraden und die dritte in der Mitte rechtwinklig abstehend. Stets müssen alle Bohrungen genau übereinanderliegen. Haben wir ausgebohrte Schraubköpfe, so werden die Ausbuchtungen ihnen zugewendet; sind die Schraubköpfe rund, so legen wir die Kontaktstreifen umgekehrt, so daß die Vertiefungen über den Rundungen einrasten.

Der Werkstoff für die Kontaktschrauben ist am besten ebenfalls Messing; Eisen genügt jedoch auch. Drehknopf und Kontaktstreifen müssen so zueinander festgestellt werden, daß die Markierung des Knopfes (ein weißer Strich) stets über einem Kontaktarm liegt.

Wir kommen auf das Modell der Hausinstallation zurück und übertragen unsere physikalischen Überlegungen auf die Schaltungen (Bilder 79 und 80).

Lampenschaltungen mit dem Mehrzweckschalter

Versuch 1:

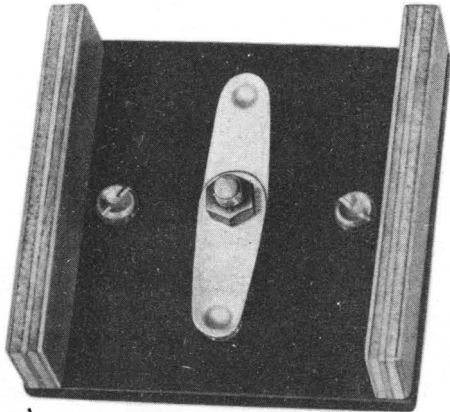
Einfacher Stromkreis. Für alle Versuche benutzen wir unsere Schalttafel als Spannungsquelle und Glühlämpchen auf Lampenbrettchen. Der einfache Stromkreis braucht außer der Stromquelle nur eine einzige Glühlampe und einen *Ausschalter* mit geradem Kontaktstreifen (Bild 79a). Die Form des Kontaktbleches für sämtliche Versuche geht aus der Schalterdarstellung in den Bildern hervor.

Versuch 2:

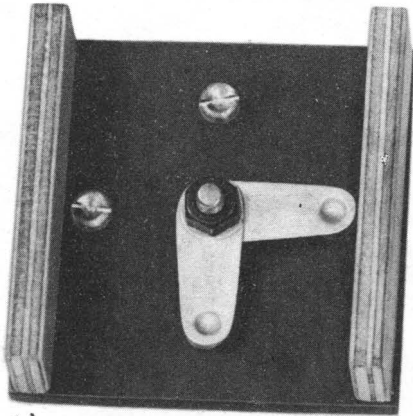
Einfache Umschaltung. Schalten wir wahlweise einen von zwei Stromkreisen ein, so verwenden wir den Schalter mit geraden Kontaktstreifen als *Umschalter*. Der Schalter hat keine Ausschaltstellung. Zwei benachbarte Kontakte sind oberhalb des Schalters miteinander verbunden (Bild 79b).

Versuch 3:

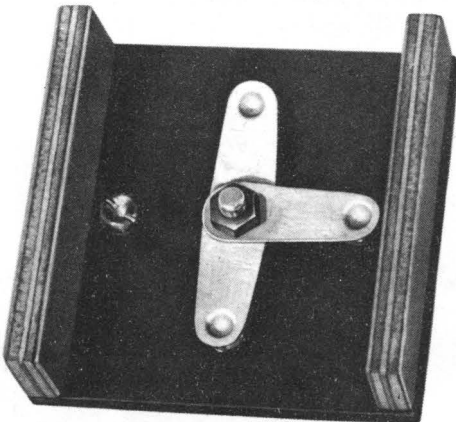
Gruppenschaltung. Zwei »Verbrauchergruppen« (das ist je mindestens eine Glühlampe) können abwechselnd ein- und ausgeschaltet werden; der *Gruppenschalter* hat das Winkel-Kontaktblech.



a)



b)



c)

Bild 80. Ausschalter (a), Gruppenschalter (b) und Serienschalter (c), von unten gesehen

Zwei Kontakte auf dem Schalter werden miteinander verbunden (Bild 79c).

Versuch 4:

Serienschaltung. Mit dem T-Kontaktblech des *Serienschalters* werden zwei Verbrauchergruppen wahlweise einzeln oder gemeinsam geschaltet (Bild 79d). Diese Schaltung finden wir oft bei Beleuchtungskörpern mit mehreren Glühlampen. Man soll dann möglichst ungleich verteilen, beispielsweise sechs Glühlampen in eine Gruppe zu zwei und eine andere zu vier Glühlampen aufteilen; auf diese Weise erhält man drei verschiedene Beleuchtungsstärken.

Versuch 5:

Wechselschaltung. Zu ihr gehören nur ein Stromkreis, aber zwei Leitungen zwischen den beiden *Wechselschaltern* mit geradem Kontaktblech (Bild 79e), um den Stromkreis wechselseitig (daher der Name!) von beiden Schaltern aus schließen und öffnen zu können. Auf jedem Schalter werden zwei Kontakte miteinander verbunden. Die Gruppen-, Serien- und Wechselschalter sind *Umschalter*.

Materialökonomie und Naturgesetze bei der Übertragung von Elektroenergie

Bei langen Leitungen in den Städten macht sich der *Spannungsverlust* unangenehm bemerkbar; deswegen bildet man »Ringleitungen« und führt – wie bei Straßenbahn und Obus – »frische« Energie an mehreren Stellen zu. Bei *Drehstrom-Überlandleitungen* verringert man die großen Stromstärken dadurch, daß man die Spannungen mit Transformatoren entsprechend auf 110, 220 oder 400 kV (bis etwa 200, 400 und 800 km Entfernung) erhöht und kurz vor dem Verbraucher auf 220 V herabtransformiert.

Eine einfache Rechnung soll uns das Problem verdeutlichen: Über eine 1 km lange Doppelleitung aus Aluminiumdraht von je 5 mm² Querschnitt soll ein

Strom von 10 A fließen; die Eingangsspannung betrage 200 V. Da der Widerstand der Doppelleitung nach $R = \rho \frac{l}{A} = 0,0285 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{2000 \text{ m}}{5 \text{ mm}^2} = 11,4 \Omega$ beträgt, fallen über der Leitung $U = R \cdot I = 11,4 \Omega \cdot 10 \text{ A} = 114 \text{ V}$ ab. Am Ende der Doppelleitung stehen deshalb nur noch $200 \text{ V} - 114 \text{ V} = 86 \text{ V}$ zur Verfügung.

Aus rein physikalischer Sicht bieten sich drei Möglichkeiten, den auftretenden Spannungsverlust zu reduzieren:

1. Vergrößern des Drahtquerschnittes,
2. Erhöhen der Spannung und
3. Verwendung eines Leitermaterials mit sehr geringem spezifischem Widerstand.

Technisch und ökonomisch sind jedoch nur die beiden letzten Möglichkeiten bedeutsam. Angenommen, der Spannungsverlust darf nur noch den hundertsten Teil des obigen Wertes, also 1,14 V, betragen. Nach der ersten Möglichkeit müßte dann ein Draht der Doppelleitung $100 \cdot 5 \text{ mm}^2$ Querschnitt erhalten; dem entspräche ein Durchmesser von 25,2 mm! Das wäre nicht nur eine ungeheure Materialverschwendung, sondern würde auch große technische Schwierigkeiten bei der Leitungsverlegung wegen der hohen Masse mit sich bringen.

Die zweite Möglichkeit war lange Zeit die einzige, die sich technisch mit vertretbarem Aufwand verwirklichen ließ und die auch gegenwärtig noch am meisten angewendet wird. Baut man nämlich sowohl am Anfang als auch am Ende der Doppelleitung je einen Transformator ein, von denen der eingangsseitige die Spannung von 200 V auf beispielsweise 20 kV erhöht und der ausgangsseitige diese Spannung wieder auf 200 V heruntertransformiert, so wird der Strom für die im Beispiel angenommene Leistung von $P = U_1 \cdot I_1 = 200 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} = 2000 \text{ W}$ bedeutend niedriger: $I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{2000 \text{ W}}{20000 \text{ V}} = 0,1 \text{ A}$. Über der Doppelleitung fallen jetzt nur noch $11,4 \Omega \cdot 0,1 \text{ A} = 1,14 \text{ V}$ ab.

Die letzte angedeutete Möglichkeit wird gegenwärtig bereits praktisch erprobt: Übertragung elektrischer Energie über *supraleitende Kabel*. Die Erscheinung der *Supraleitung* wurde 1911 von dem holländischen Physiker *H. Kamerlingh-Onnes* (1853 bis 1926) bei der experimentellen Untersuchung der Leitfähigkeit von Quecksilber unter sehr niedrigen Temperaturen entdeckt. Unter Supraleitung versteht man die Erscheinung, daß bei einigen Stoffen der elektrische Widerstand in der Nähe des absoluten Nullpunktes sprunghaft einen unmeßbar kleinen Wert annimmt. So verschwindet z. B. der spezifische Widerstand von Quecksilber bei 4,17 K (Kelvin, das sind $4,17 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = -268,98 \text{ }^\circ\text{C}$), von Blei bei 7,26 K oder von Niob bei 9,22 K. Auch zahlreiche Legierungen werden supraleitend, beispielsweise Niobiumnitrid bereits bei 23 K. 1971 wurde in der Sowjetunion eine erste Experimentalanlage mit supraleitenden Kabeln aufgebaut.

Als Kühlfüssigkeit zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der extrem niedrigen Temperaturen benutzt man *Helium* im sogenannten *superkritischen Zustand*. Die Entfernung zwischen den einzelnen Kühlstationen kann dann 30...80 km betragen. Der Energiebedarf für die Kühlung des Heliums entspricht nur einem Bruchteil der Energie, die der Widerstand in herkömmlichen Leitungen in Wärme umwandelt und die so für die Nutzung verlorengehen würde. Doch die Entwicklung auf diesem Gebiet der Energiewirtschaft geht mit Riesenschritten voran, z. B. bei der Erforschung der Existenz metallischen Wasserstoffs. Wasserstoff ist unter gewöhnlichen Bedingungen gasförmig und leitet den elektrischen Strom nicht. Unter höchsten Drücken läßt er sich jedoch bei 14 K ($-259,15 \text{ }^\circ\text{C}$) in den metallischen Zustand überführen. Wie theoretische Berechnungen zeigten, wäre der metallische Wasserstoff, einmal erzeugt, auch bei höheren Temperaturen stabil und ein Supraleiter. Um Energieleitungen aus solchem supraleitendem Wasserstoff zu bauen, könnte dann anstelle des knappen und teuren Heliums der im Überfluß vorhandene *Stickstoff* als Kältemittel verwendet werden.

3. Kapitel

Elektroenergie wird angewendet

Wir nutzen die Wirkungen des elektrischen Stromes aus

Von den Anwendungen der elektrischen Energie in elektrischen Geräten und Maschinen sind wir ununterbrochen, Tag und Nacht, umgeben: Beleuchtung, Fernsprecher, Rundfunk und Fernsehen, Küchenmaschinen mit elektrischem Antrieb (einschließlich der Kühlschränke und Waschmaschinen), Eisenbahn-Triebwagen, Straßenbahn und Obus, Einrichtungen in Theater und Kino, Elektrizität in Landwirtschaft und Industrie, im Kraftfahrzeug und so weiter; man kann die Aufzählung noch weit fortsetzen.

Die nun folgenden Abschnitte sollen uns mit einer Reihe wichtiger elektrischer Geräte vertraut machen; wie immer lernt man sie am besten kennen, wenn man sie selber baut. Mehr als bisher tritt nun die *technische Form* (neben der physikalischen Wirkungsweise) hervor; wir können jetzt selber vergleichen und daher auch mehr als bisher eigene, zusätzliche Gedanken verwirklichen. Es sind ebenfalls *Modelle*, einzelne Stücke, aber sie sollen eben-

sogut wie industriell hergestellte Geräte einwandfrei arbeiten. Und sie sollen auch gut aussehen; das ist eine wesentliche Forderung.

Die drei hervorragenden Wirkungen des elektrischen Stromes sind seine chemische, seine magnetische und seine Wärmewirkung. Auf die *chemische Wirkung* wollen wir hier nicht eingehen und uns mit Erläuterungen und Experimenten zum Galvanisieren in der Literatur begnügen. Anders ist es mit der *Wärmewirkung* – wenn es auch nicht viel Sinn hat, elektrische Öfen und Heizgeräte zu basteln, schon weil unsere Niederspannung uns zu Einschränkungen zwingt. Aber wir können recht einfach einen kleinen Gasanzünder bauen. Etwas weniger Arbeit macht später ein Thermoschalter mit Bimetall; mit ihm können wir sogar Blinkanlagen aufbauen.

Wärmewirkung in einem elektrischen Gasanzünder

Er eignet sich vorzüglich als kleines Geschenk und verdeutlicht anschaulich die Nützlichkeit unserer Bastelei. Die Bilder 81 und 82 zeigen die Ähnlichkeit mit den im Handel erhältlichen. Unser Gasanzünder läßt sich mit wenig Material herstellen. Wir brauchen: eine leere Konservendose, zwei Glühlampenfassungen und eine (defekte, durchge-



Bild 81. Unser Gasanzünder

Bild 82. Schnitt durch den Gasanzünder

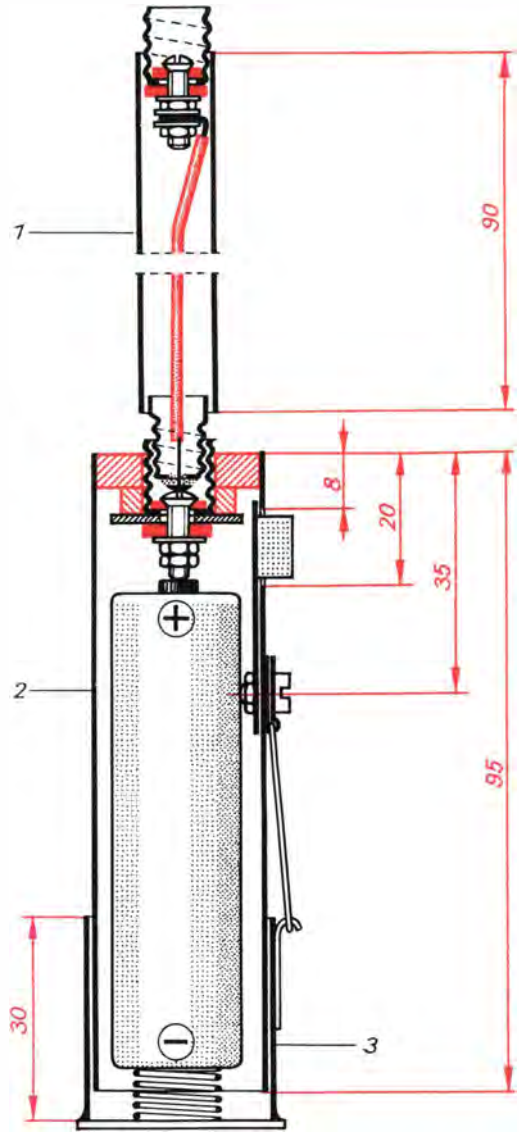


Bild 83. Vorbereitung der Lötnaht



brannte) Glühlampe E 10, zwei größere Büroklammern aus Draht, drei Schrauben und fünf Muttern M3 mit vier Unterlegscheiben, einen langen Kontaktstreifen einer alten 4,5-V-Flachbatterie, 12cm isolierten Schaltdraht, einige Reste 1 mm dicken Messingblechs sowie 4 und 5 mm dickes Hartpapier, ein Schraubenfeder, eine 3-V-Batterie 2 R 10, einen (käuflichen) Glühkopf.

Aus dem Dosenblech schneiden wir drei Stücke mit den Abmessungen 36 mm × 90 mm (Teil 1), 83 mm × 95 mm (Teil 2) und 86 mm × 30 mm (Teil 3) aus. Die Bleche rollen wir über entsprechenden Rundhölzern zu Rohren mit den Außendurchmessern 10 mm (Teil 1), 25 mm (Teil 2) und 26 mm (Teil 3) und verlöten sie entlang der Mantellinie. Die Lötnaht wird nach Bild 83 vorbereitet. Der Überlappungsbereich (an den Längsseiten) ist zu verzinnen. Damit die Lötnaht möglichst flach wird, drücken wir beim Erwärmen (mit dem LötKolben)

leicht mit einem Holzstückchen darauf. Teil 3 muß sich bequem, aber ohne großes Spiel, auf Teil 2 schieben lassen.

Jetzt nehmen wir beide Glühlampenfassungen auseinander; die zentralen Verbindungsniete werden abgefeilt. Die eigentlichen Fassungskörper mit der Schraubfassung und den Isolierscheiben heben wir auf; alles übrige wird nicht benötigt. Die Fassung für Teil 1 montieren wir folgendermaßen:

Auf eine etwa 15 mm lange Halbrund- oder Linsenschraube M3 schieben wir (Bild 82) der Reihe nach die Isolierscheibe, den Fassungskörper (der nicht den Gewindenschaft der Schraube berühren darf!), eine zweite Isolierscheibe (etwa 8 mm Außendurchmesser) und schließlich eine Unterlegscheibe. Dieser Stapel wird mit einer Mutter M3 fest verschraubt. Dann folgen wieder eine Unterlegscheibe, die Drahtöse des Schaltdrahtes (abisoliert), erneut eine Unterlegscheibe und zuletzt die zweite Mutter M3.

Nun folgt eine erste *Teilfunktionsprobe*: Glühlämpchen einschrauben und Spannung anlegen (ein Pol an Draht, der andere an Fassungskörper). Leuchtet das Lämpchen auf, kann die Fassung oben in das 10-mm-Rohr (Teil 1) eingelötet werden. Der Draht wird nun auch am freien Ende abisoliert.

Als nächstes zerlegen wir die durchgebrannte Glühlampe: Wir wickeln den Glaskolben in ein Tuch und zerschlagen ihn vorsichtig mit einem kleinen Hammer, entfernen Glasreste und Kitt aus dem Sockel und löten zum Schluß die beiden Drähtchen ab (einer ist an den oberen Sockelrand angelötet, der andere läßt sich herausziehen, wenn die zentrale Lötstelle des Sockels mit der Spitze des LötKolbens erwärmt wird). In diese Lötstelle muß nun das aus dem 10-mm-Rohr herausragende, abisolierte Ende des Schaltdrahtes eingefädelt werden; dazu wird die Lötstelle wieder erwärmt. Den Lampensockel schieben wir dann etwa 3 mm in das Rohr (Teil 1) hinein und verlöten ihn mit diesem. Nun kneifen wir das überstehende Drahtende ab und löten den noch aus dem Sockel herausragenden Draht an diesen an. Einige Feilstriche lassen zum Schluß die Spitze verschwinden.

Zweite Teilfunktionsprobe: Glühlämpchen in Fassung einschrauben; Spannung an unten eingelöteten Sockel anlegen. Anschließend das Rohr mit feinem Schmirgelpapier schön gleichmäßig blankpolieren und mit etwas Nähmaschinenöl zum Schutz gegen Rost leicht einfetten.

Für das Teil 2 montieren wir die zweite Fassung wie die erste, nur mit einem Zusatz: Zwischen Fassungskörper und zweiter Isolierscheibe liegt eine Messingscheibe (etwa 1 mm dick) mit einer 6-mm-Bohrung und 20 mm Außendurchmesser. Damit der Schraubenschaft weder Fassungskörper noch Messingscheibe berührt, umwickeln wir den Schaft unmittelbar am Kopfende etwa 3 mm mit Isolierband. Zwei Schrauben M3 halten das Ganze zusammen.

Dritte Funktionsprobe: Wir schrauben Teil 1 mit Glühlampe in die Fassung und legen Spannung an die untere Fassung; ist alles in Ordnung, schrauben wir Teil 1 wieder heraus.

Gegenüber der Lötnaht von Teil 2 arbeiten wir, 8 mm vom oberen Rand entfernt, ein rechteckiges Langloch parallel zur Mantellinie ein (5 mm breit und 12 mm lang). Am besten geht das, wenn wir in das Rohr (Teil 2) ein straff sitzendes Holzstück einschieben und drei 4-mm-Löcher bohren. Anschließend ist noch, 35 mm vom oberen Rand entfernt, ein 3-mm-Loch auf derselben Mantellinie zu bohren. Nach Entfernen der Holzfüllung feilen wir mit einer feinen Nadelfeile die Zwischenräume zwischen den drei 4-mm-Bohrungen weg und vergrößern den Durchbruch auf die erforderliche Größe.

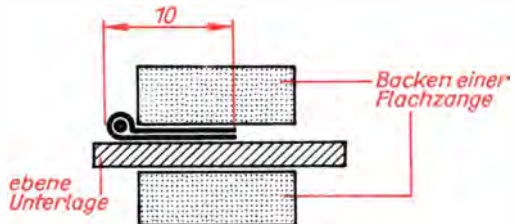
Den *Tastenschalter-Kontakt* fertigen wir aus dem Kontaktstreifen einer Flachbatterie. Wir schneiden ihn auf 35 mm Länge und bohren 7 mm von einem Ende entfernt ein 3-mm-Loch. Damit er die richtige mechanische Vorspannung erhält, biegen wir ihn in der Mitte bis zu einem Winkel von etwa 160°.

Zum Festhalten der *Gehäusekappe* (Teil 3) dienen ein aus Büroklammern gebogener Drahtbügel und ein Drahthaken (Bild 84); beide Enden des Drahtbügels verlöten wir miteinander. Als lockere Führung des Bügels biegen wir aus einem 5 mm breiten Dosenblechstreifen nach Bild 85 eine Lasche. Sie wird nach dem Biegen auf 10 mm Länge verkürzt und erhält genau in der Mitte eine 3-mm-Bohrung. Jetzt werden die Lasche mit Bügel und der Schalter-



Bild 84. Bügel und Haken des Verschlusses

Bild 85. So biegen wir die Lasche um den kurzen Schenkel des Bügels



kontakt gemeinsam mit einer Schraube und Mutter M3 an Teil 2 angeschraubt. Der Schalterkontakt muß wegen seiner Krümmung von innen fest an das Rohr angedrückt werden.

Aus 5 mm dickem Hartpapier fertigen wir nun eine Scheibe mit mittiger 10-mm-Bohrung und etwa 25 mm Außendurchmesser und passen sie in das Rohr (Teil 2) ein; die untere Fassung muß durch die Bohrung gleiten können. Anschließend benötigen wir noch eine 4 mm dicke Scheibe aus Hartpapier mit 16 mm Außendurchmesser und mit einer mittigen Bohrung wie bei der ersten Scheibe. Aus dem gleichen Werkstoff stellen wir auch den *Druckknopf* (10 mm × 6 mm) für den Drucktasten-Schalter her. Beide Scheiben werden mit Zweikomponentenkleber auf die Fassung geklebt. Am besten rühren wir den Kleber (Kunstharz und Härter in Tuben) auf einem Dia-Gläschen mit einem Streichholz an. *Vorsicht, den Kleber nicht mit der Haut berühren; Giftwirkung!* Den Druckknopf des Tastenschalters kleben wir durch den Gehäusedurchbruch in Teil 2 auf den Schalterkontakt. Der Klebstoff braucht bei Zimmertemperatur etwa 24 Stunden zum Aushärten.

Zum Teil 3: Auf die Mitte einer 1 mm dicken Messingscheibe von 30 mm Durchmesser löten wir eine Schraubenfeder mit vier bis fünf Windungen aus 1-mm-Federdraht (Außendurchmesser etwa 10...15 mm). Auf diese Scheibe wird das Rohr Teil 3 gelötet.

Nach dem Aushärten der Klebstellen rühren wir erneut Kleber an und kleben die Fassung in das Rohr Teil 2, so daß die obere Hartpapierscheibe bündig mit dem Rohrende abschließt. Auch diese Klebstelle muß 24 Stunden aushärten.

Zum Schluß setzen wir eine 3-V-Batterie 2 R 10 in Teil 2 ein und schieben die Kappe Teil 3 bis zum Anschlag darüber. Dann lassen wir sie wieder 3...5 mm zurückgleiten; dadurch finden wir die Stelle, an die der Haken für den Drahtbügel an das Rohr Teil 3 zu löten ist.

Letzte *Funktionsprobe*: Mit eingesetzter Batterie und Glühlampe 3,8 V oder 6 V. Leuchtet das Lämpchen nicht auf, so prüfen wir noch einmal die Stromwege:

Pluspol: direkte Verbindung von Batterie zur Glühlampe;

Minuspol: von Batterie über Feder, Gehäusekappe, Haken, Drahtbügel, Teil 2, Schalterkontakt (Trennstelle), 20-mm-Messing-

scheibe als Gegenkontakt, Fassungskörper in Teil 2, Sockel in Teil 1, Teil 1, Fassung in Teil 1, Glühlampe (Sockel, außen).

Die 25-mm-Hartpapierscheibe hat also nicht nur eine mechanische, sondern auch eine elektrische Funktion zu erfüllen: Auftrennen des Minuspolweges zwischen Teil 2 und Teil 1.

Zum Schluß können wir die Kappe polieren; das Gehäuse wird mit Nitrolack gestrichen.

Stromwärme löst Schaltvorgänge aus

Wenn das Bügeleisen oder das Wasser im Durchlauferhitzer die »vorprogrammierte«, vorher eingestellte Temperatur erreicht hat, signalisiert eine Kontrollampe den Abschluß des Heizprozesses; in den Stromkreis ist ein wärmeempfindlicher Bimetallschalter (aus zwei verschiedenen Metallen) eingebaut.

Ein Thermoschalter entsteht

Das Wort »thermos« kommt aus dem Griechischen und bedeutet soviel wie warm, heiß; *Thermoschalter* hat also etwas mit Wärme zu tun. Einen solchen Schalter wollen wir herstellen. Dazu vernieten wir einen Streifen aus Eisenblech mit einem Streifen aus Aluminiumblech; beide erwärmen wir durch eine Wicklung aus Widerstandsdraht. Nun geschieht das gleiche, wie wenn wir eine Seite eines Papierblattes anfeuchten: Das Papier wölbt sich mit der feuchten Seite nach oben. Die obere Schicht des Papiers dehnt sich durch die Nässe aus; die trockene Schicht darunter nicht – und wird nach innen verbogen!

Bei unserem Schalter dehnen sich durch Einwirkung der Wärme zwar beide Streifen, aber in verschiedenem Maße. Aluminium dehnt sich fast doppelt so stark aus wie das Eisen und spielt nun die Rolle der feuchten Papierschicht: Es verbiegt das Eisen (das den Aluminiumstreifen gewissermaßen am Wachstum hindern will) nach innen. Es liegt nahe, diese Bewegung auszunutzen, um Kontakte zu schließen und zu öffnen. In der Praxis wird dieses Prinzip in wärmeabhängigen Schaltungen genutzt. Bild 86 zeigt die Gesamtansicht. Die Grundplatte ist aus Hartpapier (4...6 mm dick). Bild 87a ent-

Bild 86. Der ThermoSchalter

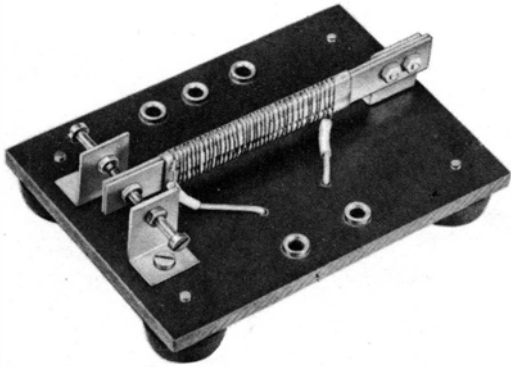
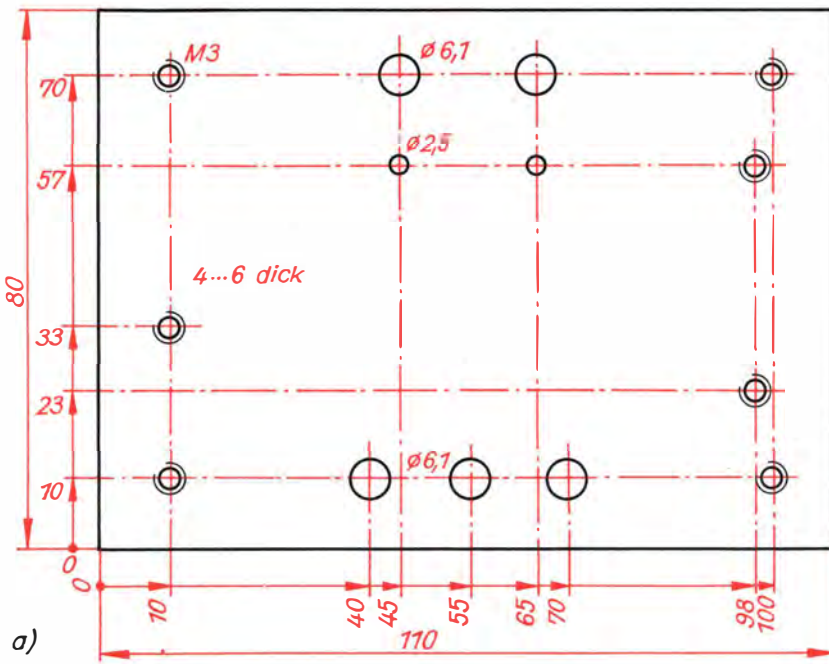
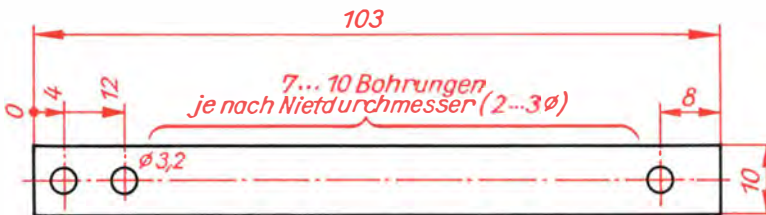


Bild 87. Grundplatte (a) und Bimetallstreifen (b) des ThermoSchalters



a)



b)

hält alle Maße, Bohrungen sowie Gewinde (sämtlich M3).

Wir schrauben an die Ecken vier Gummifüße und setzen in die fünf 6,1-mm-Bohrungen Telefonbuchsen ein. Die übrigbleibenden drei Gewindebohrungen sind für die Befestigungswinkel bestimmt. Die Bimetallstreifen (Bild 87b), einer aus *Eisenblech*, der andere aus *Aluminiumblech* (beide etwa 1 mm dick), werden geschnitten, gefeilt und sauber entgratet. Die Bohrungen an einem Ende dienen zum Befestigen auf dem Grundbrett (mit Hilfe eines Winkels); die eine Bohrung am anderen Ende soll den nach beiden Seiten vorstehenden Kontaktstift aufnehmen. Dazwischen werden auf etwa 70 mm Länge 7...10 Bohrungen in einer Reihe (immer in der Mitte, Längsrichtung) verteilt. Der Durchmesser soll 2...3 mm je nach dem Durchmesser der uns zur Verfügung stehenden Niete betragen. Wir müssen fest vernieten, denn die Ausdehnungskräfte sind groß! Die Niete müssen versenkt werden, damit die Oberfläche glatt genug ist, um die Wicklung aufnehmen zu können.

Die vernieteten Streifen werden mit wasserglasgetränktem Zeichenkarton umhüllt; darauf wird die *Heizwicklung* in einer Schicht von etwa 40 Windungen aus 1,20 m Konstantdraht (0,2 mm Durchmesser) sehr fest aufgebracht. Zwischen den Windungen des blanken Widerstandsdrahtes muß etwas Zwischenraum zum gegenseitigen Isolieren sein. Wer will, kann zu diesem Zweck einen Faden mitwickeln (so hat es Faraday noch gemacht, der keinen isolierten Leiter kannte).

Zwei der drei Haltewinkel werden nach Werkstattnorm N_6 (Bild 8) mit folgenden Maßen in mm angefertigt: $a = 13$; $b = 10$; $c = 16$; $d = 1$; $e_1 = e_2 = 3,1$; $f_1 = f_2 = 5$; $g_1 = g_2 = 8$ ($h_1 = h_2 = 0$). Diese beiden Haltewinkel sollen die Kontaktschrauben tragen. Der dritte – zum Befestigen des Bimetallstreifens – hat die gleichen Maße, aber statt der einen Bohrung e_1 (3,1 mm Durchmesser) im Abstand f_1 (5 mm) deren *zwei* nebeneinanderliegende von ebenfalls 3,1 mm Durchmesser; Abstand von den Kanten $g_1 = 4$ mm, Abstand der Bohrungen voneinander also $h_1 = 8$ mm.

Die *Kontaktschraube* für den Bimetallstreifen soll nach beiden Seiten Kontakt geben. Wir nehmen den Gewindeteil (Gewindebolzen einer Messingschraube M3 und feilen ihn an beiden Enden sauber rund. Diese Kontaktschraube wird mit zwei Muttern mit dem Bimetallstreifen (Bild 87b) ver-

schraubt. Die Messingkontakte müssen hin und wieder gesäubert werden.

Die Haltewinkel werden nun mit ihrer kleineren Fläche an der Grundplatte angeschraubt; der Bimetallstreifen wird an seinem Winkel mit zwei Schrauben befestigt und dann ausgerichtet. Die Schaltungen der folgenden Versuche sind so dargestellt, daß der Eisenstreifen nach den drei Buchsen 3, 4 und 5 zu liegt; zum Versuch 3 ist angegeben, wie bei umgekehrter Lage der Streifen die Schaltung geändert wird.

Die *Kontaktschrauben* für die beiden anderen Winkel (mit einer Bohrung oben) werden – wie die des Bimetallstreifens – aus einer Messingschraube M3 hergestellt; aber jetzt lassen wir den Kopf an der Schraube und feilen den Gewindebolzen nur an seinem Ende zu einer Spitze an. Wenn möglich, vergrößern wir sogar den Schraubkopf-Durchmesser durch eine (am besten gerändelte) Scheibe oder wenigstens durch einen kleinen Metallstab, den wir anlöten. Je größer der Durchmesser ist, um so leichter können wir den Abstand einstellen – und es kommt dabei auf einige hundertstel Millimeter an! Die Kontaktschrauben werden mit je zwei Muttern an ihrem Winkel festgestellt. Je eine der Muttern wird vor der Winkelbohrung festgelötet (an der Kontaktseite). Die zweiten Muttern stellen als Gegenmutter an der anderen Seite der Winkel die Kontaktschrauben fest.

Der Streifenkontakt der Aluminiumseite soll mit leichtem Druck am Winkelkontakt anliegen. In dieser Lage soll zwischen dem Streifenkontakt der Eisenseite und dem anderen Winkelkontakt ein Luftspalt von etwa 0,1 mm sein! Wir stellen ihn mit Hilfe von Zeichenpapier ein (von mehreren Lagen Papier übereinander die Dicke mit Meßschieber messen; durch Anzahl der Lagen teilen – und wir haben die Dicke einer Lage mit ausreichender Genauigkeit).

Zum Schluß wird alles verdrahtet (Bild 88a); die Heizwicklung an das Buchsenpaar 1–2; der Bimetallstreifen wird mit der mittleren (4) der drei Buchsen (3, 4, 5) verbunden, die beiden Winkelkontakte mit den Buchsen links und rechts davon. Damit ist der Thermoschalter fertig. Dieser Schalter ist eigentlich auch ein Relais, das einen zweiten Stromkreis schaltet. Unser Thermoschaltrelais arbeitet aber aus gutem Grund mit Wärme. Es soll *langsam* reagieren und in einem bestimmten Zeitrhythmus ein-, aus- oder umschalten. Es ist also

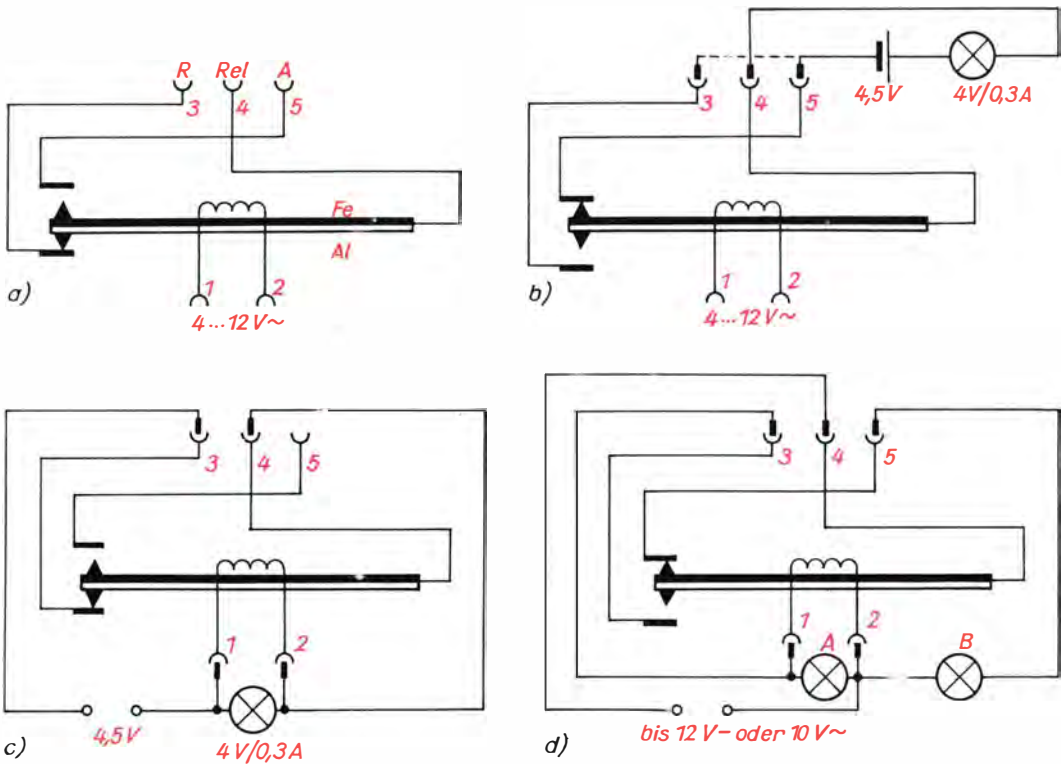


Bild 88. Thermo­schalter: a) Verdrahtung der Anschlüsse, b) als Ein- und Ausschalter, c) als Blinkrelais, d) als selbsttätiger Umschalter

ein *Zeitschalter*. Wir können ihn nicht nur für eine Blinkanlage, sondern auch zum selbsttätigen abwechselnden Einschalten zweier Glühlampen benutzen und damit verblüffende Wirkungen erzielen (etwa mit verschiedenen Farben oder Leuchtschriften). Wir wollen das im Experiment prüfen.

Experimente mit dem Thermo­schalter

Versuch 1:

Thermo­schalter als Ein- und Ausschalter. Wir schalten nach Bild 88b. Den Heizstrom für den Thermo­schalter (primärer Stromkreis) entnehmen wir der Schalttafel (4...12V ~). Für den sekundären Stromkreis mit einer Glühlampe 4V/0,3A benutzen wir eine Taschenlampen­batterie 4,5V. Wir können aber auch hierfür die passende Spannung

unmittelbar vom Transformator unserer Schalttafel abnehmen, möglichst in einem Bereich, der für den Heizstrom nicht benutzt wird. Dabei müssen wir freilich besonders vorsichtig sein, denn in diesem Fall fließt der Strom nicht mehr über die Sicherung S_{i3} !

Dieser Versuch ist ein Vorversuch, um die *Arbeitsweise* des Thermo­schalters zu zeigen. Wir sehen: Beim Erwärmen schaltet er den gestrichelten Stromweg über Buchse 3 aus und statt dessen den über Buchse 5 ein; beim Abkühlen verläuft der Vorgang umgekehrt. Die Glühlampe wird also abwechselnd über zwei Leitungen gespeist. Es zeigt sich auch, wie genau und sorgfältig wir die Kontakte auf kleinste Zwischenräume einstellen müssen. Wir prüfen, bei welcher Spannung (und Stromstärke) der Thermo­schalter sicher anspricht; er soll nicht mehr als 10V Wechsel- oder 12V Gleichspannung und etwa 0,5A beanspruchen.

Versuch 2:

Thermo­schalter als Blinkrelais. Wir schalten nach

Bild 88c. Bei der Wahl der Spannung müssen wir auf die der Glühlampe achten, die nicht durchbrennen soll (also nötigenfalls 12-V-Glühlampen benutzen).

Versuch 3:

Thermoschalter als selbsttätiger Umschalter. Wir verfolgen die Stromläufe im Bild 88d und stellen fest, daß (wie schon im Versuch 2) die Glühlampe A parallel zur Heizwicklung geschaltet ist. Die Heizung verbraucht den größten Teil des Stromes (Kirchhoffsches Gesetz), weil sie einen geringeren Widerstand als A hat. Das erste Anheizen dauert etwas länger; während des Betriebes wird etwa 2 Sekunden geheizt (A leuchtet) und etwa 5 Sekunden abgekühlt (B leuchtet); diese Werte können bei jedem anderen Modell anders sein. Es kommt auch darauf an, wie geschickt wir die Kontakte einstellen; die Bewegung der Bimetallkontakte ist nur sehr klein. Ist die Reihenfolge der Metalle vertauscht, liegt also Eisen zu den Buchsen 1 und 2 hin, so vertauschen wir in den Bildern entsprechend die Anschlüsse bei den Buchsen 3 und 5.

Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes ist die wichtigste

Als wir die elektrischen Maschinen und den Elektromagneten bauten, haben wir den *Elektromagnetismus* bereits ausgenutzt. Da wir mit der *Erzeugung* der elektrischen Energie begonnen hatten, ließ sich das nicht vermeiden. Damit ist schon eine gute Grundlage geschaffen; wir wollen – darauf aufbauend – nun eine Auswahl weiterer Anwendungen des Elektromagnetismus im Modell erleben.

Wir bauen einen Summer und eine Klingel

Klingel und Summer haben so viele gleiche Teile, daß es sich lohnt, beide zu bauen. Die Gesamtansicht von *Klingel* und *Summer* zeigen die Bilder

89 und 90; man sieht deutlich die Ähnlichkeit im Aufbau. Die *Grundplatte* besteht aus Hartpapier (4...6 mm dick) mit Bohrungen und Gewinden (Bild 91a); wir bauen zwei Stück davon. Ebenfalls doppelt bauen wir den Ankerwinkel (Bild 91b), der den Anker tragen soll, und den Kontaktwinkel (Bild 91c) für die Kontaktschraube. Es genügt Eisenblech (1 mm dick) – auch für den Spulenhaltewinkel, den wir zweifach nach Werkstattnorm N₆ (Bild 8) mit folgenden Maßen in mm anfertigen: $a = 24; b = 15; c = 26; d = 1; e_1 = 6$ und $e_2 = 4,2; f_1 = 12; f_2 = 8; g_1 = g_2 = 13$ (bei $h_1 = h_2 = 0$).

Auch die *Elektromagneten* sind gleich; es folgen daher je zweimal die Spule, der *Spulenkern* und der *Außenpol* (eine Besonderheit unserer Bauart, die einen starken magnetischen Kraftfluß sichert). Der aus Zeichenkarton oder Pappe (stets schellackgetränkt) bestehende *Rundspulenkörper* nach Werkstattnorm N₂ hat folgende Maße in mm: $a_1 = 24; a_2 = 10; a_3 = 8; c = 32; d = 1,5$. Er erhält (auf der Spulenvickelvorrichtung) 1000 Windungen CuL0,4 (Kupferlackdraht, 0,4 mm Durchmesser); nach je 3 Lagen sorgt ein schellackgetränkter Zeichenkarton für zusätzliche Isolation. Die beiden fertigen Spulen werden mit einem weiteren Streifen Zeichenkarton umwickelt, die Drahtenden durch Isolierschlauchstücke gesichert.

Die zwei Weicheisenkerne (Innenpole) stellen wir nach Werkstattnorm N₄ her. Die Abmessungen sind in mm: $a_1 = 8; a_2 : M6; b_1 = 40; b_2 = 33$. Die beiden Außenpole aus Weicheisenblech nach Werkstattnorm N₅ haben folgende Maße in mm: $a = 26; b = 33; c = 24; d = 1; e = 6; f = 13; g = 12$.

Zum Schluß fertigen wir Einzelstücke an, die für

Bild 90. Der elektrische Summer

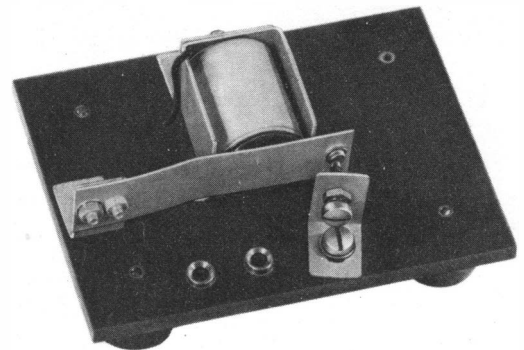


Bild 89. Die elektrische Klingel

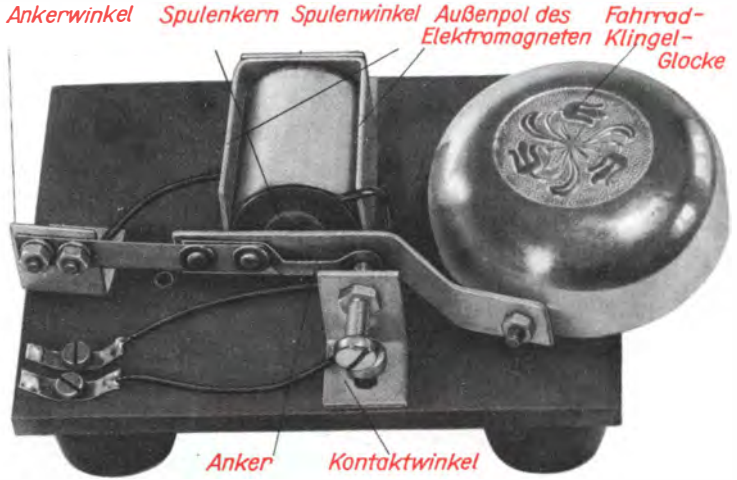
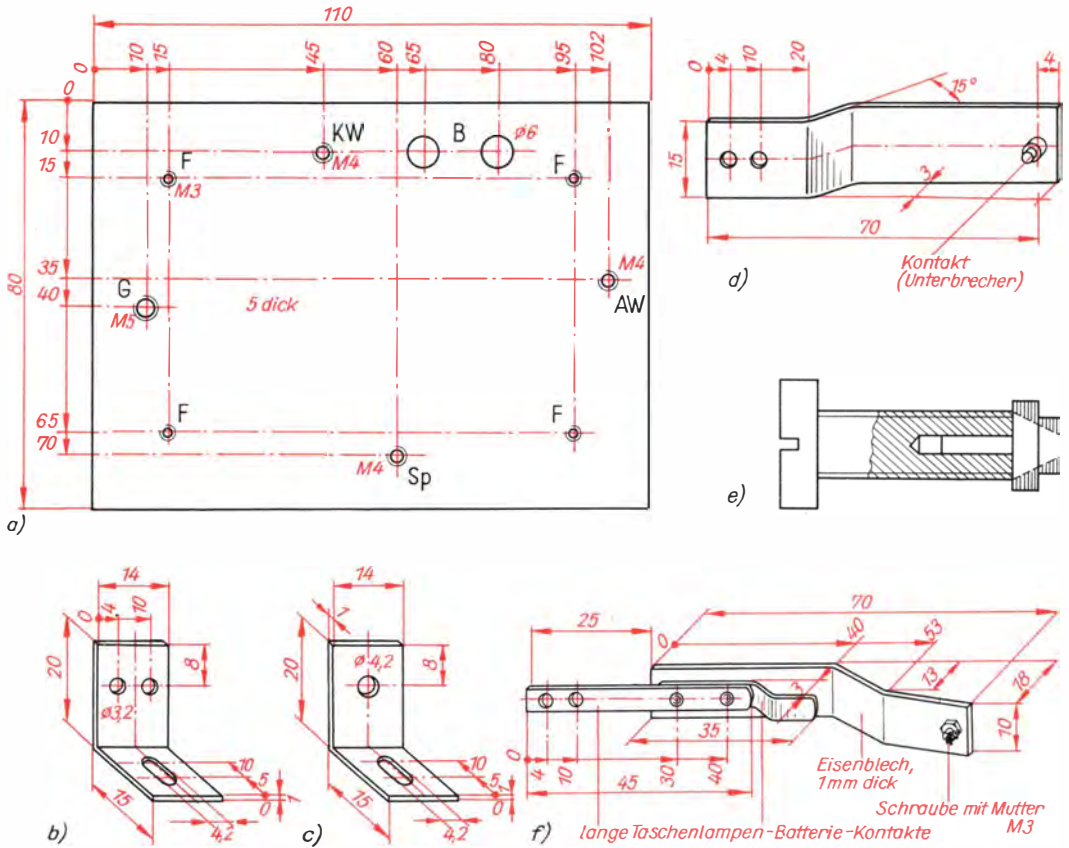


Bild 91. Bauteile für Klingel und Summer : a) Grundplatte : F Füße, AW Ankerwinkel, G Glocke, KW Kontaktwinkel, B Buchsen, Sp Spule, b) Ankerwinkel, c) Kontaktwinkel, d) Anker des Summers, e) Ankerkontakt des Summers, f) Anker der Klingel



Summer und Klingel verschieden sind: den *Anker* (die hin- und herbewegte Zunge) und die *Kontaktschraube*. Der Anker für den Summer wird nach Bild 91d aus federndem Stahlblech hergestellt, beispielsweise aus Band Eisen von Kistenverschlüssen. Der *Unterbrecherkontakt* muß bei dem Summer wegen seiner (im Vergleich zur Klingel) viel höheren Schwingungszahl unbedingt *funkensicher* sein. Wir müssen also in Anker und Schraube je ein schweroxydierendes Metallstückchen einnieten. Sehr gut eignen sich dafür alte Unterbrecherkontakte (Zündung!) von Kraftfahrzeugen. Der Ankerkontakt behält seine ganze Fläche; der Schraubenkontakt ist nach Bild 91e zuzuschleifen (die senkrecht gestrichelten Teile werden entfernt, so daß ein abgestumpfter Kegel entsteht).

Der *Anker der Klingel* braucht diese Kontakteinsätze nicht unbedingt; es wird aber gut sein, sie auch hier zu verwenden. Für bescheidenere Ansprüche genügt eine angespitzte Messingschraube M4. Der Anker (Bild 91f) besteht aus einem federnden und kontaktgebenden Teil aus Federmessingblech und dem Weicheisenteil, der vom Elektromagneten angezogen wird. Nehmen wir für den Messingteil lange Kontakte von Taschenlampenbatterien, so brauchen wir zwei davon. Alle drei Teile werden zweifach vernietet, die Niete nach dem Magneten zu versenkt. Die Schraube M3 am Ende des Klingelankers schlägt an die Glocke einer Fahrradklingel. Alle Eisenteile werden mit Aluminiumbronzestrichen.

Zusammenbau der Klingel

Gummifüße (F) und Grundplatte mit Schrauben M3 befestigen. Elektromagneten zusammensetzen (Spule muß fest auf dem Kern sitzen) und auf Grundplatte bei Sp mit Schraube M4 anschrauben.

Anker mit zwei Schrauben M3 und Muttern am Ankerwinkel anschrauben.

Winkel mit Schraube M4 auf Grundbrett (AW) befestigen.

Kontaktschraube mit zwei Muttern an ihrem Winkel einsetzen; diesen mit Schraube M4 auf Grundbrett (KW) anschrauben.

Der Anker wird durch Verschieben seines Winkels im Langloch zwischen Magneten und Schraubenkontakt richtig eingestellt; die Feder muß mit einem geringen Druck auf dem Kontakt liegen und

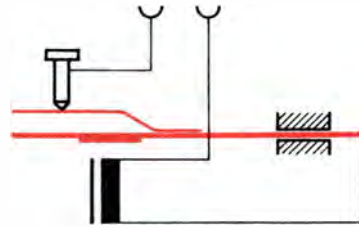


Bild 92. Schaltung von Klingel und Summer

sich beim »Rückzug« durch den Magneten vom Kontakt lösen. Die letzte Einstellung führen wir zum Schluß unter Spannung aus, zugleich nach dem Gehör; die größte Lautstärke wird mit der Kontaktschraube gesucht.

Telefonbuchsen einsetzen. Drahtenden mit Isolierschlauch überziehen und alles nach Bild 92 verdrahten.

Die Fahrradglocke (mit Gewinde M 4,5) schrauben wir entweder mit einer Schraube dieser Gewindegröße fest – dann muß G in der Grundplatte auch dieses Gewinde haben; oder wir bohren den Gewindeansatz der Glocke auf (4 mm Durchmesser) und schneiden Gewinde M5 ein.

Zusammenbau des Summers

Wie bei der Klingel – nur die Glocke entfällt. Auch hier müssen die Kontakte mit einem Druck aufeinanderliegen; wie stark er ist, prüfen wir im Betrieb. Der Summer soll einen gleichmäßigen Ton bei geringster Spannung (4V —) von sich geben. Eine Wechselfrequenz muß wegen des induktiven Widerstandes der Spule etwas höher sein; wir betreiben daher alle Elektromagneten mit Gleichstrom, wo es nur möglich ist.

Das elektromagnetische Relais ist ein Fernschalter

Mit einem irgendwoher – auch aus der Ferne – kommenden Stromstoß wird ein zweiter Stromkreis, der »Ortskreis«, ein- oder ausgeschaltet. Das ist der Sinn und Zweck des *Relais*. Das Wort kommt aus dem Französischen und bedeutete früher »Pferdewechsel«; auf der Relaisstation bekam die »Über-

landkutsche« frische Pferde. Im elektrischen Relais wird ein »frischer« Strom eingeschaltet, der nicht durch den Spannungsverlust einer Fernleitung geschwächt ist. Sehr häufig werden Relais benutzt, um stärkere Ströme mit Hilfe schwacher Ströme zu schalten. Sie spielen in der Leistungs- und Informationselektrik in den verschiedensten Bauarten eine sehr große Rolle; Beispiele sind die Schaltrelais mit Druckknöpfen zur Raumbelichtung und die Treppenhausbeleuchtung mit Zeitrelais. Wir werden das Relais unter anderem dazu benutzen, um unbesetzte Gegenstationen ein- und auszuschalten, beispielsweise beim Telegrafieren in ein anderes Zimmer. Es hat einen Kontakt mit zwei Stellungen: geschlossen und geöffnet. Bei jedem Stromstoß (Schaltimpuls) wird die Stellung verändert; sie bleibt stets bis zum nächsten Impuls bestehen.

Die Einzelteile des Relais

Bild 93 zeigt die Gesamtansicht. Zwei Teile sind zu unterscheiden: der *Magnetteil* mit zwei Apparatklemmen für den ankommenden Schaltstrom (Impuls) und der *Kontaktteil* mit zwei Klemmen für den (zu schaltenden) Ortskreis. Beide Teile sind nur durch einen Hebel verbunden, über den Impuls mechanisch auf die Kontaktsteuerung überträgt.

Wir beginnen wieder mit der *Grundplatte* (Bild 94) aus Hartpapier (4...6 mm dick). Die Buchstaben bei den Bohrungen und Gewinden deuten den Zweck an. Es folgt der *Elektromagnet*. Der Innenpol (Kern) aus Weicheisen nach Werkstattnorm N₄

(Bild 8) hat folgende Abmessungen in mm: $a_1 = 10$; $a_2 = M6$; $b_1 = 60$; $b_2 = 45$; der Außenpol aus Weicheisen nach N₅: $a = 43$; $b = 47,5$; $c = 35$; $d = 2,5$; $e = 6$; $f = 19$; $g = 17,5$. Aber dieser Außenpol hat noch eine Besonderheit: zwei Gewindebohrungen M3 im Abstand von 8 mm voneinander. Diese sind am rechten U-Schenkel (Bild 8) vorn oben, 5 mm von der Oberkante entfernt und so dicht wie möglich nach vorn (sozusagen ganz in der äußersten oberen Ecke) anzubringen und sollen das Ankerlager aufnehmen. Der Spulenkörper aus Zeichenkarton (Rohr) und Pappe (Seitenteile), alles schellackgetränkt, hat nach N₂ die Maße in mm: $a_1 = 37$, $a_2 = 12$, $a_3 = 10$; $c = 40$; $d = 2$. Er erhält auf der Wickelvorrichtung 1200 Windungen (CuL 0,50). Drahtenden sichern; die Spule in üblicher Weise durch Schellackpapier abschließen! Diese drei Teile setzen wir zusammen; Innen- und Außenpol müssen genau in einer Ebene enden.

Nun einige wichtige kleine Teile nach Bild 95: Das schon erwähnte *Ankerlager* (Bild 95a) ist aus Messing (3 mm dick). Mit den kleinen Bohrungen wird es am Magnetaußenpol so angeschraubt, daß die 5,2-mm-Bohrung für die Ankerachse neben dem Pol liegt. Der *Haltewinkel* (Bild 95c) für den Magneten wird aus Weicheisen (2,5 mm dick) angefertigt; wir schrauben ihn gleich am Gewinde M6 des Innenpols an. Sein freier Schenkel verlängert (geometrisch) den untenliegenden U-Schenkel des Außenpols. Den (beweglichen) *Anker* bauen wir nach Bild 95d aus 2,5 mm dickem Weicheisen. Seine beiden Schenkel bilden einen Winkel von 100°. Die Bohrungen am kurzen Schenkel sind für die Schrau-

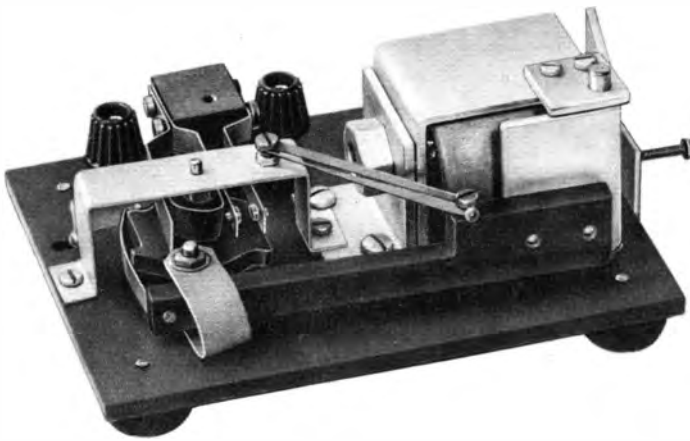


Bild 93. Unser Fernschaltrelais

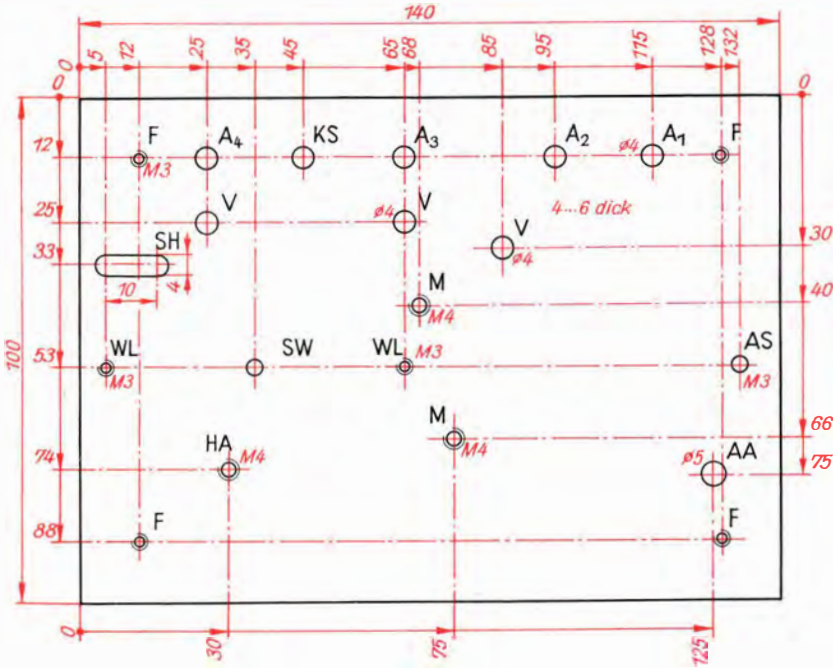
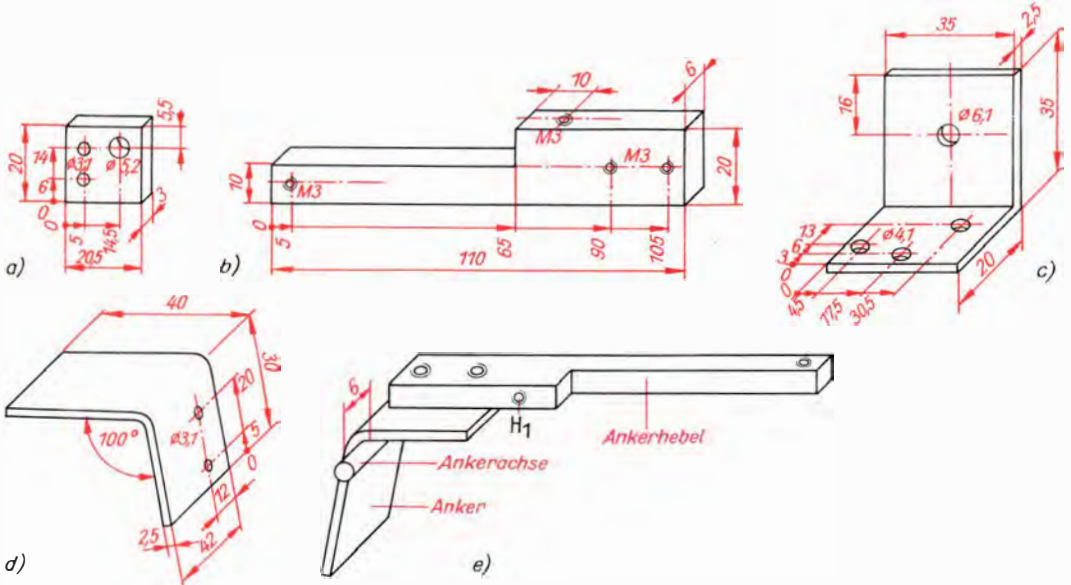


Bild 94. Grundplatte des Relais: F FüÙe, A₁ und A₂ Apparateklemmen für Impulsstrom, A₃ und A₄ für Ortsstrom, KS Kontaktstock, V Bohrungen zum Durchstecken der Verbindungsdrähte, SH Sperrhebel, WL Wellenlager, SW Schaltwelle, M Magnet, AS Ankersperre, AA Ankerachse, HA Hebelanschlag

Bild 95. Bauteile des Relais: a) Ankerlager, b) Ankerhebel, c) Haltewinkel, d) Anker, e) Zusammenbau von Anker und Ankerhebel



ben bestimmt, die den Ankerhebel (Bild 95b) halten. Die Ankerachse aus Messing oder Eisen ist 55 mm lang bei einem Durchmesser von 5 mm. Sie schmiegt sich in die Beuge im Winkel und wird dort angelötet; an beiden Enden ragt sie etwa 6 mm über den Winkel hinaus. Das untere Ende wird später (bei der Montage) in die Achsbohrung AA der Grundplatte und das obere in das Ankerlager am Außenpol gesteckt. Die Bewegung des Ankers wird begrenzt durch einen *Anschlag* aus Eisenblech in Winkelform. Seine Maße sind nach N_6 in mm: $a = 25$; $b = 18$; $c = 20$; $d = 2$; $e_1 = M3$; $e_2 = 3,1$; $f_1 = f_2 = 8$; $g_1 = g_2 = 10$ (bei $h_1 = h_2 = 0$). Eine Schraube M3 gestattet, den größten Abstand des Ankers von den Polen genau einzustellen. Zum Anschlag gehört die Gewindebohrung AS (Ankersperre) in der Grundplatte.

Elektromagnet und Anker wandeln die eingespeiste elektrische Energie in mechanische um, der *Anker-(Schalt-)Hebel* überträgt diese auf das Schaltwerk, wo die elektrische Energie des Ortskreises gesteuert wird. Der Hebel ist also das verbindende Glied zwischen den beiden Teilen unseres Relais. Wir bauen ihn aus Hartpapier (6 mm dick) und verschrauben ihn mit dem kurzen Ankerschenkel (Bild 95e), und zwar von innen, vom Schenkel aus – mit versenkten Schrauben. Bei H_1 wird eine Halteschraube für eine Schraubenfeder oder einen Schnips Gummi zum Rückholen des Hebels eingesetzt. Am schmalen Ende ist der *Mitnehmer* für das Schaltrad angebracht.

Diesen Mitnehmer bauen wir nach Bild 96a aus Federmessing (0,5 mm dick), beispielsweise aus Kontaktstreifen alter Taschenlampenbatterien. Er wird so angeschraubt, daß er sich in der Waagerechten bewegt. Nun fertigen wir auch gleich das Gegenstück zum Mitnehmer an: den *Sperrhebel* nach Bild 96b, ebenfalls aus diesem Federmessing. Der Mitnehmer soll das Schaltrad bewegen; der Sperrhebel sorgt dafür, daß der in seine Ausgangsstellung zurückgleitende Mitnehmer nicht das Schaltrad zurückschiebt. Der Sperrhebel, der sich, wie alle beweglichen Teile des Schalters, ebenfalls in der Waagerechten bewegt, wird am rundgebogenen Ende mit einer Schraube M3 verlötet; Bild 96c zeigt, wie die Befestigung im Langloch SH der Grundplatte gedacht ist, damit er sich nicht drehen kann.

Das *Schaltrad* aus 6 mm dickem Hartpapier (Bild 97a) verwandelt die Hin- und Herbewegung des

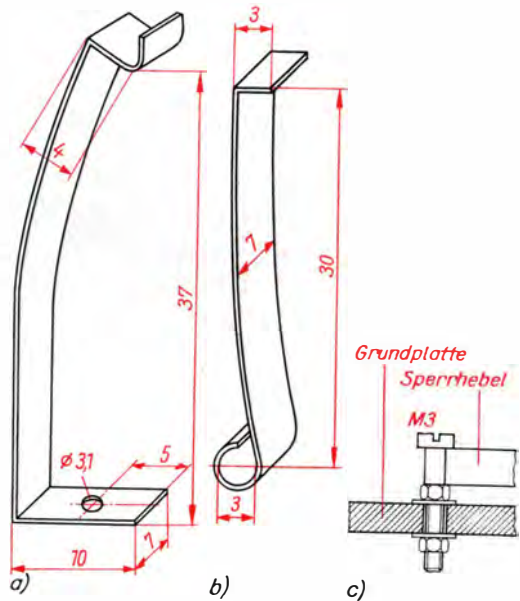
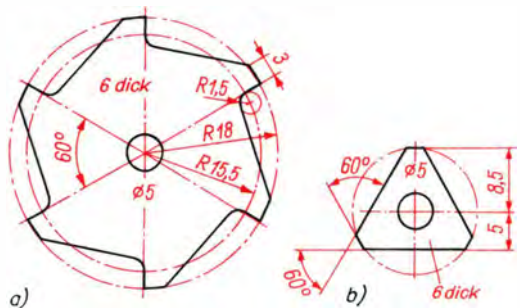


Bild 96. Mitnehmer (a), Sperrhebel (b) und Befestigung des Sperrhebels (c)

Bild 97. Schaltrad (a) und Nockenrad (b)



Ankerhebels in eine Drehbewegung. Das mit dem Schaltrad starr auf einer Welle verbundene Nockenrad bewegt wiederum die Kontaktfedern hin und her. Dieser scheinbare Umweg ist leider nicht zu vermeiden, weil die Drehbewegung in Stufen vor sich gehen muß. Wenn wir Bild 97a betrachten, können wir uns das leicht vorstellen: Der Mitnehmer greift von links hinter die gerade bereitstehende Nase des Schaltrades und zieht sie entgegen dem Uhrzeigersinn vor; dann sperrt der senkrecht zum Mitnehmer liegende Sperrhebel sofort die über-

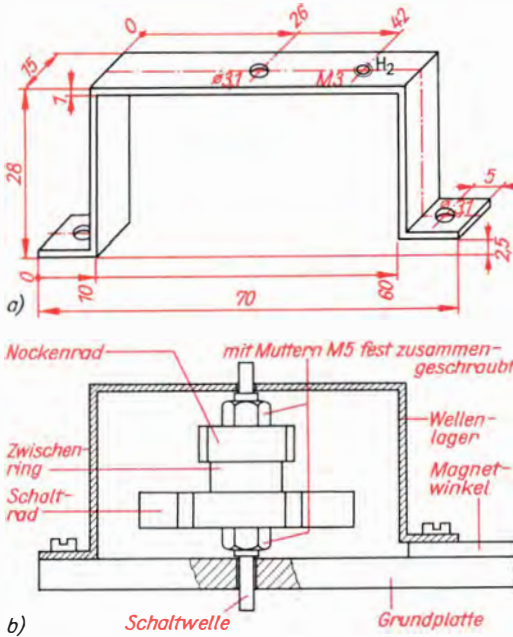


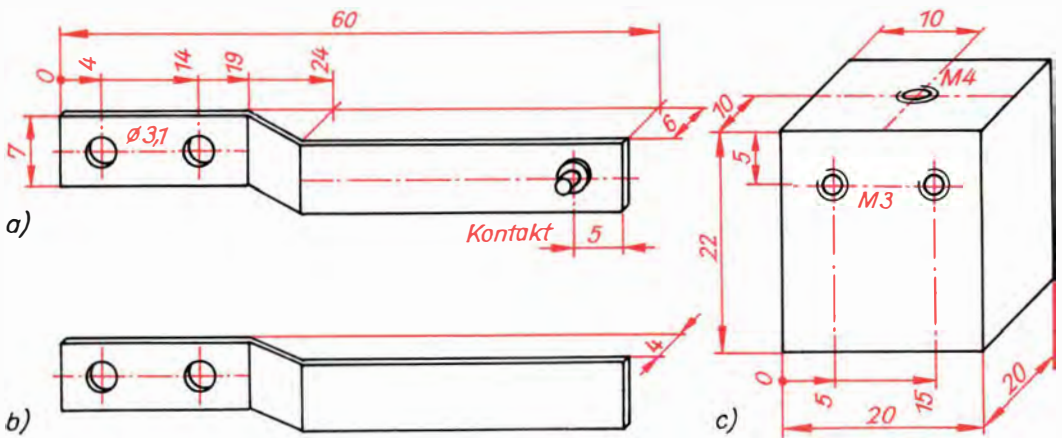
Bild 98. So sind die Schalträder angeordnet: a) Schaltwellenlager, b) vollständige Schaltwelle im Lager

nächste Nase rechts gegen das Zurückrutschen. Die Nase zwischen der »mitgenommenen« und der gesperrten Nase steht dann dem Mitnehmer für den nächsten Schaltvorgang zur Verfügung. Freilich muß das Schaltrad – ebenso wie anschließend das Nockenrad – sauber ausgesägt, nachgefeilt und geschlichtet werden, bis jede Unebenheit beseitigt ist.

Das Nockenrad (Bild 97b) besteht ebenfalls aus 6 mm dickem Hartpapier. Hinzu kommt aus dem gleichen Werkstoff ein Zwischenring; Durchmesser innen 5 mm, außen 10 mm, Höhe 6 mm. Die drei zuletzt angefertigten Teile gehören zu einer Schaltwelle aus Messing oder Eisen (35 mm lang, 5 mm Durchmesser). Je 5 mm werden an beiden Enden auf 3 mm Durchmesser abgedreht oder abgefeilt; der Mittelteil erhält ein Gewinde M5. Auf diese Welle werden die drei Teile aufgesteckt, der Zwischenring in der Mitte und genau in der Mitte der Welle mit zwei Muttern festgeschraubt. Dabei ist es entscheidend, wie das Nockenrad im Verhältnis zum Schaltrad liegt: Die drei langen Seiten des Nockenrades müssen etwa parallel zu je einer langen Seite des Schaltrades liegen! Das Schaltrad wird später unten liegen, das Nockenrad oben, dazwischen der Ring; das untere Wellenende paßt in die Bohrung SW als Lager.

Jetzt fehlt noch das obere Wellenlager. Es wird nach Bild 98a aus 1 mm dickem Eisenblech hergestellt. Die eine Seite (die innere im Schalter) ist kürzer als die andere (äußere), weil sie auf dem Magnetwinkel aufsitzt. Um dessen Dicke ist sie daher verkürzt. Durch die beiden Bohrungen an den waagerechten Flanschen soll das Lager in den Ge-

Bild 99. Teile des Kontaktsatzes: a) Kontaktfeder, b) Bremsfeder, c) Kontaktstock



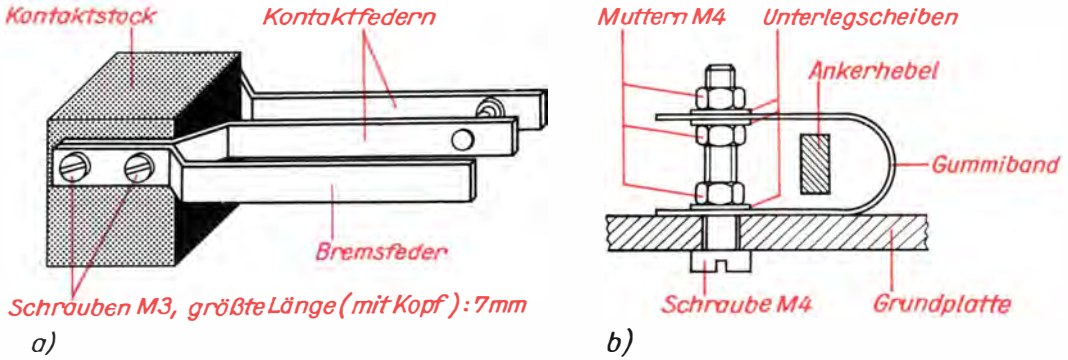


Bild 100. Anordnung der Relaisfedern am Kontaktstock (a) und Gummibremse (b) am Ankerhebel

winden WL der Grundplatte befestigt werden. Das Gewinde H₂ erhält die zweite Halteschraube für die Rückholfeder (oder den Schnipsgummi) zum Ankerhebel. Bild 98b zeigt die Anordnung der Räder mit Welle und Lagern.

Das Nockenrad steuert den *Relaiskontakt*. Dieser besteht aus zwei Streifen Federmessing, 0,4 bis 0,5 mm dick (Bild 99a). Als Kontaktflächen können wir die Rundköpfe von zwei Messingschrauben anlöten – wenn wir nicht (wie beim Summer) hochwertige Kontakte verwenden wollen. Ein dritter, gleicher Federstreifen, aber ohne Kontakt (Bild 99b), dient als *Bremsfeder* für das Nockenrad – zur sauberen Schaltung des Kontaktes. Alle Federn werden an einem *Kontaktstock*, einem Block aus Hartpapier oder Hartholz (Bild 99c), angeschraubt (Bild 100a). Die Schrauben M3 dürfen (mit Kopf) höchstens 7 mm lang sein. Der Kontaktstock wird später an der Bohrung KS mit der Grundplatte verschraubt.

Eine unangenehme Erscheinung tritt beim Betrieb von solchen Schaltrelais manchmal auf: Wenn der Magnetanker durch den Stromimpuls in unmittelbarer Nähe der Magnetpole kommt, so wird er wegen des dort vorhandenen stärkeren magnetischen Kraftflusses stark beschleunigt angezogen. Das bewirkt bei der wegvergrößernden Übersetzung des Ankerhebels eine erhöhte Geschwindigkeit des Mitnehmers. Das Schaltrad erhält einen zu großen Drehimpuls; es dreht sich unerwünscht um eine »Nasenlänge« weiter, und das Nockenrad schaltet zweimal schnell hintereinander. Wir dürfen das

Schaltrad nicht bremsen, weil dann die Magnetkraft bei Beginn des Schaltvorganges nicht groß genug wäre. Eine Erhöhung der ankommenden Spannung bringt genauso wenig Hilfe. Aber es gibt einen Ausweg: Wir fangen den letzten Teil der Ankerbewegung mit einem dämpfenden Gummiband am Ankerhebende ab; dann liegt der Anker noch 1...2 mm vor den Polen. Wie das Gummiband (0,5 mm dick, 10 mm breit) den Hebel umfängt und an einer Schraube M4 befestigt wird (Grundplattenbohrung HA), ist aus Bild 100b ersichtlich. Die genau richtige Länge des Gummibandes kann man nur im Versuch feststellen; man kann von 8 cm ausgehen und dann bei den Prüfungen während und nach der Montage das Band verkürzen. Wir können nun mit der Montage beginnen.

Wir bauen das Relais zusammen

Da wir verschiedene Teile schon gruppenweise zusammengesetzt haben und ihre Plätze auf der Grundplatte kennen, ist die Montage nicht mehr schwierig; die Hauptsache ist nachher, die Einzelteile in ihrer Wirkungsweise miteinander zu verbinden und sie aufeinander einzustellen.

Zuerst befestigen wir in F die Gummifüße. Danach schrauben wir den Magneten mit seinem Winkel bei M und M mit Schrauben M4 an; dabei führen wir das untere Ende der Ankerachse in das Lagerloch AA und das obere in das Lagerloch des Ankerlagers (auf dem Außenpol) ein. Der Anker mit seinem Hebel muß leicht beweglich sein; sein längerer Schenkel soll an den Magnetpolen genau anliegen und diese miteinander verbinden, wenn wir

3...4 V — (aus der Schalttafel) an die Magnetwicklung legen. Die Drahtenden dieser Wicklung (in Isolierschläuchen) verbinden wir durch das nächstgelegene Loch (V) unter der Grundplatte mit zwei Apparateklemmen in A₁ und A₂.

Den Anschlagwinkel mit Stellschraube befestigen wir bei AS mit einer Schraube M3, so daß wir mit der Stellschraube das freie Spiel des Ankers begrenzen können. Der eine Schenkel wird *von unten* an die Grundplatte geschraubt, weil oberhalb kein Platz mehr ist; die Schraube darf daher (mit Kopf) nur 9 mm lang sein. Der Impulsteil ist damit fertig.

Jetzt können wir sehr bequem die Dämpfung mit dem Gummiband bei HA anbringen (Bild 100b). Die richtige Länge des Bandes können wir erst ganz am Schluß feststellen. Vom Schaltteil setzen wir zunächst die Schaltwelle in das Lagerloch SW, so daß das Schaltrad unten und das Nockenrad oben liegt; dann wird von oben das Wellenlager aufgesetzt und in WL und WL mit zwei Schrauben M3 verschraubt. Der Mitnehmer wird so gebogen, daß er leicht am Schaltrad vorbeigleitet, aber trotzdem sicher hinter der nächsten Nase einrastet (leichte Federspannung). Bewegt er sich nicht weit genug oder zu weit über die Nase hinaus (zum Schalthebel hin), so regeln wir das mit der Stellschraube am Ankersperrwinkel. Anschließend befestigen wir nach Bild 97a den Sperrhebel im Langloch SH senkrecht zum Mitnehmer. Wenn dieser hinter einer Nase des Schaltrades einhakt, dann muß der kleine Winkel des Sperrhebels ganz locker gerade hinter der nächsten Nase liegen. Die Nasen sollen in Schaltrichtung leicht an ihm vorbeilaufen; er federt dann zurück – aber er sperrt jeden Rückwärtslauf. Das Langloch erlaubt eine genaue Einstellung.

Zwischen den Schrauben H₁ und H₂ auf Ankerhebel und Wellenlager spannen wir eine Rückholfeder oder einen Schnipsgummi; der Ankerhebel muß dadurch nach jeder Schaltung gerade noch zuverlässig in seine Ausgangsstellung zurückgeholt werden. Zu straff gespannt bedeutet: Energieverlust am Hebel. Dann werden die Relaiskontakte mit ihrem Stock in KS an der Grundplatte angebracht und mit zwei Apparateklemmen A₃ und A₄ verbunden. Das Nockenrad muß zwischen der kontaktlosen Bremsfeder und der nächsten Kontaktfeder liegen.

Zum Einstellen des Kontaktes und der Bremsfeder drücken wir den äußeren, nicht an der Nocke

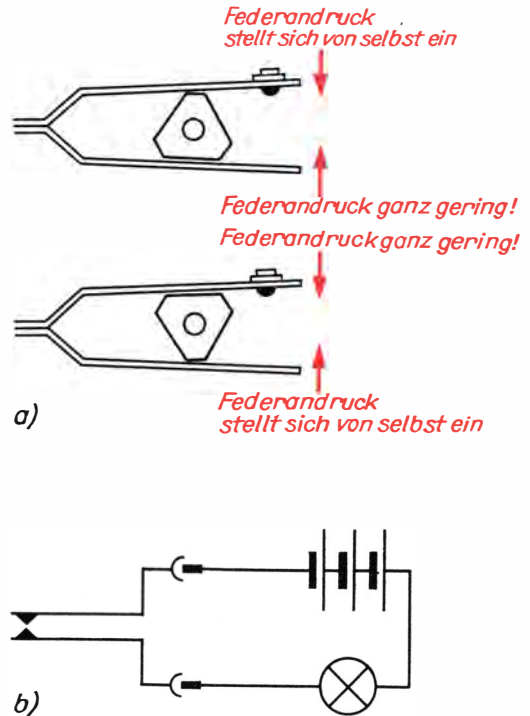


Bild 101. Wir stellen den richtigen Federandruck ein (a) und können dann einen Ortsstromkreis zur Endkontrolle schalten (b)

liegenden Federkontakt einige Millimeter zur Seite und biegen dann die andere Kontaktfeder und die Bremsfeder so, daß jede dieser Federn an der breiten Nockenseite (abwechselnd selbstverständlich) stets nur mit ganz geringer Federkraft anliegt. Dann erhält die jeweils an der kleinen Nocke liegende Feder von selbst die richtige Andruckstärke (Bild 101a).

Wir *prüfen* jetzt die Teile auf ihre Zusammenarbeit, indem wir kurzzeitig eine Gleichspannung von 6...7 V an den Magneten legen. Treten noch Unregelmäßigkeiten auf oder ist eine höhere Spannung (etwa 8 V) nötig, so beseitigen wir das durch vorsichtiges Nachbiegen der Federn. Funktioniert alles einwandfrei, biegen wir die zweite Kontaktfeder so weit zum anderen Kontakt hin, daß beim

Schalten ein sicheres Öffnen und Schließen gewährleistet ist; beim Schließen muß sich der äußere Kontakt um einige Zehntelmillimeter bewegen!

Zur *Endkontrolle* schalten wir an die Klemmen A_3 und A_4 einen Stromkreis aus Taschenlampen-

batterie und Glühlämpchen (Bild 101b); wir können nun das Lämpchen aus der Ferne – etwa mit Hilfe eines selbstgebauten Schalters – ein- und ausschalten. Unser Relais hat die Bewährungsprobe bestanden.

4. Kapitel

Informationen werden gewonnen

Messen und Prüfen

In Wissenschaft und Technik wird ständig geprüft und gemessen. Durch *Prüfen* stellt man einen Zustand oder Ablauf fest, beispielsweise ob sich ein Körper bewegt oder ob er stillsteht. Der Chemiker untersucht bei der *qualitativen Analyse*, ob bestimmte Elemente in einem Stoff vorhanden sind oder nicht. Wir prüfen, ob eine elektrische Leitung Spannung führt, ob ein Kondensator geladen ist oder nicht. Ein »Spannungsprüfer« (mit Glimmlampe) ist daher nicht in Volt geeicht.

Ganz anders verhält es sich, wenn wir wissen wollen, welche Geschwindigkeit ein bewegter Körper hat, wie hoch eine Spannung ist, welche Menge (Masse) der Elemente ein Stoff enthält; da müssen wir eine *quantitative* Untersuchung oder *Analyse* durchführen: eine *Messung*.

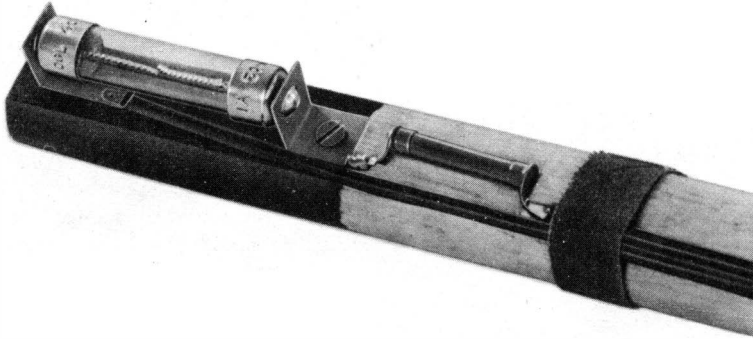
Prüfen ist also nur ein Nachweis des Vorhandenseins schlechthin; *Messen* bedeutet weit mehr und ist längst zu einer besonderen Wissenschaft (und Technik) geworden. Wir beginnen wieder mit dem Einfacheren, dem Nachweisen (Prüfen).

Wir weisen Spannungen mit dem Schwenkstab nach

Für diejenigen Leser, die noch kein passendes Prüfgerät für höhere Spannungen haben, und zugleich für eine Reihe sehr eindrucksvoller Experimente soll nun ein Gerät beschrieben werden, das leicht und einfach zu bauen ist: der *Glimmlicht-Schwenkstab* (Bild 102).

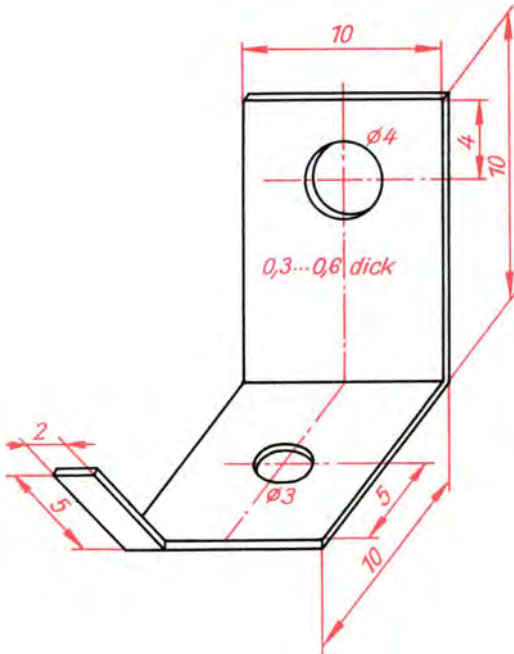
Ein 400 mm langer Holzstab (Stiel) von etwa 22 mm Durchmesser wird an einem Ende auf 115 mm Länge mit der Raspel bearbeitet und geglättet, so daß dort eine glatte Fläche (etwa 10 mm breit) entsteht. Dieses Ende wird schwarz gestrichen. Ganz außen auf der Fläche wird eine Soffitten-Glimmlampe (mit Drahtelektroden, s. Tabelle 2) mit zwei Klemmen aus rechtwinklig gebogenem Messingblech, 0,3 . . . 0,6 mm dick, sehr fest(!) eingeklemmt (Bild 103).

Davor, nach der Stabmitte zu, ist ein *Vorwiderstand* von etwa 100 k Ω anzulöten. Von dem freien Anschluß des Widerstandes und von der äußeren Klemme der Glimmröhre führt je ein Kabel (Litze) am Stab entlang (dort mit Isolierband befestigt) und noch etwa 800 mm frei darüber hinaus zu zwei



gut isolierten Bananensteckern (ohne außenliegende Klemmschraube). Die Glimmlampe muß so fest eingeklemmt werden, daß sie sich auch bei raschem Hin- und Herschwenken des Stabes nicht aus der Fassung löst. Das ist alles; bevor wir jedoch damit experimentieren können, brauchen wir noch einen Transformator, weil die Glimmlampe erst bei Spannungen über 50 V zündet.

Bild 103. Klemme zur Glimmlampenfassung



Zwischendurch entsteht ein Experimentier-Transformator

In der *Primärspule* (P) des Trafos erzeugt Wechselstrom ein entsprechend wechselndes Magnetfeld; dieses durchsetzt die Windungen der *Sekundärspule* (S) und erzeugt hier eine niedrigere oder höhere Wechselspannung gleicher Frequenz (Wechsel je Sekunde). Die Spannungen in den beiden Spulen (U_p und U_s) verhalten sich etwa wie deren Windungszahlen N_p und N_s zueinander, die Stromstärken (I_p und I_s) umgekehrt.

$$N_p : N_s = U_p : U_s = I_s : I_p.$$

Diese Gleichung ist nur für den (gedachten, aber technisch nicht vorhandenen) »idealen«, das heißt verlustlos arbeitenden, Transformator gültig.

Die Spulen können übereinander oder nebeneinander liegen; die Hauptsache ist, daß sie einen gemeinsamen *Kern* (aus geblechtem Weicheisen) haben. Die auch häufig verwendete Bezeichnung *Umspanner* ist übrigens genaugenommen richtiger, denn Transformator bedeutet »Umformer«. Wir wollen in unserem Zusammenhang jedoch den in der Technik gebräuchlicheren Begriff »Transformator« verwenden.

Der Aufbau des Transformators auf einer Grundplatte mit vier Anschlüssen geht aus den Bildern 104 und 105 hervor. Wenn die Primärspannung $U_p = 3\text{ V}$ und die Sekundärspannung $U_s = 75\text{ V}$ betragen soll und als primäre Windungszahl der praktisch erprobte Wert von $N_p = 180$ (abhängig vom Eisenquerschnitt) angesetzt wird, berechnen wir als »ideale« Windungszahl der Sekundärspule

$$N_s = N_p \cdot \frac{U_s}{U_p} = 180 \cdot \frac{75\text{ V}}{3\text{ V}} = 4500.$$

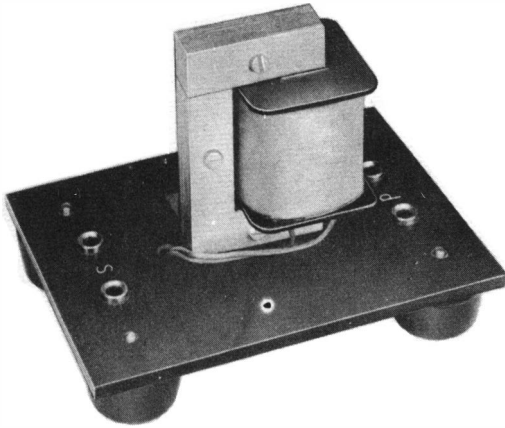


Bild 104. Unser Experimentiertransformator

Um stets auftretende Verluste beim Betrieb des »realen« Transformators auszugleichen, multiplizieren wir die ideale Windungszahl mit dem Faktor 1,2. Wir erhalten (und wickeln) dann also $1,2 \cdot 4500$ Windungen ≈ 5500 Windungen.

Bild 105 zeigt die Grundplatte aus 4...6 mm dickem Hartpapier. Die FüÙe setzen wir bei F und die Buchsen bei BP und BS sofort ein. Der kleine Befestigungswinkel wird aus Eisenblech nach unserer Norm N₆ angefertigt. Er hat folgende Maße in mm: $a = 10$; $b = 15$; $c = 30$; $d = 1$; $e_1 = e_2 = 3,5$; $f_1 = 5$; $f_2 = 7,5$; $g_1 = 15$; $g_2 = 5$; $h_1 = 0$; $h_2 = 20$.

Der Spulenkörper wird wie stets aus Pappe und Papier (schellackgetränkt) nach N₁ hergestellt; seine Maße in mm: $a_1 = b_1 = 34$; $a_2 = b_2 = 14,5$; $a_3 = b_3 = 12,5$; $c = 35$; $d = 1,5$. Der Kern wird aus Konservendosenblech nach N₇ geschnitten und lackiert: $a = 36$ mm, $b = 12$ mm. Die Dicke des Kernes ist entsprechend der Spulenöffnung (a_3 , b_3) 12 mm. Daraus errechnen wir leicht die Anzahl der Bleche. Den Abschluß bildet beiderseitig je ein Blech aus 1 mm dickem Weicheisen. Die Bleche noch nicht zusammensetzen; erst kommt die *Wicklung*: zunächst die Sekundärspule mit 5500 Windungen (CuL 0,15) wickeln; an die Drahtenden löten wir dickeren Draht (etwa 100 mm lang), um ein Abbrechen zu vermeiden. Dann die Windungen mit zwei bis drei Lagen Zeichenkarton umhüllen und mit Schellack tränken. Nach dem Trocknen die Primärspule auf den Zeichenkarton wickeln; 180 Windungen (CuL 0,5), Enden etwa 100 mm lang

sichern. Auch diese Wicklung wird mit Zeichenkarton umgeben und lackiert.

Nun schieben wir so viele Kernbleche wie möglich in die Spulenöffnung und setzen den Kern nach N₇ zusammen. Die Spule soll auf einer der beiden langen Seiten des Kernes sitzen. Die beiden Schmalseiten erhalten in der Mitte je eine 3,5-mm-Bohrung, unten zum Anschrauben an den Winkel, oben zum Zusammendrücken des Blechpaketes. Dann wird der Winkel mit der Grundplatte bei BW verschraubt. Die Spulenanschlüsse stecken wir durch die Bohrungen V und schrauben oder löten die Drahtenden der Primärspule an die Buchsen BP, die der Sekundärspule an die Buchsen BS. Wir wollen das Kennzeichnen der Buchsenpaare mit p und s nicht vergessen!

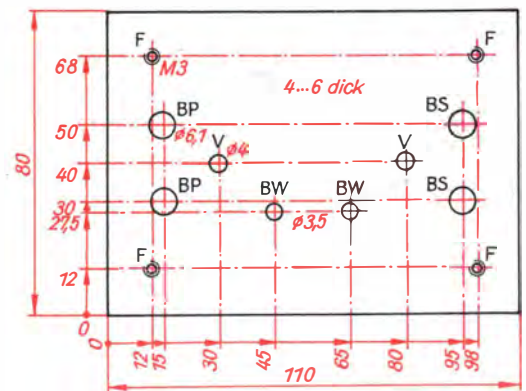
Schwenkstabversuche

Wir experimentieren jetzt erstmals mit Spannungen über 24 V und erinnern uns deshalb der bereits genannten Verhaltensregeln:

Niemals eine Schaltung unter Spannung ändern!

Auch bei kleinen Schaltungsänderungen erst alles abschalten! Kondensatoren halten oft noch lange ihre Spannung; also nach dem Abschalten eine Weile warten, ehe wir die Schaltung ändern! Wenn man es

Bild 105. Grundplatte des Transformators: F GummifüÙe, BW Befestigungswinkel des Kernes, BP Telefonbuchsen (Anschlüsse der Primärwicklung), BS Telefonbuchsen (Anschlüsse der Sekundärwicklung), V Verbindungsleitungen



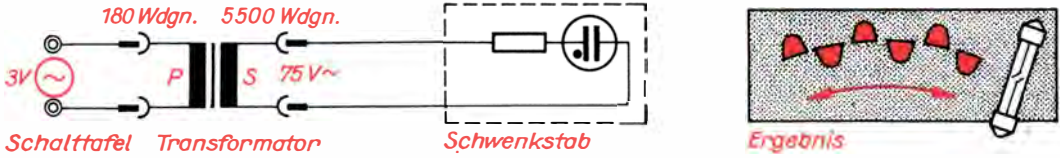


Bild 106. Nachweis der Wechselfspannung mit dem Schwenkstab

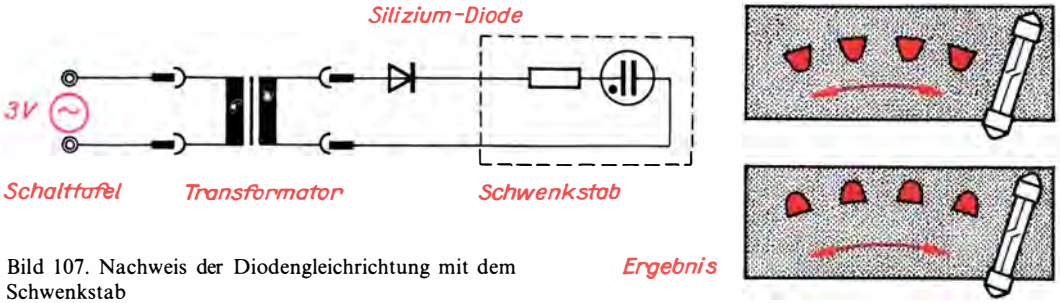


Bild 107. Nachweis der Diodengleichrichtung mit dem Schwenkstab

sehr eilig hat, muß man den Kondensator über einen Widerstand (etwa $1\text{ k}\Omega$) entladen.

Nachweis der Wechselfspannung

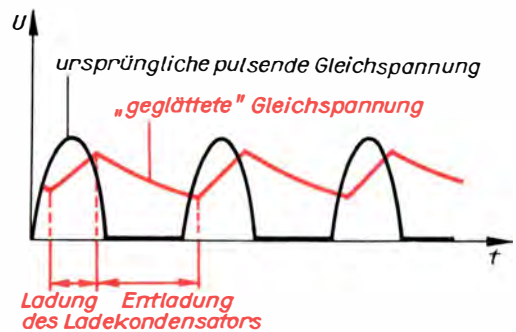
Bild 106 zeigt die Schaltung; der Schwenkstab liegt am Transformator, der an die Schalttafel angeschlossen ist. Wir verdunkeln das Zimmer, stellen am Spannungswähler der Tafel $3\text{ V} \sim$ ein und beobachten, wie die Glimmlampe aufleuchtet. Nun schwenken wir den Stab hin und her, mal schneller, mal langsamer. Dabei zeichnet sich in verblüffender Deutlichkeit die Sinuskurve der Wechselfspannung ab; um so breiter, je schneller wir schwenken.

Die Spannung bewirkt auf der jeweils negativen Elektrode eine *Glimmlichthülle*. Fünfzigmal je Sekunde leuchtet die eine Elektrode auf und ebensooft – immer abwechselnd – die andere. Die Länge dieser Glimmhüllen ist von der Spannung abhängig! Daher ergibt sich die Kurvenform, die ebenfalls im Bild 106 wiedergegeben ist.

Mit Diode und Schwenkstab (Gleichrichtung)

In der Schaltung (Bild 107) läßt die *Diode* als Ventil den Strom nur noch in *einer* der beiden Stromrichtungen durch. Die Wechselfspannung wird damit zu einer *pulsenden Gleichspannung*, wie sie im Bild 108 in ursprünglicher Form zu sehen ist. Nach dem Einschalten der Tafel zeigt sich beim Schwenken des Stabes eine Hälfte der Wechselfspannungskurve als pulsende (regelmäßig unterbrochene) Gleichspannung. Welche der beiden Elektroden glimmt, das hängt davon ab, in welcher Richtung wir den

Bild 108. Glättung der pulsenden Gleichspannung



Gleichstrom durch die Glimmlampe schicken; polen wir den Anschluß des Schwenkstabs (nach Abschalten) um und schalten wieder ein, so erhalten wir jedenfalls das umgekehrte Bild.

Die pulsende Gleichspannung wird geglättet

Zum Laden von Akkumulatoren würde der pulsende Gleichstrom durchaus genügen; zum Betrieb beispielsweise von Tonfrequenzverstärkern darf jedoch die Spannung (ebenso wie der Strom) keinesfalls ständig zwischen Null und einem Höchstwert schwanken. Sie muß »geglättet« werden. Diese Aufgabe erfüllt zunächst ein *Ladekondensator*.

Wir wissen, daß ein Kondensator nicht sofort nach dem Anlegen einer Gleichspannung diese Spannung durch Ladungsspeicherung annimmt, sondern daß er dazu – in Abhängigkeit von seiner Größe (Kapazität) – eine mehr oder weniger lange Zeit braucht. Das gleiche gilt für das Entladen eines Kondensators: Die Spannung am Kondensator sinkt nicht sofort im Augenblick des Abschaltens der Gleichspannung auf Null, sondern innerhalb einer gewissen Zeit. Den Anstieg und den Abfall der pulsenden Gleichspannung können wir, etwas vereinfacht, in diesem Sinne als »Anlegen einer Gleichspannung« und »Abschalten« betrachten (Bild 108).

Je größer die Kapazität des Kondensators ist, um so flacher verlaufen dessen Lade- und Entladekurven, und um so mehr wird die pulsende Gleichspannung geglättet. Durch das Nachschalten eines *Siebgliedes* aus Widerstand und Siebkondensator wird die Glättung noch weiter verbessert.

Wir versuchen es zunächst mit einem Kondensator von $0,1\mu\text{F}$ Kapazität, den wir nach Bild 109 einbauen. Das Ergebnis ist eindeutig: Die Spannung geht niemals auf Null zurück; die Spannungskurve wird flacher und nähert sich der Kurve einer »reinen« Gleichspannung. Beim Betrachten müssen wir beim Schwenken des Stabes während der Rückbewegung die Augen schließen. Das Rücklaufbild liegt symmetrisch zum anderen; beide decken einander nicht, und die Überlagerung macht das Bild undeutlich. Nach dem Ausschalten muß der Kondensator auf die bereits beschriebene Art entladen werden, wenn wir nicht »einen gewissen Krieg« wollen!

Besonders gut geglättet ist die Gleichspannungskurve noch nicht. Anscheinend war der Kondensator zu klein, um genügend Ladung zum Ausgleichen speichern zu können. Wir wechseln ihn gegen einen anderen von $1\mu\text{F}$ Kapazität aus: Das Ergebnis überzeugt; jetzt haben wir mit dem Schwenkstab eine gute Gleichspannung. (Am Schluß Entladen nicht vergessen!)

Der Schwenkstab an der elektrischen Maschine II

Wie wäre es, wenn wir die Wechselfspannung aus unserem »Kraftwerk«, der elektrischen Maschine II mit Doppel-T-Läufer und Schleifringen, über den Transformator an den Schwenkstab legen und sie auf diese Weise sichtbar machen? Aufgebaut wird das Experiment nach Bild 110: Erregerspannung 6 V —, 750 Windungen. Die Wechselfspannung wird an die Primärwicklung des Transformators gelegt; an die Sekundärwicklung ist der Schwenkstab anzu-

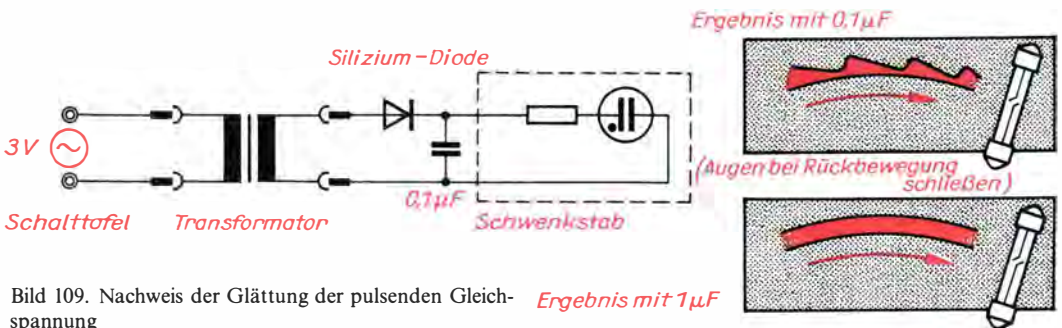


Bild 109. Nachweis der Glättung der pulsenden Gleichspannung

Ergebnis mit $1\mu\text{F}$

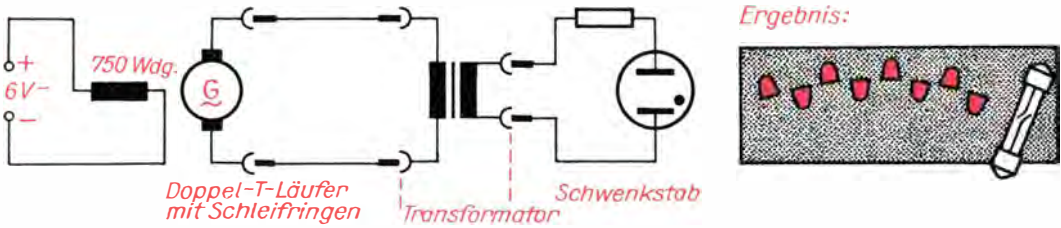


Bild 110. Nachweis der selbsterzeugten Wechselspannung

schließen. Wir beobachten eine schöne Wechselspannungskurve am geschwenkten Stab. Wir können den Versuch variieren, indem wir die *Drehzahl* der Maschine und damit die *Frequenz* des erzeugten Wechselstromes verändern.

Wir messen Ströme und Spannungen

Solange es Menschen gibt, solange wird auch gemessen – zuerst in überall greifbaren Maßeinheiten, die der eigene Körper und die Umwelt lieferten, wie Fuß, Spanne, Elle, Schritt, Steinwurf, Meile (= tausend Schritte). Nach einem ziemlichen Durcheinander in den Maßen begann man Ende des 18. Jahrhunderts, zunächst in die Längeneinheiten Ordnung zu bringen, und definierte das *Meter*. Mit den Fortschritten der Wissenschaft und Technik konnte (und mußte) man immer genauer messen – und diese Entwicklung geht weiter.

Messen ist stets Vergleichen einer unbekanntenen Größe mit einer bekannten, einem »Normal« oder einem Teil oder einem Vielfachen davon. Heute haben wir nur noch sieben *Basiseinheiten*, aus denen sich alle anderen Einheiten zusammensetzen lassen. Auch die Maßeinheit *Ampere* für den Strom hat eine solche Weiterentwicklung durchgemacht. Forscher, wie *Faraday*, *Gauß*, *Weber* und andere, haben sich um ihre Definition bemüht. Wieviel leichter haben wir es heute: »Das *Ampere* ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes durch

zwei geradlinige, parallele, unendlich lange Leiter der relativen Permeabilität 1 und von vernachlässigbarem Querschnitt, die einen Abstand von 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 (Newton) beträgt.«

Genügt das, lieber Leser? Die Definition ist auch mehr für die Physiker bestimmt. Immerhin sind wir damit wieder beim Elektromagnetismus gelandet und wollen Meßgeräte bauen, mit denen wir Strom und Spannung wirklich ganz leicht und schnell an ihren magnetischen Wirkungen messen können; beim *Eichen* verlassen wir uns auf vertrauenswürdige Vergleichsgeräte. Von den elektromagnetischen »Urformen« sei das Galvanoskop nur erwähnt; mit ihm kann man den Strom und seine Richtung nur nachweisen, aber nicht messen. Wir beginnen mit dem Galvanometer; das ist, wie der Name schon sagt, ein Gerät zum Messen – bei uns zum Messen sehr kleiner Spannungen und Ströme.

Das Galvanometer – unser erstes Meßgerät

Bei den Meßgeräten mit einem elektromagnetischen Meßsystem wirkt entweder ein Magnetfeld (anziehend oder abstoßend) auf Weicheisen ein, oder zwei getrennte Magnetfelder wirken aufeinander (ebenfalls anziehend oder abstoßend). Das eine dieser beiden Felder kann von einem Dauermagneten stammen; das zweite muß auf alle Fälle durch den zu messenden Strom in einer Spule erzeugt werden. Besonders sinnvoll erdacht sind die »elektrodynamischen« Meßgeräte, mit denen man die elektrische Leistung $P = U \cdot I$ mißt. In diesen *Leistungsmessern* ist eine Spule, die »Spannungsspule«, auf Spannung (parallel zur Spannungsquelle) geschaltet, die andere, die »Stromspule«, in Reihe in

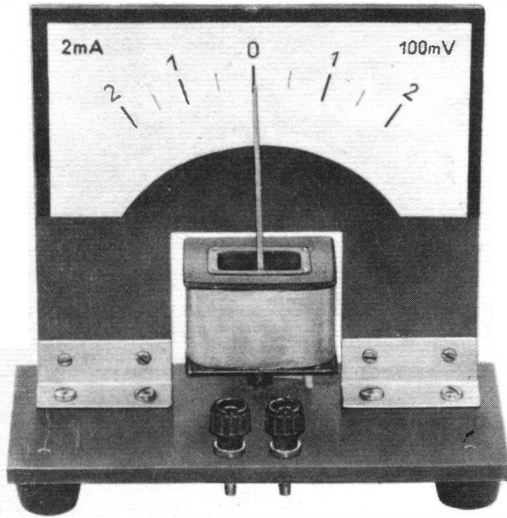
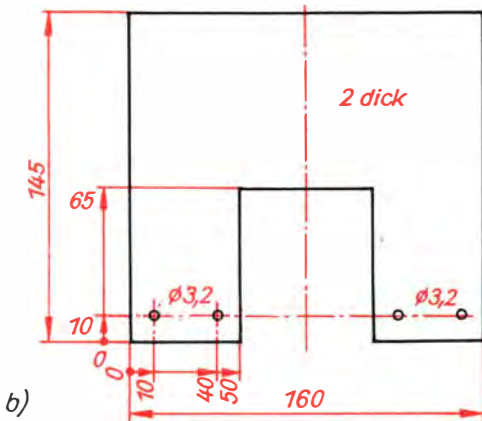
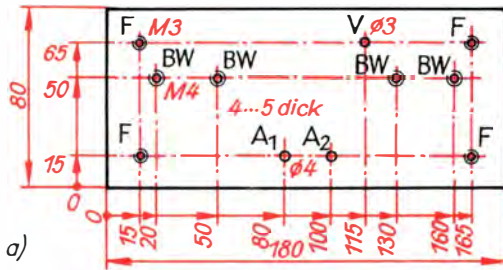


Bild 111. Ansicht unseres Galvanometers

Bild 112. Grundplatte (a) und Skalenplatte (b) des Galvanometers: F GummifüÙe, BW Befestigungswinkel zum Skalenbrett, A Apparatklemmen, V DurchlaÙ für Drahtenden der Spule zu den Klemmen



den Stromkreis gelegt. Auf diese Weise wirken beide Größen, Spannung und Stromstärke.

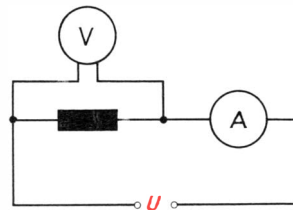
Das Galvanometer (Bild 111) hat als Hauptteil eine Spule, in der ein Dauermagnet drehbar gelagert ist. Auf das stets gleichstarke Dauermagnetfeld wirkt das Magnetfeld der Spule, das in seiner Stärke von der Höhe der angelegten Spannung sowie der Stärke des durchfließenden Stromes und in seiner Richtung von der Stromrichtung abhängig ist. Ein Zeiger vergrößert die Magnetbewegung; er steht vor einer geeichten Skale und ermöglicht dadurch das Ablesen der gemessenen Werte.

Wir beginnen mit der Grundplatte aus Hartpapier, 4...5 mm dick (Bild 112a). Die FüÙe werden angeschraubt (M3), die Apparatklemmen eingesetzt. Die beiden Befestigungswinkel für die Skalenplatte werden nach Werkstattnorm N₆ (Bild 8) aus Eisenblech mit folgenden MaÙen in Millimeter hergestellt: $a = b = 15$; $c = 50$; $d = 1$; $e_1 = 3,2$; $e_2 = 4,2$; $f_1 = f_2 = 7$; $g_1 = g_2 = 10$; $h_1 = h_2 = 30$. Die Skalenplatte (Bild 112b) sägen wir aus Hartpapier (2 mm dick) oder aus Sperrholz und befestigen sie mit zweimal zwei Schrauben M3 an ihren Winkeln.

Das MeÙsystem

Es besteht aus Spule und Magneten mit Zeiger. Der rechteckige Spulenkörper nach Werkstattnorm N₁ hat folgende MaÙe in mm: $a_1 = 55$; $a_2 = 36$; $a_3 = 32$; $b_1 = 45$; $b_2 = 26$; $b_3 = 22$; $c = 35$; $d = 2,5$. Eine Spulenkörperwand (später die obere) hat mitten auf den beiden 55 mm langen Seitenflächen je eine Bohrung von 3,2 mm Durchmesser. Die Bohrungen sind für zwei Senkkopfschrauben zum Befestigen der Magnetlager bestimmt und müssen daher vom Spulennern her aufgebohrt werden. Wir wickeln etwa 1200 Windungen (CuL 0,30) und prüfen, ob die Wicklung einen Widerstand von 50 Ω hat. Das geschieht entweder mit der Wheatstone-

Bild 113. Messen des Spulenwiderstandes



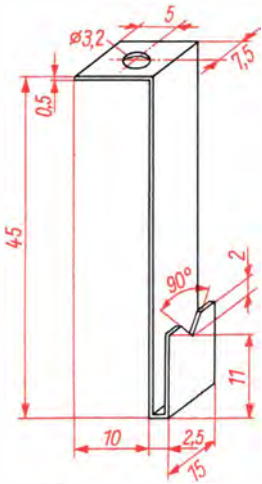


Bild 114. Lager des Drehmagnetsystems

schen Meßbrücke oder nach Bild 113: Der Spannungsabfall U und die Stromstärke I werden gleichzeitig gemessen; nach dem Ohmschen Gesetz wird dann der Widerstand berechnet.

Beispiel: $U = 4,5 \text{ V}$ am Spannungsmesser, $I = 90 \text{ mA}$ am Strommesser.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4,5 \text{ V}}{0,09 \text{ A}} = 50 \Omega.$$

Ist der Widerstand unserer Spule zu hoch, müssen wir entsprechend Windungen abnehmen; ist er zu niedrig, müssen wir noch zuwickeln. Wir wollen einen Meßbereich von 2 mA und 100 mV (je nach Schaltung) haben; deshalb muß der Spulenwiderstand $R = \frac{100 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = \frac{0,1 \text{ V}}{0,002 \text{ A}} = 50 \Omega$ sein. Die fertige Spule wird wie üblich mit schellackgetränktem Zeichenkarton abgeschlossen; die Drahtenden sind durch Isolierschläuche zu sichern.

Die beiden Magnetlager müssen nichtmagnetisierbar, also beispielsweise aus Messing sein: zwei Streifen Messingblech ($0,5 \text{ mm}$ dick) gebogen und bearbeitet nach Bild 114. Die beiden Kerben liegen in der Spulenöffnung einander gegenüber sie sind die Lager für die Magnetachse. Die waagerechten Teile mit der Bohrung liegen auf dem oberen Rand des Spulenkörpers und werden hier mit der schon erwähnten Senkkopfschraube und Mutter M3 festgeschraubt. Der lange Mittelteil der Streifen muß fest an der inneren Wand der Spule liegen. An die

langen Seiten des unteren Spulenrandes kleben wir mit Alleskleber zwei *Spulenböcke* aus Holz ($30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ groß), und zwar mit der $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ großen Seite. Sie halten die Spule in einer Höhe (des unteren Randes) von 20 mm . Bild 115 zeigt den Zusammenbau von Spule, Böcken, Lagern und Magneten.

Das *Drehmagnetsystem* (Bild 116) besteht aus vier vollen, runden keramischen Dauermagneten ($12,5$ bis 14 mm Durchmesser und je 6 mm dick), einem Stecknadelstück von 21 mm Länge als Achse, zwei Beilagscheiben und dem Zeiger. Die Magneten springen wieder (wie bei der elektrischen Maschine I) von selbst richtig zusammen. Wir trennen sie in zwei Hälften und kleben zunächst die zwei Magneten der beiden Hälften zusammen. Während sie trocknen, kneifen wir aus einer Stecknadel ein 21 mm langes Stück heraus (ohne Kopf und Spitze) und entgraten diese kleine Achse sorgfältig auf feinem

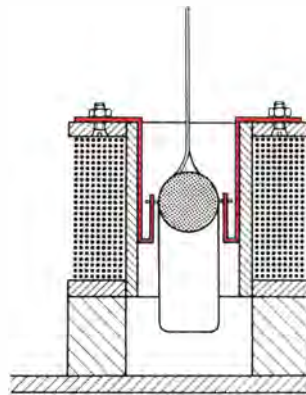


Bild 115. Schnitt durch das Galvanometer

Bild 116. Drehmagnetsystem



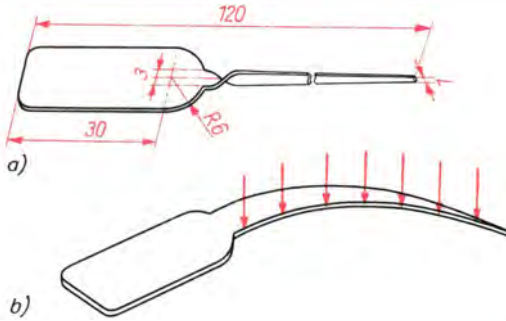


Bild 117. Vom »Türkensäbel« zum Zeiger: a) Maße des Zeigers, b) Richten des Zeigers durch leichte Hammerschläge

Schmirgelpapier oder einem Ölstein. Dann schneiden wir aus Konservendosenblech nach Bild 117a den *Zeiger*, verdrehen ihn oberhalb der Rundung um 90° und lackieren ihn am schmalen Ende 20 mm lang rot. Der breite untere Teil dient nicht nur als Rückstellgewicht sondern zugleich als Luftbremse zum Dämpfen der Zeigerbewegung. Wir wundern uns nicht, wenn sich der schmale Blechstreifen, der einmal Zeiger werden soll, beim Schneiden spiralförmig krümmt und der Schere allerlei »Schereereien« macht! Wir müssen ihn vorsichtig aufrollen; und wenn er dann mehr einem Türkensäbel als einem Zeiger gleicht, dann müssen wir die gestauchte (innere) Seite des verbogenen Streifens strecken, das heißt, mit einem leichten Hammer vorsichtig über die ganze Länge schlagen. Dann geht die Stauchung zurück, und der Säbel wird zum Zeiger (Bild 117b). Die Beilagscheiben sind 0,5 mm dicke, halbkreisförmige Eisenbleche (Radius 6 mm), an der geraden Seite um etwa 0,4 mm verkürzt. Sie sollen den Raum neben der Stecknadelachse ausfüllen und damit die Magnethälften und den Zeiger eng zusammenhalten.

Wir stellen die eine Magnethälfte auf, bestreichen die obere Kreisfläche mit Alleskleber (besser noch mit Zweikomponentenkleber), legen die Achse genau in die Mitte darauf und die Beilagscheiben neben die Achse. Achse und Scheiben müssen die Fläche gut ausfüllen; die Achse soll an beiden Seiten gleichweit herausragen. Darauf kommt wieder Kleber und dann – senkrecht zur Achse – der Zeiger, so daß seine 6-mm-Rundung gerade mit dem Magneten abschließt. Auf den Zeiger wird schließ-

lich die zweite Magnethälfte geklebt. und zwar so, wie die beiden Hälften vorher zusammenstrebten.

Nach dem Aushärten lassen wir den Drehmagneten vorsichtig in die Spule auf seine Lager gleiten und prüfen, ob er sich leicht bewegt. Er soll ausgewuchtet sein, also in jeder Lage stehenbleiben. Ist das der Fall, so tragen wir auf das untere, breite Ende des Zeigers etwas Lötzinn als Rückstell-Gewichtstück auf. Wieviel Lötzinn – das muß probiert werden; man kann das Gewicht immer noch ändern, wenn der Zeiger später zu schwach oder zu stark ausschlägt.

Zum Schluß führen wir das ganze Meßsystem so weit in (und so dicht vor) die Skalenplatte, daß der Zeiger in etwa 4 mm Abstand gleichmäßig vor ihr spielt; in dieser Stellung kleben wir die Spulenböcke auf der Grundplatte fest. Wenn wir dann noch die Spulendrahtenden durch die Bohrung V hindurchgeführt und mit den Apparateklammern verbunden haben, ist das Galvanometer zum *Eichen* fertig. Wir befestigen dazu mit Klammern einen Zeichenkarton an der Skalenplatte hinter der roten Zeigerspitze.

Abgleich der Meßwerkspule

Wir haben uns beim Wickeln der Spule bemüht, möglichst genau einen Widerstand von $R = 50 \Omega$ zu erreichen. Ob uns das gelungen ist, wird sich jetzt zeigen: Wir legen 100 mV an das Galvanometer und zugleich (parallel) an ein Vergleichsmeßgerät; der Meßpunkt wird auf unserer Skale gekennzeichnet. Nun schalten wir das Galvanometer mit einem Vergleichs-Strommesser in Reihe und schicken 2 mA durch beide. Steht der Zeiger des Galvanometers jetzt genau vor der Spannungskennzeichnung (100 mV), so hat unsere Spule tatsächlich genau 50Ω – ein gutes Ergebnis! Liegt der Zeigerausschlag beim Stromdurchfluß niedriger (links!) als beim Anlegen der Spannung, so ist der Spulenwiderstand etwas zu klein. Wir kennzeichnen den zweiten Ausschlag und schalten in Reihe zur Spule einen kleinen Widerstand (einige Ohm), legen wieder 100 mV an das Galvanometer und verändern den zusätzlichen Widerstand, bis der Wert 100 mV mit dem Zeigerausschlag für 2 mA zusammenfällt. Ist der 2-mA-Ausschlag größer (rechts!) als der 100-mV-Ausschlag, so ist der Spulenwiderstand zu groß. Wir legen dann einen großen Widerstand (im

k Ω -Bereich) parallel zur Spule; er muß so groß sein, daß der Stromausschlag mit dem 100-mV-Ausschlag zusammenfällt. Da jetzt die Höchstwerte von Spannung und Stromstärke übereinstimmen, brauchen wir die Gesamtskala nur noch nach Spannung oder nach Stromstärke zu eichen.

Auf *Spannung* (Bereich 100 mV) geeicht wird das Galvanometer, indem wir es parallel zu einem zuverlässigen (geliehenen) Vergleichs-Spannungsmesser des gleichen Bereiches schalten und nacheinander 25, 50, 75 und 100 mV anlegen. Die Zeigerstellungen werden mit Bleistift vermerkt. Dann wird die Gleichstromrichtung (ein Galvanometer ist nur für Gleichstrom verwendbar!) umgekehrt und in gleicher Weise gemessen und aufgezeichnet. Schließlich zeichnen und beschriften wir alles sauber mit Tusche im richtigen Bogen ($r = 90$ mm), so wie es im Bild 111 zu sehen ist. Die Skale ist – wie bei allen Systemen mit zwei Magnetfeldern – mehr oder weniger *linear*; das heißt, die Ausschläge wachsen ziemlich gleichmäßig. Die Unterteilung ist über den ganzen Bereich nahezu regelmäßig, und wir können überall mit annähernd gleicher Genauigkeit messen, auch am Anfang und am Ende des Bereiches. Kleine Abweichungen sind auf konstruktive Ursachen zurückzuführen, die sich bei selbstgebauten Geräten nicht immer vermeiden lassen. Die fertige Skale wird fest angeklebt.

Auf *Stromstärke* wird unser Meßgerät geeicht, indem es mit einem Vergleichs-Strommesser in einem veränderlichen Stromkreis in Reihe, also hintereinandergeschaltet wird. Im übrigen geschieht wieder das gleiche wie bei der Spannungseichung. Da wir den Widerstand der Spule, den Spannungsbereich und damit auch den Stromstärkebereich kennen, brauchen wir *nur eine* der beiden Eichungen durchzuführen.

Die beiden Grundmeßbereiche unseres Galvanometers können durch Vorwiderstände (Spannung) und Nebenwiderstände (Strom) erweitert werden, beispielsweise auf 1, 10, 100 V und 20, 200 mA, 2 A – zu berechnen nach dem Ohmschen Gesetz und den Kirchhoffschen Gesetzen. Näheres darüber findet man in diesem Buch beim Bau des Drehspul-Meßgerätes auf S. 115.

Wir bauen ein Universal-Dreheisen-Meßgerät

Universal-Meßgeräte nennt man solche, die für Messungen von Wechselspannung, Wechselstrom, Gleichspannung und Gleichstrom eingerichtet sind noch dazu in jeweils mehreren Meßbereichen. Folgende Bereiche soll unser Meßgerät erfassen (stets von Null an): 26 und 120 V —, 200 mA und 2,2 A —; 44 und 220 V ~, 220 mA und 2,2 A ~. Spannung und Strom, deren Größe wir messen wollen, erzeugen stets in einer Spule ein Magnetfeld; dieses wirkt bei Systemen mit zwei Magnetfeldern auf das jeweils andere Feld ein und ruft eine Bewegung hervor, die wir beobachten können. Eines der Magnetfelder ist gleichbleibend (konstant), beim Galvanometer das des Drehmagneten. Das ist der Grund, weshalb solche Geräte nur für Gleichstrom verwendbar sind. Jede Änderung der Stromrichtung ändert zugleich die Richtung des Feldes, und das andere (gleichbleibende) Feld wird in entgegengesetzter Richtung beeinflusst; was vorher angezogen wurde, wird nun abgestoßen – und umgekehrt. Bei langsamem Wechsel kann das Galvanometer die Bewegung mitmachen, bei schnellem Richtungswechsel (etwa 50 Hz, Netzfrequenz) ist die mechanische Trägheit des Systems dazu viel zu groß. Der Zeiger zittert höchstens ein wenig!

Wir ersetzen folgerichtig das zweite, unveränderliche Feld durch ein veränderliches, das wir mit dem Feld unserer »Feldspule« in einem Stück Weicheisen erzeugen. Durch die magnetische Induktion entsteht im Weicheisen Magnetismus entgegengesetzter Polarität – und schon wird das Stück in die Spule hineingezogen. Weicheisen hat, wie wir wissen, so gut wie keinen bleibenden (remanenten) Magnetismus; also wechselt es seine magnetische Polarität ebensooft wie die induzierende Feldspule. Das ist auch bei noch höheren Frequenzen als 50 Hz möglich. Allerdings treten dann im Eisen Wirbelströme auf, die durch besondere Maßnahmen beseitigt werden müssen. Das stört uns hier nicht; jedoch ein anderer Nachteil ergibt sich: Die Skalen sind für Gleichstrom und Wechselstrom *verschieden*. Der Grund ist, daß Wechselstrom zusätzlich den induktiven Widerstand in der Feldspule überwinden muß und dadurch in seiner Wirkung geschwächt wird. Daher ist die Gleichstromskale stets etwas länger als die andere. Wir müssen also mit beiden Stromarten eichen! Einen weiteren Nachteil

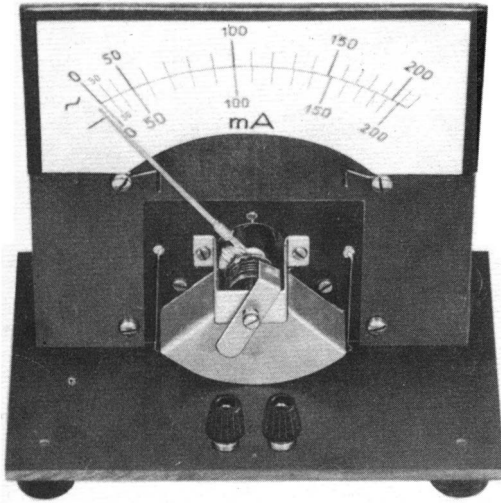


Bild 118. Ansicht unseres Dreheisen-Meßgerätes

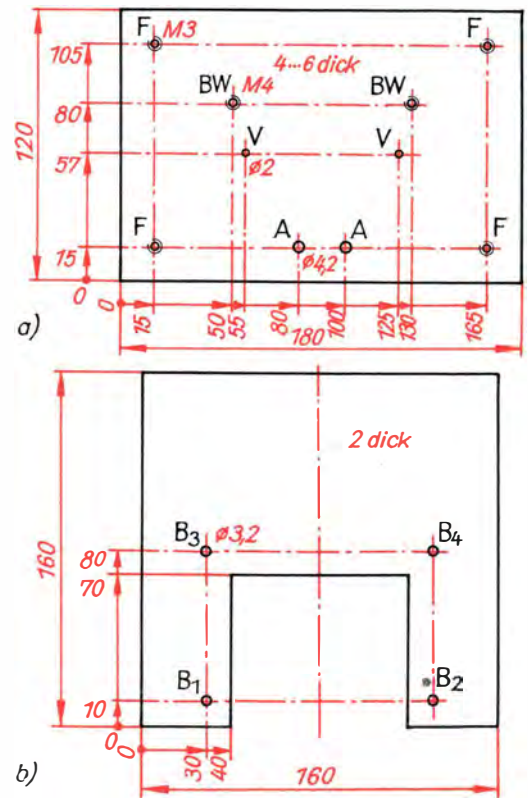
gibt es: Die beiden Skalen werden nicht linear, sondern an beiden Enden stark zusammengezogen.

Lassen wir einen Weicheisenstab einfach in eine Spule eintauchen, so sprechen wir von einem *Weicheisen-Meßgerät*. Wir gehen einen Schritt weiter und ordnen das Weicheisen um eine Achse drehbar an; dann haben wir ein *Dreheisen-Meßgerät*. Wieder gibt es zwei Möglichkeiten: Wir lassen entweder einen (etwas anders, gedrungener geformten) Kern in die Feldspule ziehen, oder wir arbeiten mit der Abstoßung. Diese letzte Art wollen wir bauen, mit *Luftdämpfung* sogar, wie sie bei industriell gefertigten Dreheisenengeräten üblich ist. Aber wie eine Abstoßung hervorrufen? Wieder bietet sich eine einfache Lösung an: Wir bauen das Weicheisenstück in *zwei* Teilen, einem feststehenden und einem (drehbar) beweglichen. Diese beiden bekommen zwangsläufig durch die Spule die gleiche Polarität, denn die Feldlinien durchsetzen die Eisenstücke in gleicher Richtung; der bewegliche Teil wird sofort weggedrückt. Die Form des feststehenden Teiles ist so ausgedacht und erprobt, daß von der Skale in ihrem größten Teil ausreichend genaue Werte ablesbar sind. Bild 118 zeigt das Meßgerät.

Grundplatte, Skalenplatte und Meßwerkplatte

Die *Grundplatte* ist wie stets aus Hartpapier (4 bis 6 mm dick), diesmal nach Bild 119a gebohrt und geschnitten. In F setzen wir vier Gummifüße ein und in A zwei Apparateklemmen. Die *Skalenplatte* fertigen wir nach Bild 119b aus Hartpapier (2 mm dick). Die vier Bohrungen sollen Schrauben für die Meßwerkplatte aufnehmen, die beiden unteren zugleich für den Befestigungswinkel. Die *Meßwerkplatte* stellen wir nach Bild 120 besonders genau her, damit das Meßwerk später draufpaßt; es wird an den Gewindebohrungen LB und D befestigt

Bild 119. Grundplatte (a) und Skalenplatte (b) des Dreheisenengerätes: F Gummifüße, A Apparateklemmen, BW Befestigungswinkel, V Verbindungsleitungen, B₁...B₄ Meßwerkplatte



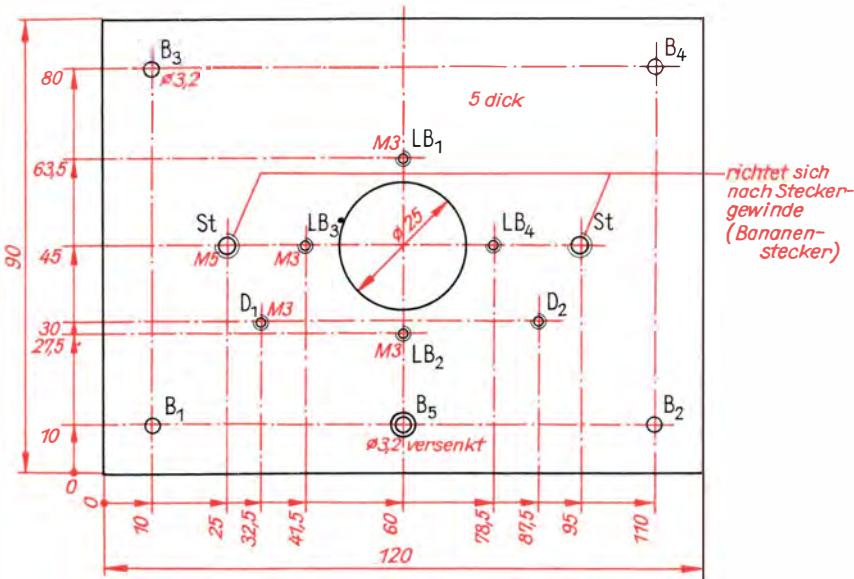
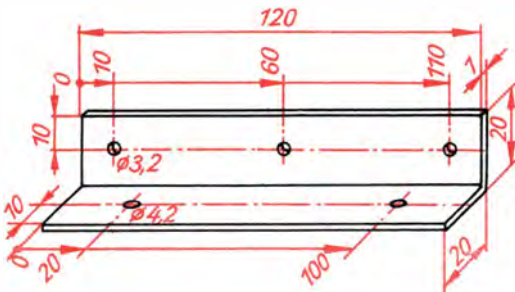


Bild 120. Meßwerkplatte

werden. B_3 und B_4 sind für die Verbindungsschrauben Meßwerkplatte/Skalenplatte bestimmt; B_1 , B_2 und B_5 auch für den Befestigungswinkel. Die Bohrung B_5 wird auf der Rückseite für eine Senkkopfschraube aufgebohrt; wir haben dann gleich die Rückseite gekennzeichnet. Von ihr aus schrauben wir in St und St zwei gefederte Bananenstecker ein, so daß die Gewindeenden an der Vorderseite 1...2 mm herausragen. Auf diese Stecker wird später die Feldspule gesteckt, sie sind dann auch ein Teil der Zuleitung.

Der Befestigungswinkel, nach Bild 121 aus 1 mm dickem Eisenblech gebaut, wird mit dem Zwei-Loch-Schenkel auf der Grundplatte aufgeschraubt (M4 in BW). Dann befestigen wir die Meßwerkplatte am anderen Schenkel – in B_1 und B_2 mit Zylinderkopfschrauben M3, in B_5 mit Senkkopfschraube (wegen des Dämpfungsfügels, der hier Platz braucht). Zwei weitere Zylinderkopfschrauben legen wir gleich für B_3 und B_4 beiseite. Alle Schraubenköpfe liegen auf der Vorderseite der Platte; der Winkel ist hinter ihr verborgen. An beiden Stecker-gewinde-Enden werden Verbindungsleitungen ange-lötet und isoliert abwärts durch V in der Grundplatte zu den Apparateklemmen geführt.

Bild 121. Befestigungswinkel zur Meßwerkplatte



Das Meßwerk erfordert solide Arbeit

Wir kommen nun zum wichtigsten Teil, dem *Meßwerk* (Bild 122), und zwar zuerst zum *hinteren Achslagerbock*. Er wird in der Spule sitzen – mitten zwischen den Steckern. Wir schlagen daher zwei Fliegen mit einer Klappe und bilden die obere Haltestrebe gleich als festes Eisenstück des Magnet-systems aus! Die untere Haltestrebe des Lagerbockes stellen wir aus Messing oder Aluminium her; sie darf nicht magnetisch werden!

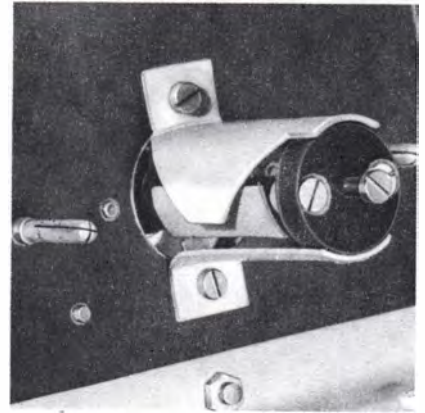
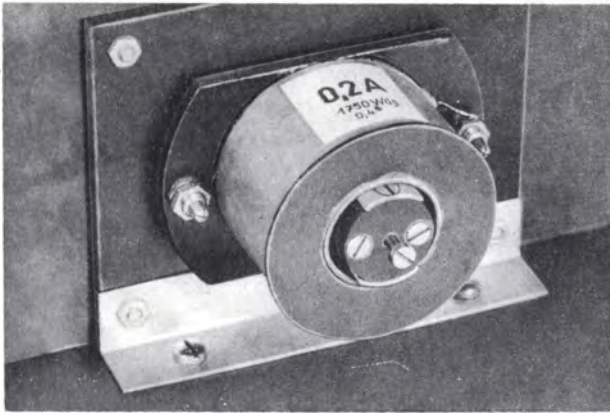


Bild 122. Meßwerk mit und ohne Spule

Bild 123c zeigt die untere Haltestrebe aus 1 mm dickem Aluminiumblech und Bild 123b die obere aus 1 mm dickem Eisenblech, zugleich mit dem »Schnittmuster« (Abwickelbild 123a). Der gerade Teil mit der einfachen Bohrung ist bei beiden Streben gleich. Die Löcher am Ende der gewölbten Teile müssen für Senkkopfschrauben ausgebohrt werden.

Wie die Streben im Schraubstock gebogen werden, sehen wir aus Bild 124: den noch geraden Winkel (a) mit einem Rundeisen (20...22mm Durchmesser) einspannen und die obere Kante mit einem Hammer auf das Rundeisen schlagen (b); dann umspannen und die andere Seite auf das Eisen schlagen (c). Erst nach dem Biegen die Löcher bohren! Die beiden Haltestreben werden an der Rückseite der Meßwerkplatte in LB_1 und LB_2 angeschraubt, die große Strebe oben, die kleine unten. Sie umschließen dann (teilweise) einen Zylinderraum.

Nun der Abschluß nach hinten, die rückwärtige *Achslagerscheibe mit Lagerschrauben!* Die Scheibe aus Hartpapier (6 mm dick) hat einen Durchmesser von 23 mm. Im Mittelpunkt ist eine Gewindebohrung M3 für die mindestens 18 mm lange Lagerschraube. In Richtung eines Durchmessers liegen zwei Gewindebohrungen M3 einander gegenüber, ohne das (zu ihnen senkrechte) Gewinde für die Lagerschraube zu berühren. Sie nehmen die beiden, mit Kopf 8 mm langen Senkkopfschrauben auf, mit denen die Scheibe an den Streben festgeschraubt

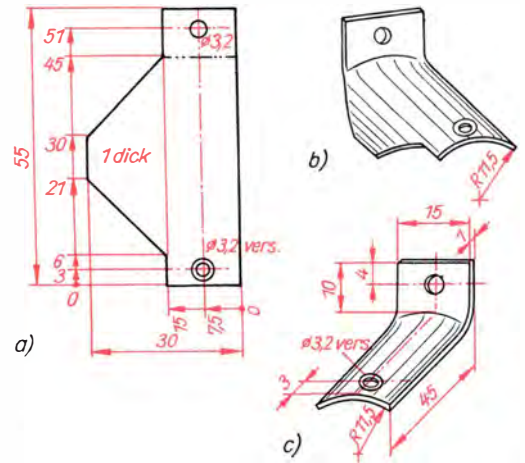
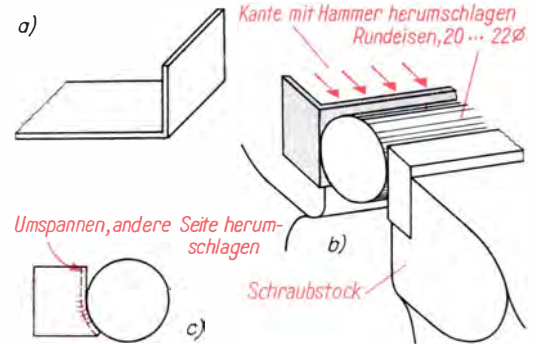


Bild 123. Haltestreben: a) Maße der oberen Strebe aus Eisenblech, b) fertig gebogene Strebe, c) untere Strebe aus Aluminiumblech

Bild 124. Herstellung der Haltestreben



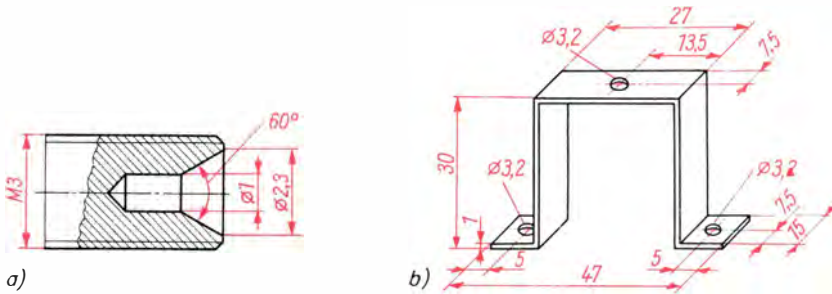


Bild 125. Achslagerschraube (a) und vorderer Achslagerbock (b)

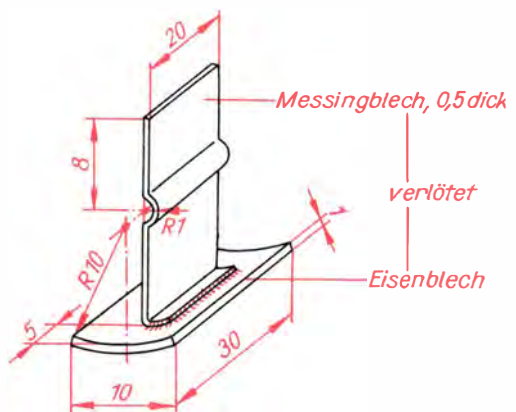
wird. Die Lagerschraube M3 aus Messing soll das hintere, auf etwa 50° zugespitzte Achsende aufnehmen. Wir müssen also eine entsprechende Vertiefung am Gewindeende schaffen. Zunächst bohren wir genau in der Mitte mit einem 1-mm-Bohrer ein 4 mm tiefes Loch; dann erweitern wir die Bohrung mit einem Senker oder (besonders zugeschliffenem) Bohrer zu einer Senkung mit einem Winkel von etwa 60° und einem größten Durchmesser von 2,3 mm (Bild 125a). Anschließend entgraten wir noch einmal mit dem 1-mm-Bohrer. Die Achse ist nicht mit ihrer Spitze, sondern mit der Wandung ihres Spitzenkegels auf der Wandung der konischen Senkung locker gelagert! Die Achslagerschraube schrauben wir mit einer Mutter zum Feststellen in ihre Scheibe; die Scheibe wird zwischen den Haltestreben befestigt.

Der *vordere Achslagerbock* wird nach Bild 125b aus 1 mm dickem Eisenblech gebogen; hier – außerhalb des Spulenfeldes – stört seine Magnetisierbarkeit nicht. Die beiden Flanschbohrungen gehören zu den Gewinden LB₃ und LB₄ in der Meßwerkplatte. Das Mittelloch im Achslagerbock ist für eine zweite, gleiche Achslagerschraube M3 aus Messing bestimmt, wie wir sie soeben angefertigt haben. Sie wird mit zwei Muttern befestigt und trägt zwischen Außenmutter am Lagerbock und Schraubenkopf die Einrichtung zum Einstellen des Nullpunktes: Einstellhebel, Andruck-Schraubenfeder und Unterlegscheibe (s. Bild 128). Der Hebel aus 1 mm dickem Messingblech ist 10 mm breit und besteht aus zwei rechtwinklig zueinander gebogenen Schenkeln, einem 45 mm langen und einem 15 mm langen. Der lange Schenkel hat 15 mm von der Biegung ent-

fernt eine Bohrung von 3 mm Durchmesser (in der Mitte der Breite); der kurze Schenkel am Ende einen 5 mm langen und 1 mm breiten Einschnitt zum Verlöten der Rückstellfeder. Der Winkel sitzt so auf der Achslagerschraube, daß sein kurzer Schenkel nach der Meßwerkplatte hin (waagrecht) liegt. Eine kleine Schraubenfeder drückt den Einstellhebel gegen die Mutter am Lagerbock; eine Unterlegscheibe sorgt dafür, daß das andere Ende der Feder nicht über den Schraubenkopf springt. Es sieht besser aus, wenn man das Ende des langen Schenkels schön abrundet.

Das *Drehsystem* im Meßwerk besteht aus der Achse, dem Dreheisen und dem Zeiger mit Ausgleichgewicht, Dämpfungsflügel und Rückstellfeder. Die *Achse* ist ein Stück Fahrradspicche (1,8 mm Durchmesser, 65 mm lang), das an beiden Enden auf 2 mm Länge zu einem Winkel von knapp 50° zugespitzt und poliert ist. Von der sauberen, gleichmäßigen Oberfläche dieser Spitzen hängt die Leicht-

Bild 126. Bewegliches Eisenstück als Dreheisen



gängigkeit des Meßgerätes ab! Das *Dreheisen* ist das bewegliche Eisenstück im Magnetfeld der Spule: im Bild 126 das 30 mm lange, gewölbte Eisenblech. Es wird über ein Messingblech in einem Winkel von etwa 110° zum Zeiger mit der Achse verbunden. Das Messingblech ist so in der runden Ausbuchtung mit der Achse zu verlöten, daß es 8 mm von der Achsenspitze (oder 5 mm vom Anfang des Kegels) entfernt beginnt.

Der *Zeiger* des Gerätes wird nach Bild 127 zugleich mit dem senkrecht zu ihm liegenden Dämpfungsflügel aus Konservendosenblech geschnitten. Dabei nutzen wir die Erfahrungen aus, die wir beim Richten des Galvanometerzeigers aus dem »Türkensäbel« (s. S. 106) gemacht haben. Das Ausgleichgewicht, über dem Drehpunkt des Zeigers angelötet, ist 1...2 mm dicker, blanker Kupfer-

draht, der mit blankem Kupferdraht 0,5...0,75 mm Durchmesser umwickelt wird. Der Zeiger ist nun auf die Achse zu ziehen und 18 mm vom nächstgelegenen Achsenende entfernt anzulöten. Wir nehmen die Achse zwischen Daumen und Mittelfinger und lassen das Drehsystem pendeln; wir löten so viel Lötzinn auf den Wickeldraht, bis der Zeiger senkrecht stehenbleibt.

Aus blankem Kupferdraht mit *genau* 0,30 mm Durchmesser stellen wir die *Rückstellfeder* her; sie ist eine etwa 19 mm lange Schraubenfeder mit 20 Windungen und einem Durchmesser von 15 mm. Die Rückstellkraft der Feder ist um so größer, je dicker der Draht und je kleiner die Länge des gestreckten (ungewickelten) Drahtes ist. Wir brauchen einen möglichst großen Ausschlag. Ist dieser zu klein, so müssen wir die Rückstellkraft herabsetzen;

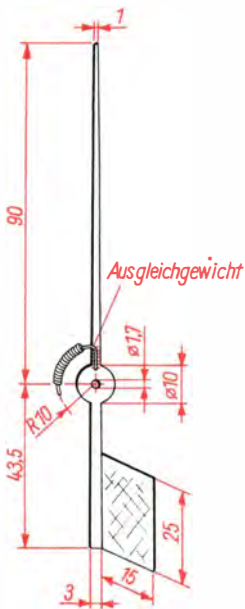


Bild 127. Zeiger mit Dämpfungsflügel

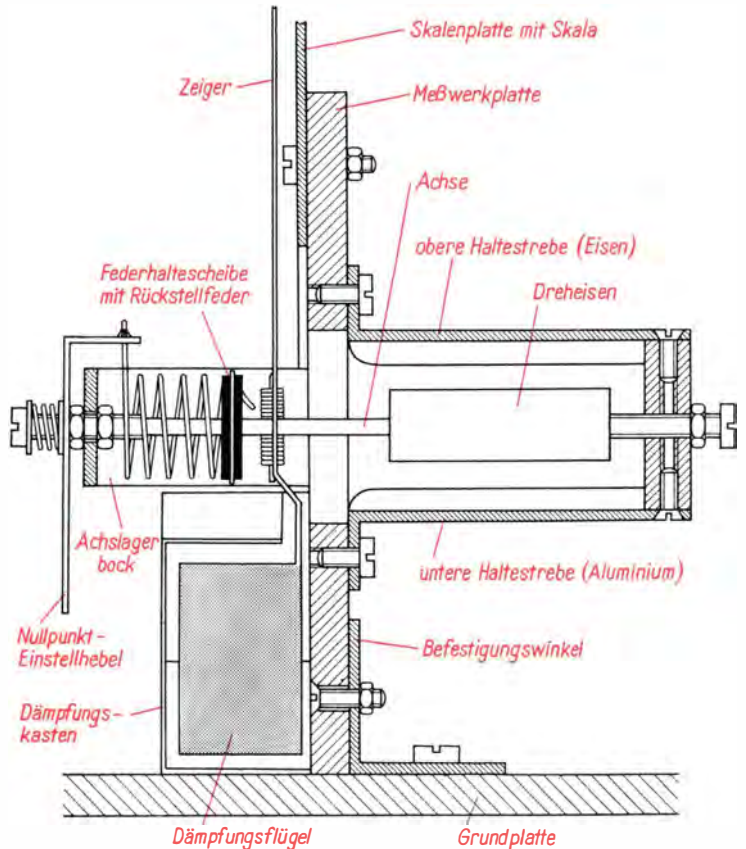


Bild 128. Querschnitt durch das Meßwerk

bei zu großem Ausschlag vergrößern wir sie. Die Rückstellfeder wird auf unserer Spulenwickelvorrichtung gewickelt. Das eine Ende (zum Nulleinstellen) biegt man 15 mm lang radial ab. Hierzu gehört eine *Federhaltescheibe* aus Hartpapier (15 mm Durchmesser, 2 mm dick) mit einer 1,7-mm-Bohrung in der Mitte (für die Achse).

In den *Scheibenrand* bohren wir an beliebiger Stelle ein schräges Loch (0,8 mm Durchmesser), das einige Millimeter unterhalb des Umfanges endet. Wir setzen die Haltescheibe mit dem Schrägloch zum Zeiger hin etwa 5 mm vor diesem fest auf die Achse, führen die Rückstellfeder über die Achse hinzu und fädeln das Drahtende von oben (vom Rand) in das Schrägloch, bis es etwas tiefer einige Millimeter herausragt. Eine Windung wird um den Rand der Scheibe gelegt und mit dem Ende am Schrägloch verlötet; dann wird diese ganze Windung mit Kleber ringsherum am Scheibenrand befestigt. Auf diese Weise behält die Feder ihre richtige Lage und Form.

Das fertige *Drehsystem* wird in das hintere Achslager – mit weit zurückgedrehter Lagerschraube – eingesetzt; dann schrauben wir das vordere Achslager mit Lagerschraube und Nullpunkt-Einstellhebel in LB₃ und LB₄ auf der Meßwerkplatte fest (Bild 128). Sehr vorsichtig wird jetzt die hintere Lagerschraube an die Achse herangeschraubt, bis sich das System leicht und fast ohne Spiel in den Lagern bewegt. Auf beide Lager tropfen wir etwas dünnes Öl. Wir prüfen, ob irgendwo etwas schleift oder anstößt; solche Stellen werden nachgearbeitet. Nun folgt die zweite und letzte *Auswuchtung*; an zu leichten Stellen bringen wir Lötzinn an. Das noch freie (abgebogene) Ende der Rückstellfeder wird (am Schlitz) mit dem Nullpunkt-Einstellhebel verlötet; bei mittlerer Hebelstellung soll der Zeiger ungefähr in Richtung auf den (späteren) Nullpunkt der Skale zeigen.

Drei Teile fehlen nun noch: die Feldspule, die Skale mit Gleitschienen sowie die Dämpfung der Zeigerbewegung. Der Dämpfungsflügel am Zeiger (Bild 127) wirkt erst im eng geschlossenen Raum, dem *Dämpfungskasten* aus Konservendosenblech. Bild 129 zeigt das Abwickelschema und den danach angefertigten Kasten. Er muß sehr genau nach den Maßen gebaut werden, damit zwischen Dämpfungsflügel und Kastenwand möglichst wenig Zwischenraum ist, durch den die Luft zu schnell entweicht. Die Seitenteile werden abgebogen und mit der

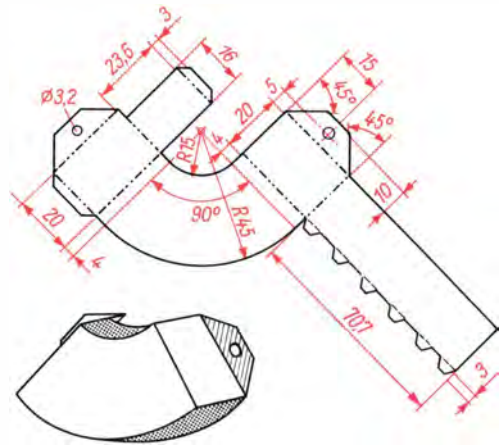


Bild 129. Der Dämpfungskasten

Außenwand (in Form eines Ringflächenstückes) sorgfältig, das heißt hier vor allem luftdicht, verlötet. Den fertigen Dämpfungskasten legen wir mit der offenen Rückseite auf eine ebene Fläche und prüfen, ob er gleichmäßig aufliegt; zu hohe Stellen nehmen wir weg. Dann biegen wir das untere Ende des Nullpunkthebels etwas hoch, schieben die Kammer über den Dämpfungsflügel (der dabei nicht verbogen werden darf) und schrauben sie mit zwei Schrauben M3 in D₁ und D₂ an der Meßwerkplatte fest. Wir prüfen, ob der Flügel nirgendwo klemmt oder anschlägt; ist alles in Ordnung, so biegen wir den Hebel wieder gerade. Nun erhalten die Flächen einen Aluminiumbronze-Anstrich. Die obere Haltestrebe, das Dreheisen und die Spitze des Zeigers lackieren wir mit roter Farbe, um sie hervorzuheben.

Wir wickeln die Spulen der Meßbereiche

Für die acht Meßbereiche brauchen wir vier Spulen; Bild 130 zeigt drei davon mit den zugehörigen Doppelskalen. Alle haben den gleichen Spulenkörper nach der Werkstattnorm N₃ (Bild 8) mit folgenden Maßen in mm: $a_1 = 56$; $a_2 = 28$; $a_3 = 26$; $b_1 = 80$; $b_2 = 70$; $b_3 = 56$; $c = 36$; $d_1 = 4$; $d_2 = 2$; $e = 6$. Die inneren Rohre sind wie immer aus schellackgetränktem Papier auf einem Rundstab zu 1 mm

Wandstärke zusammengeklebt; die Seitenteile sind diesmal aus Hartpapier, 2 mm dick (runde Seite) und 4 mm (lange Seite), weil die Spulen häufig ausgewechselt werden.

Und nun wickeln wir auf unserer Wickelvorrichtung:

- 22500 Windungen für 0...220 V ~ und 0...120 V – mit CuL 0,10,
- 4500 Windungen für 0... 44 V ~ und 0... 26 V – mit CuL 0,18,
- 175 Windungen für 0... 2,2 A ~ und 0... 2,2 A – mit CuL 1,00,
- 1750 Windungen für 0...220 mA ~ und 0...200 mA – mit CuL 0,40.

Das ist eine recht aufwendige Wickelarbeit, aber die vielseitige Verwendbarkeit des Meßgerätes lohnt die Mühe schon. Die oft so lästige Selbstinduktion der Spulen bei Wechselstrom vergrößert hier in erfreulicher Weise die Meßbereiche.

Die beiden Bohrungen im langen Seitenteil jeder Spule erhalten je eine an beiden Seiten offene Telefonbuchse mit je zwei Muttern, die auf der Seite der Wicklung liegen. Diese Buchsen müssen genau auf die Bananenstecker der Meßwerkplatte passen – ebenso wie die Spulenöffnung auf die beiden Haltestreben! Alle fertigen Wicklungen werden durch eine Lage Zeichenkarton (mit Schellack) gesichert; die Enden der dünnen Drähte (0,10 und 0,18 mm Durchmesser) schützen wir dadurch, daß wir am Anfang und Ende der beiden Spulen dickere Drähte anlöten, die als Ösen zwischen den Muttern festgeklemmt werden. Auf die Spulen kleben wir je ein Papier mit der Angabe des Meßbereiches, der Windungszahl und des Drahtdurchmessers.

Wir erinnern uns: In unserer Schalttafel haben wir auch solche Dreheisen-Meßgeräte. Was dazu

schon angedeutet wurde, gilt auch hier: Bei diesen Systemen sollte man möglichst nicht mit Vor- und Nebenwiderständen arbeiten, um die Meßbereiche zu verändern. Wir brauchen stets die Gesamtwirkung auf das System; deshalb für *jeden* Bereich besondere Spulen. Wir prüfen, ob sich die Spulen weich und trotzdem mit gutem Kontakt auf die Bananenstecker schieben lassen. Bild 130 zeigt drei Skalen (Doppelskalen) für Gleichstrom und für Wechselstrom. Sie sind so breit wie die Skalenplatte (160 mm) und stoßen (75 mm hoch) unten auf die beiden Schraubenköpfe in B₃ und B₄. Der in der Mitte unten ausgeschnittene Bogen hat den Radius $r = 60$ mm, der gezeichnete Bogen zwischen den beiden Wertreihen $r = 90$ mm. Die Ziffern sind 6 mm hoch – zwischen Bögen mit den Radien 70 mm und 76 mm. Wir zeichnen zunächst alle Bögen auf Papier (160 mm × 125 mm), der Mittelpunkt für die Bögen liegt 10 mm über dem unteren Rand (in der Mitte). Dann schneiden wir die unteren 50 mm ab, kleben die Skalenpapiere (jetzt 160 mm × 75 mm groß) auf vier Pappen und schneiden noch die Bögen am unteren Rand aus.

Die fertigen Skalen sollen auswechselbar an der Skalenplatte (Bild 119b) befestigt werden; wie – das soll jedem selbst überlassen bleiben. Nur ein Vorschlag: kleine Schienen aus Konservendosenblech links und rechts anbringen! Wir schrauben die Skalenplatte mit vier Schrauben M3 auf der Meßwerkplatte fest, zunächst in B₁ und B₂. In B₃ und B₄ werden gleichzeitig zwei *Zeigeranschläge* (Bild 131) aus isoliertem Kupferschaltendraht (0,75 mm Durchmesser) angeschraubt. Zwischen diesen Anschlägen spielt der Zeiger.

Zum Schluß wird unser Dreheisen-Meßgerät in acht Schritten *geeicht*. Die Schaltung zum Eichen als Strommesser und als Spannungsmesser zeigt



Bild 130. Skalen und Spulen des Dreheisenmeßgerätes

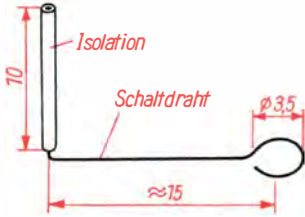


Bild 131. Zeigeranschlag

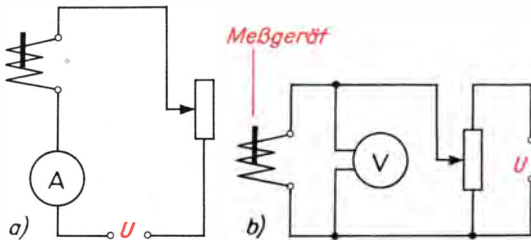


Bild 132. Eichen des Meßgerätes als Strommesser (a) und als Spannungsmesser (b)

Bild 132. Wie das vor sich geht, wissen wir schon: stufenweise schalten, mit Vergleichsmeßgerät Werte feststellen, mit Bleistift auf dem Papier kennzeichnen, dann mit dicken Strichen die Hauptwerte und mit dünnen die Zwischenwerte nachziehen. Wechselstrom oben, Gleichstrom unten, in zwei verschiedenen Farben.

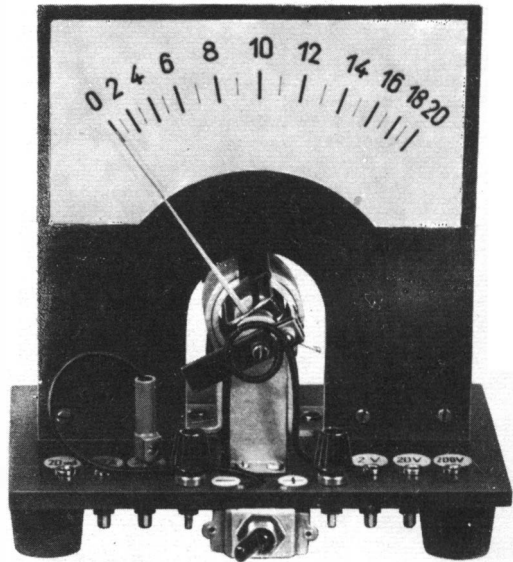
Eine Schwierigkeit besteht: Wir haben nicht die nötige Stromstärke 2,2 A in der Schalttafel und können und dürfen nicht bis 220 V ~ und 120 V — schalten. Wir wenden uns am besten an die Stelle, die uns die Eichmeßgeräte leiht — meist wohl eine Schule. Dort wird man gern bereit sein, uns beim Eichen zu helfen. Die Bereiche 44 V ~ und 26 V — sowie 220 mA ~ und 200 mA — führen wir schon im eigenen Labor durch.

Für höchste Ansprüche — ein Drehspul-Vielfach-Meßgerät

Wenn das Galvanometer noch eine »Lehrlingsarbeit« war und das Dreheisengerät schon ein »Gesellenstück« — dann soll das Drehspul-Meßgerät das »Meisterstück« werden! Ausreichende Übung haben wir schon; Bauelemente aus der elektrischen Maschine I und dem Dreheisen-Meßgerät tauchen wieder auf. Und die Drehspul-Meßgeräte haben große Vorteile: lineare Skale (die wir nicht ganz, aber mit guter Annäherung erreichen), zuverlässiges Messen und die Möglichkeit, die Meßbereiche durch Vor- und Nebenwiderstände leicht zu verändern. Also das Richtige für uns!

Daß die Skale (theoretisch und bei Industriegeräten) nahezu linear ist, deutet darauf hin, daß hier wieder ein Magnetfeld auf ein zweites einwirkt. Aber diesmal beeinflusst das gleichbleibende Magnetfeld das veränderliche, das sich hier bewegt — umgekehrt wie im Galvanometer. Beim Einwirken eines konstanten Magnetfeldes (eines Dauermagneten) auf eine vom zu messenden Strom durchflossene Spule entsteht ein Drehmoment, durch das die Spule gedreht wird — um so mehr, je stärker der

Bild 133. Ansicht unseres Drehspul-Vielfach-Meßgerätes



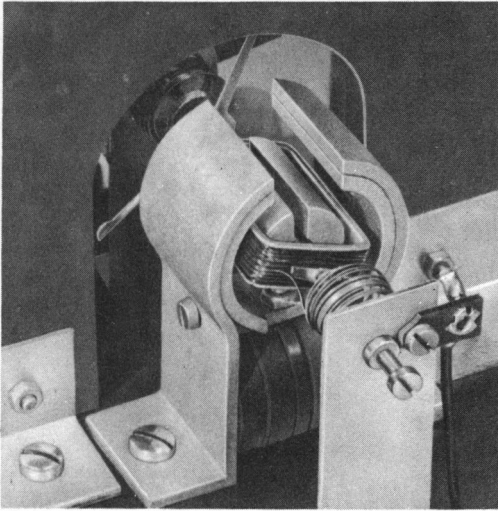
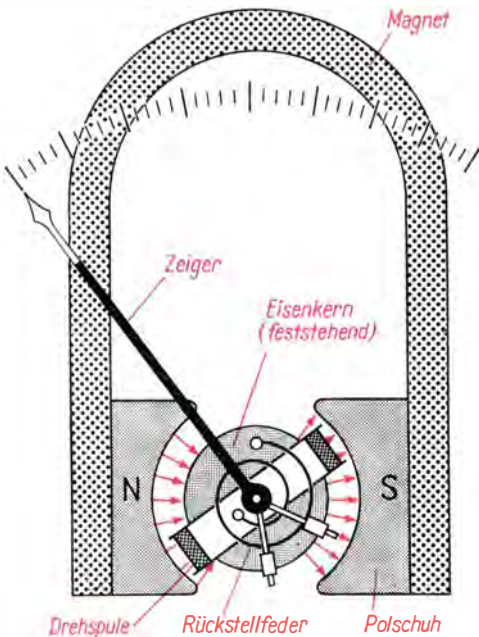


Bild 134. Das Drehpul-Meßsystem

Bild 135. Schema eines Drehspulsystems



Strom und je höher die Spannung in der Spule sind. Selbstverständlich ist dieses System ebenfalls *nur für Gleichstrom* verwendbar. Um seine Vorzüge auch für Wechselstrom ausnutzen zu können, wird in der Praxis ein *Meßgleichrichter* vorgeschaltet.

Bild 133 zeigt das Meßgerät, Bild 134 das Meßsystem. Den *Dauermagneten* bauen wir ähnlich wie bei der Maschine I, aber mit noch besseren Polshuhen. Außerdem wird zwischen den Polshuhen (von unten, wo er die Spule nicht in ihrer Bewegung stört) ein runder Weicheisenkern befestigt, der in dem schmalen Zwischenraum ein gleichmäßiges radiales und kräftiges Magnetfeld erzeugt (Bild 135). Weil die Spule sich nur in diesem Feld bewegt, sind auch Drehmoment und Zeigerausschlag gleichmäßig. Je geringer die Zwischenräume sind, um so mehr nähert sich die Skalenteilung einer linearen Teilung.

Der Strom wird ganz einfach über zwei Rückstellfedern unserer Bauart zur Spule geführt; in der Praxis verwendet man Spiralfedern. Eine Einrichtung zur Dämpfung der Bewegung brauchen wir diesmal nicht; das besorgt das Aluminiumrähmchen der Drehspule selber – genauer gesagt, die *Wirbelströme*, die im Rähmchen entstehen, wenn es das Magnetfeld durchläuft. Wirbelströme (Kurzschlußströme) bremsen immer; diese Erscheinung wird in den Wirbelstrombremsen der elektrischen Triebwagen ausgenutzt.

Wir wollen, um einen größeren Meßbereich zu haben, unser Meßgerät mit dem Nullpunkt ganz links bauen; damit ist die Stromrichtung festgelegt, und wir müssen gegebenenfalls die Anschlußdrähte umwechseln. (Bei den Experimentiergeräten der Schulen kann man vielfach den Nullpunkt auch in die Skalenmitte verlegen.) Die *Grundmeßbereiche* (ohne Zusatzwiderstände) werden 20 mA und 2 V sein; der Widerstand der Spule ist dann nach dem Ohmschen Gesetz $R = \frac{U}{I} = \frac{2 \text{ V}}{0,02 \text{ A}} = 100 \Omega$.

Durch Zusatzwiderstände erhalten wir die weiteren Bereiche 200 mA, 2 A, 20 V und 200 V; immer von Null an gerechnet. Das ist in großen Zügen das Wichtigste; wir können mit dem Bau beginnen.

Konstruktion des Drehspulsystems

Die *Grundplatte* aus Hartpapier (4...6 mm dick) wird nach Bild 136 gebohrt und geschnitten. Die Buchstaben geben an, welche Bauteile dorthin gehören. Wir setzen die beiden Apparateklemmen in A und A und die sechs Telefonbuchsen in $B_1 \dots B_6$ ein. GummifüÙe lassen sich diesmal nicht gut verschrauben; wir kleben drei Gummistopfen (20 mm hoch, etwa 28 mm größter Durchmesser) mit Kleber an. Einer davon wird hinten in der Mitte befestigt, der zweite und der dritte kommen in die vorderen Ecken. Da diese schon teilweise mit den Buchsen

B_1 und B_6 besetzt sind, schneiden wir aus den Stopfen entsprechende Stücke heraus. Der *vordere Lagerbock* nach Bild 137a aus 1 mm dickem Eisenblech ist oben abgerundet und hat darunter eine Bohrung für die Lagerschraube; der *hintere Lagerbock* (Bild 137b) ist nicht abgerundet und hat zwischen oberer Kante und der gleichen Bohrung wie beim vorderen (für die hintere Lagerschraube) noch eine zweite Bohrung (für den Federanschlag). Dieser *Federanschlag* aus Hartpapier (1,5...2 mm dick) und 1 mm dickem Messingblech (Bild 137c) dient zum Festhalten des einen Endes der hinteren Rückstellfeder und zugleich als Teil der Verbindungs-

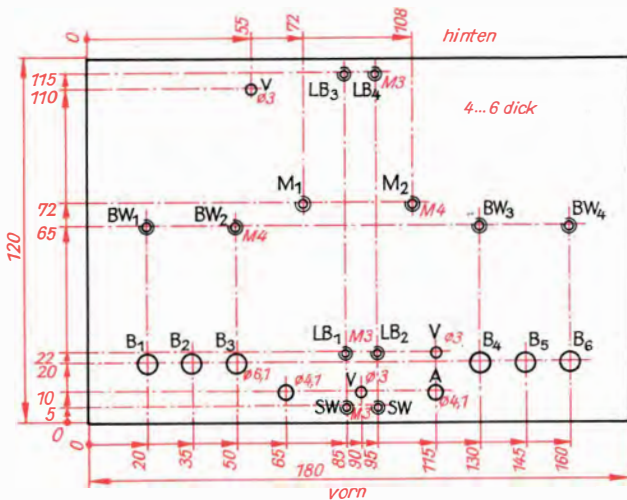
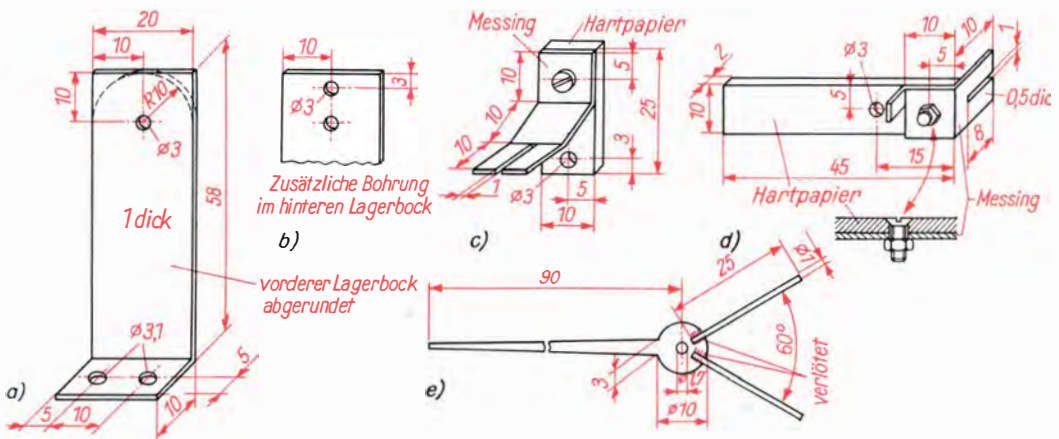


Bild 136. Grundplatte des Drehspulgerätes: V Verbindungsleitungen, LB₁ und LB₂ vorderer Lagerbock, LB₃ und LB₄ hinterer Lagerbock, B₁ Anschluß 20 mA, B₂ Anschluß 0,2 A, B₃ Anschluß 2 A, B₄ Anschluß 2 V, B₅ Anschluß 20 V, B₆ Anschluß 200 V, A Apparateklemmen, BW₁ und BW₂ linker Befestigungswinkel zur Skalenplatte, BW₃ und BW₄ rechter Befestigungswinkel zur Skalenplatte, M₁ und M₂ Dauermagnet

Bild 137. Bauteile des Drehspulgerätes: a) vorderer Lagerbock, b) hinterer Lagerbock, c) Federanschlag, d) Nullpunkt-Einstellhebel, e) Zeiger



leitung (daher auf isolierendem Hartpapier). Im Schlitz wird später das hintere Ende der hinteren Rückstellfeder angelötet (siehe Montagebild 140). Wir befestigen beide Lagerböcke mit Schrauben M3 in den LB-Gewinden der Grundplatte, die kurzen Schenkel zu den Kanten hin. Am oberen Loch des hinteren Bockes schrauben wir mit einer M3-Schraube von außen den Federanschlag so an, daß er senkrecht steht und der Kontaktstreifen aus Messing über den Lagerbock hinweg schräg nach unten ragt.

Der *Nullpunkt-Einstellhebel* muß gegen die Achse isoliert sein; wir bauen ihn daher (Bild 137d) mit einem langen Schenkel aus Hartpapier (2 mm dick) und einem kurzen aus Messingblech (0,5 mm dick). Der lange Hartpapierteil ist der Griff zum Anfassen; am kurzen Messingteil wird später (im Schlitz) das vordere Ende der vorderen Feder angelötet – am anderen Ende des Messingstreifens außerdem der Leitungsdraht zu einer Apparateklemme. Wir legen den Hebel einstweilen beiseite.

Die *Drehspulachse* wird – wie die Dreheisenachse – aus einer Fahrradspitze hergestellt. Sie ist 70 mm lang und an beiden Enden (etwa 2 mm) auf einen Winkel von knapp 50° sehr sorgfältig zugespitzt und poliert, damit sie sich leicht in den Lagern bewegt. Die beiden *Schraubenlager* stellen wir wie die für das Dreheisen-Meßgerät her, desgleichen die Andruckfeder für den Nullpunkt-Einstellhebel. Auch die *Rückstellfedern* bauen wir wie beim Dreheisen-Meßgerät – es müssen diesmal zwei sein. Entspirend werden zwei *Federhaltescheiben* angefertigt. Etwas geändert wird dagegen der *Zeiger*; sein Gegengewicht wird durch zwei angelötete, 1 mm dicke und 25 mm lange, gerade (und blanke) Kupferdrähte gebildet (Bild 137e). Im übrigen ist er aus Konservendosenblech, wie beim Galvanometer angeben.

Nun zur *Drehspule*, einem neuen Teil! Der Spulenkörper ist diesmal ein Rähmchen aus *Aluminium-Konservendosenblech* (nicht Eisen) nach Bild 138. Ein etwa 100 mm langer Streifen Aluminiumblech (0,5 mm dick) wird der Länge nach an beiden Seiten gebördelt und zum rechteckigen Spulenkörper gebogen und vernietet. Die Enden werden übereinandergeschoben; das eine Ende muß daher 1 mm breiter sein. Wenn der Rand beim Umbiegen hier oder da etwas einreißt, so ist das nicht weiter schlimm.

Wir streichen die Flächen, die die Wicklung tra-

gen sollen; zur Isolation dünn mit Schellack oder Alleskleber ein und stecken in beide Achsbohrungen (an den Schmalseiten) je ein kurzes Stück Isolierschlauch – damit wir beim Wickeln nicht die Bohrungen verdecken. Die Schlauchstücke werden innen im Rahmen mit etwas Kleber an diesem festgeklebt, denn sie sollen dort bleiben. Wir wickeln auf unserer Wickelvorrichtung zwischen zwei großen Gummistopfen etwa 500 Windungen (CuL 0,10) ganz dicht nebeneinander, denn der vorhandene Platz ist knapp (Bild 139). Wir prüfen, ob die *Wicklung* tatsächlich einen Ohmschen Widerstand von 100Ω hat, anderenfalls verfahren wir wie beim Galvanometer. Zum Schluß wird die Wicklung durch Bestreichen mit Alleskleber gesichert. Die etwa 20 mm langen Drahtenden bleiben zum Anlöten frei.

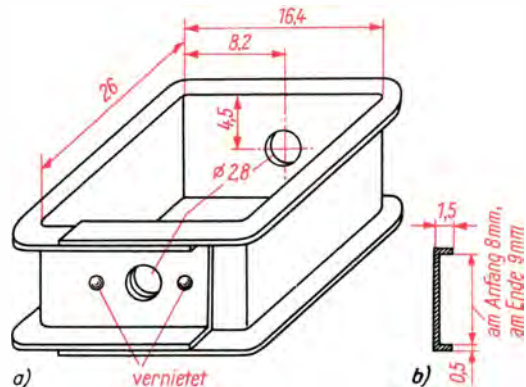
Die beweglichen Teile können wir nunmehr auf die Achse aufziehen und diese nach dem Montagebild 140 mit Lagern, Böcken und Grundplatte zusammensetzen:

Zuerst die Achse in die Spule einsetzen, die Isolierschlauchstücke bleiben im Spulenrahmen.

Aufziehen und Ausrichten des Zeigers; er steht senkrecht zur Drehspule und wird in dieser Lage mit Kleber gesichert.

Aufziehen der Federhaltescheiben, von jeder Seite eine. Auf keinen Fall dürfen wir mit Holz-, Gummio- oder gar Eisenhammer auf eine Achsspitze schlagen! Statt dessen fassen wir mit einer Flachzange die Achse im Innern der Spule fest und schlagen vorsichtig auf die Zange; dabei liegt die Scheibe

Bild 138. Rahmen der Drehspule (a) und dessen Querschnitt (b)



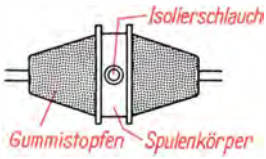


Bild 139. So wird die Spule gewickelt

Bild 140. Anordnung der beweglichen Teile

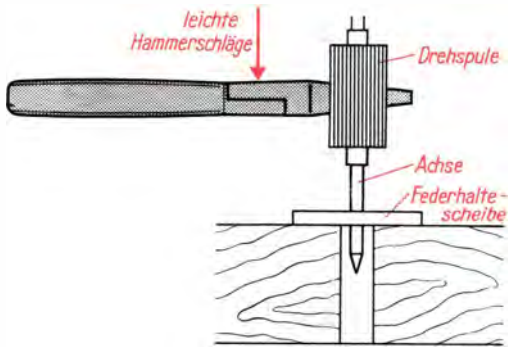
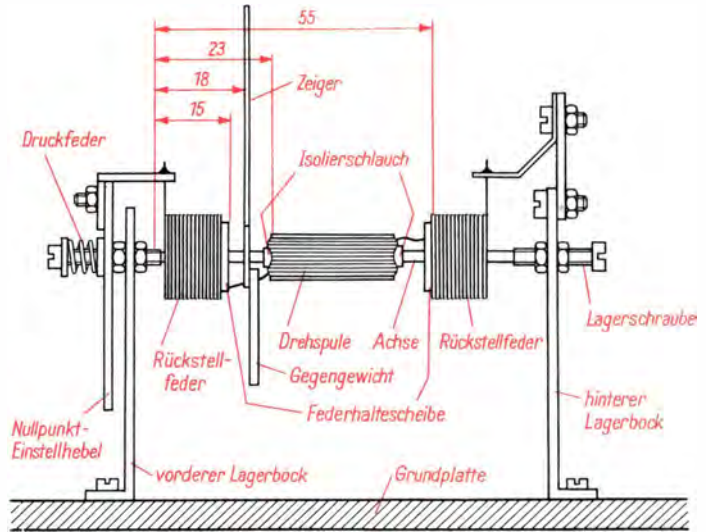


Bild 141. Aufziehen der Federhaltescheibe

auf einem Holzbrett mit einer 2-mm-Bohrung (Bild 141). Vorher muß die Lage der Scheiben (genauer: ihrer Schräglöcher) zur Spule ausgerichtet werden. Jedes Schrägloch soll möglichst nahe an dem Spulendrahtende seiner Seite liegen; denn das aus dem Loch kommende Ende der Rückstellfeder soll mit dem Spulenende verlötet werden.

Als nächstes: Einfädeln des einen Endes der Federn in die Schrägbohrung der Haltescheiben.

Aufziehen der ersten Windung.

Sichern durch Kleber am gesamten Scheibenumfang (wie beim Dreheisen-Meßgerät). Etwa 12 mm lang müssen die Federenden aus den Schräglöchern herausragen. Diese Enden der beiden Rückstell-

federn werden auf dem kürzesten Wege mit dem jeweils gegenüberliegenden Spulendrahtende verlötet.

Einsetzen der Achse in die Lager.

Ölen der Lager und Auswuchten des Drehsystems (durch Abkneifen oder Aufbringen von Lötzinn auf die Gegengewicht-Kupferdrähte).

Dann werden die noch freien Enden der Rückstellfedern verlötet; das vordere im Einstellhebel, das hintere im Federanschlag. So leicht, wie sich das liest, ist es jedoch nicht, denn beide Federn müssen bei mittlerer Hebelstellung so gespannt sein, daß der Zeiger nach links (Nullpunkt) gedrückt wird. Wir legen die Spule waagrecht und drehen das Ende der hinteren Feder um 90° im Uhrzeigersinn – von der Vorderseite des Meßgerätes aus (über die Spule hinweg) gesehen; in dieser Lage wird es im Federanschlag angelötet. Die Spule hat sich teilweise mitgedreht. Nun wird das Ende der vorderen Rückstellfeder in der anderen Richtung, entgegen dem Uhrzeigersinn, um 270° gedreht und so am Hebel angelötet. Das gilt aber nur für Federn, die wie das Gewinde einer rechtsdrehenden Schraube gewickelt sind. Andernfalls umgekehrt! Durch die Differenz der beiden entgegengesetzten Drehungen haben Spule und Zeiger ungefähr die richtige Stellung bekommen; genauer eingestellt wird später mit dem Einstellhebel.

Schon bekannt – das Magnetsystem

Es ist eine verbesserte und ergänzte Ausführung des Dauermagneten der elektrischen Maschine I. Bild 142a zeigt den *Magneten mit Polschuhen* und *Spulenkern*, Bild 142b Einzelheiten zum Bau der beiden (gleichen) Polschuhe aus Eisenblech (2,5 mm dick). Durch die angeschraubten runden Innenteile wird ein gleichmäßiges Magnetfeld für jede Stellung der Drehspule gesichert. Im Bild 142c finden wir den *Kernhaltewinkel*, der zugleich den Abstand beider Polschuhe bestimmt. Er ist aus 2 mm starkem Messing oder Aluminium; bei Eisen hätten wir einen höchst unerwünschten magnetischen Kurzschluß!

Der runde *Spulenkern* aus Weicheisen (Bild 142d) hat eine mittige Längsbohrung von 5 mm Durchmesser (Platz für die bewegliche Achse) und einen Längsschlitz von 2 mm Breite bis zur Bohrung. Den Schlitz benötigen wir für den Zusammenbau. Später werden wir ihn mit einem entsprechend dicken Eisenblech ausfüllen. Die beiden Gewinde M3 sind für die beiden Senkkopfschrauben bestimmt, die den Spulenkern im richtigen Abstand vom Kernhaltewinkel – gleichmütig mit dem Polschuhkreis – festhalten. Das magnetische Feld erzeugen vier runde, volle keramische Dauermagneten (5 mm

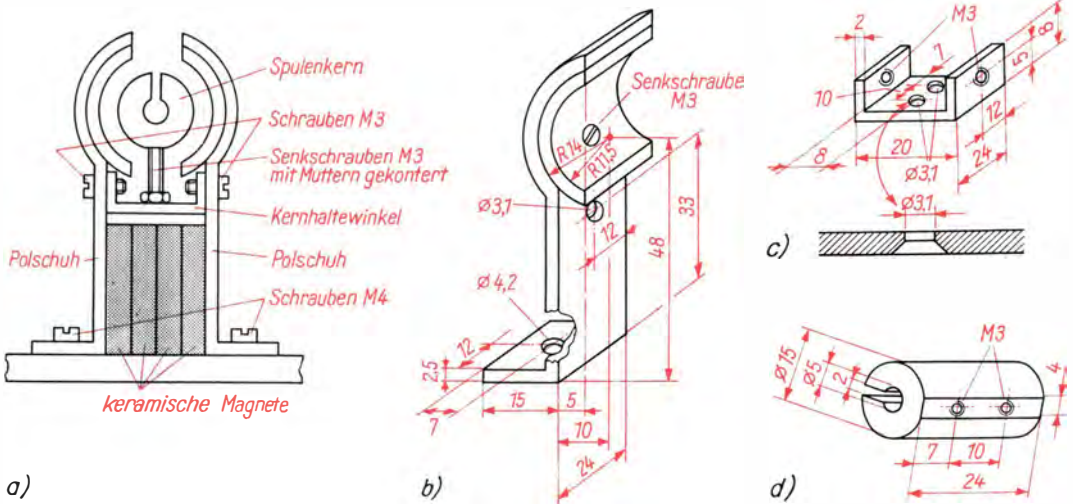
dick, 25 mm Durchmesser, axial magnetisiert). Sie müssen den Platz unten zwischen den Polschuhen ganz ausfüllen und fest anliegen; notfalls stecken wir eine Scheibe aus Eisenblech von gleichem Durchmesser dazwischen. Selbstverständlich können wir auch eine andere Zusammensetzung wählen, beispielsweise drei Magneten von 6 mm Dicke und eine 2 mm starke Eisenscheibe – Hauptsache, die 20 mm werden eingehalten.

Zum Schluß wird die *Skalenplatte* nach Bild 143 aus Hartpapier (2 mm dick) ausgesägt und gebohrt. Von den dazugehörigen Haltewinkeln aus Eisenblech (1 mm dick) brauchen wir zwei Stück. Die Maße der Blechwinkel sind nach N_6 (Bild 8) in mm: $a = b = 20$; $c = 50$; $d = 1$; $e_1 = 3,1$; $e_2 = 4,2$; $f_1 = f_2 = 10$; $g_1 = g_2 = 10$; $h_1 = h_2 = 30$. Dagegen genügt jetzt eine einzige Skale, weil wir neben den kleinsten Meßbereichen nur deren zehnfache Größen haben werden; freilich schreiben wir keine Maßeinheit unter die Skale, sondern denken sie jeweils hinzu.

Die Skale stellen wir ebenfalls wie beim Dreh-eisengerät her:

Auf Zeichenkarton (125 mm × 160 mm groß) 10 mm über dem unteren Rand in der Mitte Zirkel einsetzen und Bögen schlagen mit den Radien 111 mm und 105 mm (für die Maßzahlen 2, 4, 6 bis 18, 20), 97,5 mm und 82,5 mm (für die dicken Striche unter den Maßzahlen), 90 mm (für die Mittellinie zwischen den beiden letztgenannten, um die Halbstriche in der Mitte zwischen den dicken

Bild 142. Magnetsystem: a) Montagebild, b) Polschuh, c) Kernhaltewinkel, d) runder Spulenkern



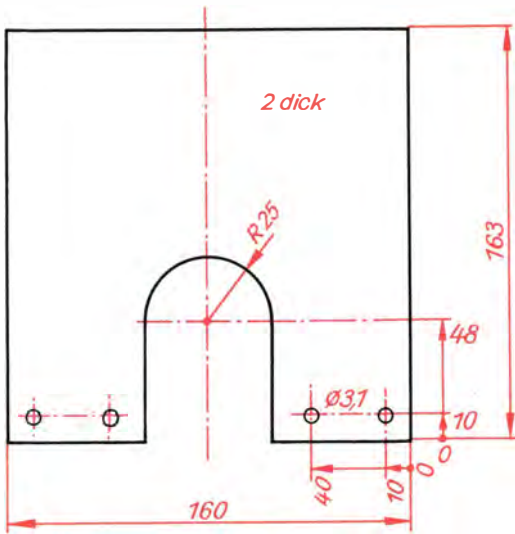


Bild 143. Skalenplatte

Strichen besser zu treffen) und 60 mm (für den auszuschneidenden Bogen).

Dann die Höhe des Kartons um 45 mm auf 80 mm verkürzen, den untersten Bogen ausschneiden und die nun zum *Eichen* fertige Skale auf die Skalenplatte mit Alleskleber aufkleben.

Wir setzen die Montage mit dem *Einbau des Magnetsystems* fort (Bild 144): Anschrauben eines Polschuhes auf der Grundplatte mit M4-Schraube

in M_1 oder M_2 . Der Kernhaltewinkel aus Messing wird über zwei Senkkopfschrauben M_3 (mit Gegenmutter) nach Bild 142a im richtigen Abstand mit dem runden Spulenkern verbunden; wir können den Abstand am anderen Polschuh prüfen, indem wir den Winkel dort vorübergehend anschrauben. Der Kern wird nun von unten vorsichtig über die Achse in die (waagrecht gestellte) Spule geschoben, dann verschrauben wir den Haltewinkel mit dem schon stehenden Polschuh. Die Spule darf nirgends schleifen! Die vier Magneten werden eingefügt; den zweiten Polschuh schraubt man an Grundplatte und Messingwinkel an.

Die Skalenplatte verschrauben wir mit ihren beiden Befestigungswinkeln und bringen sie auf der Grundplatte mit vier M4-Schrauben in $BW_1 \dots BW_4$ an.

Für den *Kippausschalter* vorn unter der Grundplatte brauchen wir noch einen kleinen Winkel aus 1-mm-Eisenblech (Breite etwa 27 mm), ein Schenkel (zum Anschrauben mit Senkkopfschrauben an der Platte) 7 mm lang, der andere (zum Befestigen des Schalters, nach unten gerichtet) so lang, wie die Breite des Schalters es erfordert (beispielsweise 18 mm). Alle Metallteile werden wie üblich mit Aluminiumbronze gestrichen! Die Apparatklemmen erhalten ein Minusschild und ein Pluschild, die Telefonsbuchsen die Angabe der jeweiligen Meßbereiche. Der Kippausschalter wird bei Strommessungen in den Bereichen 2 A und 0,2 A geschlossen. Da die Anschlüsse für die Strommeßbereiche

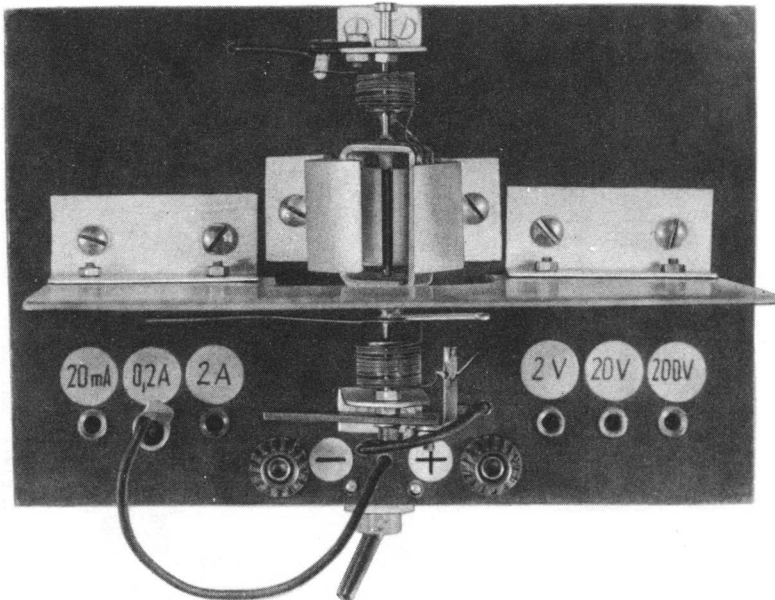


Bild 144. Ansicht des Drehspul-Meßgerätes von oben

links auf der Grundplatte liegen, befestigen wir den Ausschalter so, daß sein Hebel bei geschlossenem Schalter nach links zeigt. Für Spannungsmessungen und für die Strommessung im Grundbereich 20 mA wird der Schalterhebel nach rechts gelegt und der Schalter damit geöffnet. Den Messingschenkel des Nullpunkt-Einstellhebels verbinden wir über einen Bogen, der die freie Beweglichkeit des Hebels sichert, mit einem Pol des Ausschalters. Der andere Pol wird mit einer Apparatklemme verbunden. Vom Federanschlag am hinteren Lagerbock legen wir eine unmittelbare Leitung zur anderen Apparatklemme.

Die *Eichung* wird in der gleichen Weise wie beim Galvanometer durchgeführt:

Ableichen der Höchstwerte Spannung und Stromstärke, gegebenenfalls Ändern des Spulenwiderstandes durch kleinen Vorwiderstand oder durch großen Nebenwiderstand – je nachdem!

Wir stellen $U = 1\text{ V}$ am Vergleichs-Meßgerät (mit dem Schiebewiderstand) ein und drehen den Zeiger mit dem Nullpunkt-Einstellhebel genau auf die Skalenmitte; diese wird mit 1 V angezeichnet. Die Spannung wird weggenommen, und wir kennzeichnen den *Nullpunkt*. Dieser Arbeitsgang wird zur Sicherheit mehrmals wiederholt. Wir finden anschließend durch Einstellen der Spannung 0,2, 0,4, 0,6 . . . 2 V die übrigen Punkte der Skale und kennzeichnen sie. Die Striche werden zwischen den Bögen mit Tusche gekennzeichnet. Als Zahlen setzen wir 0, 2, 4, 6 . . . 20 über die dicken Striche.

Daß die Skale nicht ganz linear ist, liegt – wie schon erwähnt – an der zwangsläufig größeren Werkstattausführung des Meßgerätes; die Zwischenräume an der Spule sind verhältnismäßig groß, und das Magnetfeld ist nicht ganz so gleichmäßig, wie es theoretisch sein sollte. Trotzdem können wir noch gut an den Enden die Hälfte und nach der Mitte zu auch ein Viertel der Abstände zwischen zwei Teilstrichen ablesen; das genügt vollauf.

Meßbereichserweiterung: Erst rechnen – dann schalten

Die weiteren Meßbereiche erhalten wir nach der Schaltung im Bild 145, die den erwähnten Nachteil beim Bereichswechsel nicht mehr hat. In dieser Schaltung sind:

$$R_1 = 100 \text{ } \Omega \text{ (Innenwiderstand der Drehspule),}$$

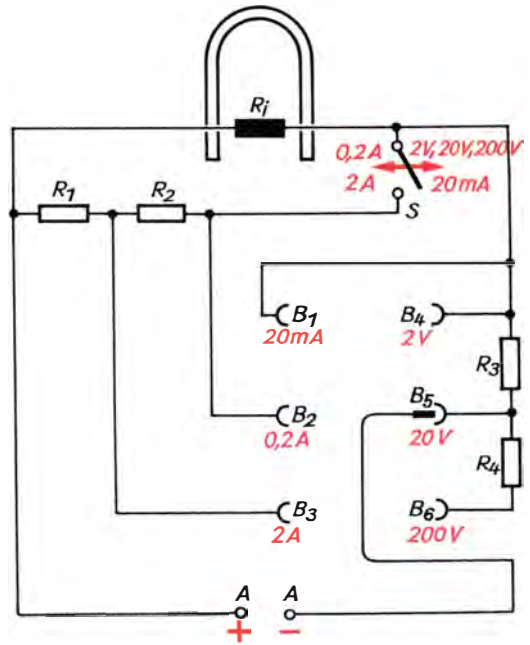


Bild 145. So werden die Widerstände der sechs Meßbereiche verdrahtet

$$R_1 = 1,11 \text{ } \Omega \text{ (aus 15,4 cm Konstantdraht, 0,30 mm Durchmesser),}$$

$$R_2 = 10 \text{ } \Omega \text{ (Schichtwiderstand, 0,5 W),}$$

$$R_3 = 900 \text{ } \Omega \text{ (Schichtwiderstand, 0,5 W),}$$

$$R_4 = 9 \text{ k}\Omega \text{ (Drahtwiderstand, 4 W),}$$

S : einpoliger Kippschalter.

Nach dieser Schaltung wird das Meßgerät auf der Unterseite der Grundplatte verdrahtet. Der Bananenstecker (im Bild bei 20 V) wird in die Buchse gesteckt, die zu dem gewünschten Meßbereich gehört. Die bewegliche Leitung (Litze) zum Stecker kommt aus der Grundplatte bei V vor dem vorderen Lagerbock heraus.

Zum Berechnen der Nebenwiderstände für die zusätzlichen Strommeßbereiche erinnern wir uns der Gesetzmäßigkeiten für die Parallelschaltung von Widerständen. Wir hatten experimentell herausgefunden, daß sich die einzelnen Ströme umgekehrt wie die zugehörigen Widerstände verhalten. Bezeichnen wir den Innenwiderstand mit R_i und den Nebenwiderstand mit R_x , so lautet hier die *Stromteilerregel*

$$\frac{R_x}{R_i} = \frac{I_i}{I_x}$$

Wir stellen nach R_x um und erhalten

$$R_x = \frac{I_1}{I_x} \cdot R_1.$$

Nach dem ersten Kirchhoffschen Gesetz gilt:

$I_x + I_1 = I$ bzw. $I_x = I - I_1$; das setzen wir für I_x ein:

$$R_x = \frac{I_1}{I - I_1} \cdot R_1.$$

Für den Meßbereich $I = 200 \text{ mA}$ ist deshalb

$$R_x = \frac{20 \text{ mA}}{200 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} \cdot 100 \Omega = \frac{1}{9} \cdot 100 \Omega = 11,1 \Omega.$$

Nach dem Schaltbild setzt sich R_x für den Meßbereich 200 mA aus den Teilwiderständen R_1 und R_2 zusammen. Wir halten also fest:

$$R_1 + R_2 = 11,1 \Omega.$$

Für den Meßbereich 2 A wird die Rechnung noch etwas komplizierter, da I_1 nicht nur über R_1 , sondern auch noch über R_2 fließt. Die Stromteilerregel lautet jetzt

$$\frac{R_x}{R_1 + R_2} = \frac{I_1}{I_x},$$

wobei $R_x = R_1$, $R_2 = 11,1 \Omega - R_1$ und $I_x = I - I_1$ ist. Diese drei Beziehungen setzen wir in die spezielle Stromteilerregel ein und erhalten

$$\frac{R_1}{R_1 + (11,1 \Omega - R_1)} = \frac{I_1}{I - I_1}.$$

Da der gesuchte Widerstand R_1 sowohl im Zähler als auch im Nenner des Bruches auf der linken Seite dieser Gleichung auftritt, müssen wir sie mit dem Hauptnenner – das ist hier das Produkt beider Teilnenner – multiplizieren und gleichzeitig kürzen; praktisch läuft das auf ein »Über-Kreuz-Multiplizieren« hinaus:

$$R_1(I - I_1) = (R_1 + 11,1 \Omega) \cdot I_1.$$

Nun multiplizieren wir noch die linke Seite dieser Gleichung aus und addieren auf beiden Seiten $I_1 \cdot R_1$:

$$R_1 \cdot I = I_1 (R_1 + 11,1 \Omega).$$

So erhalten wir schließlich

$$R_1 = \frac{I_1 (R_1 + 11,1 \Omega)}{I}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{20 \text{ mA} (100 \Omega + 11,1 \Omega)}{200 \text{ mA}} = \\ &= \frac{111,1 \Omega}{100} \approx 1,1 \Omega. \end{aligned}$$

Der Teilwiderstand R_2 muß dann $11,1 \Omega - 1,1 \Omega = 10 \Omega$ betragen.

Zum Erweitern der Spannungsbereiche brauchen wir Vorwiderstände. Die an den in Reihe geschalteten Widerständen abfallenden Spannungen verhalten sich wie die Widerstände (*Spannungsteilerregel*):

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{U_x}{U_1} \quad R_x = \frac{U_x}{U_1} \cdot R_1$$

Die Summe der Spannungsabfälle ist gleich der Gesamtspannung U .

$$U = U_1 + U_x \text{ (zweites Kirchhoffsches Gesetz)}$$

$$R_x = \frac{U - U_1}{U_1} \cdot R_1$$

Soll der Meßbereich auf 20 V erweitert werden, so brauchen wir den Vorwiderstand

$$R_x = \frac{20 \text{ V} - 2 \text{ V}}{2 \text{ V}} \cdot 100 \Omega = 9 \cdot 100 \Omega = 900 \Omega.$$

Für den Meßbereich 200 V wollen wir diesen Vorwiderstand (900Ω) mit verwenden; wir zählen ihn zum Innenwiderstand hinzu. Wir müssen daher auch die Spannung dieses Meßbereiches in die Rechnung einbeziehen:

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{200 \text{ V} - 20 \text{ V}}{20 \text{ V}} \cdot (100 \Omega + 900 \Omega) \\ &= \frac{180}{20} \cdot 1000 \Omega = 9 \text{ k}\Omega. \end{aligned}$$

Die handelsüblichen Widerstände weisen *Toleranzen* (Abweichungen vom aufgedruckten Wert) auf. Wir müssen sie daher, um ein genau anzeigendes Meßgerät in allen Meßbereichen zu haben, noch korrigieren. Dadurch erhalten wir die errechneten Werte. Das geschieht grundsätzlich ebenso wie beim Abgleichen des Spulenwiderstandes im Grundmeßbereich.

Damit haben wir alle nötigen Meßgeräte aufgebaut, die wir für unsere Modelle und für viele andere Zwecke brauchen. Der nun folgende Teil des Buches wird sich in vielerlei Formen mit der Nachrichtentechnik beschäftigen.

5. Kapitel

Informationen werden übertragen

Elektronen bringen Nachrichten in alle Welt

Beim Bau der Modelle aus der Nachrichtentechnik gehen wir nach der historischen Entwicklung vor und wenden uns zunächst dem elektrischen Telegraf, dann dem Fernsprecher zu. Die Geschichte des Telegrafen ist besonders reizvoll und lehrreich. Die ersten Versuche der Menschen, sich mit Hilfe des elektrischen Stromes über größere Entfernungen schnell zu verständigen, führten zu Lösungen, die heute seltsam anmuten. Der elektrochemische Telegraf von *Sömmering* (1809) ist dafür ein vorzügliches Beispiel. Der erste elektromagnetische Telegraf, von *Gauß* und *Weber* in Göttingen 1833 erfunden und auch lange Zeit benutzt, war noch zu umständlich. Auch die dann folgenden Nadel- und Zeigertelegrafen eignen sich für uns nicht so gut zum Bau wie das klassische Gerät, dessen Urform heute noch in neuzeitlichen Ausführungen erkennbar ist, der *Morsetelegraf*.

Der Morsetelegraf

Unser Modell geht auf eine Konstruktion des Amerikaners *Samuel Morse* (1791–1872) zurück. Nachdem er 1832 einige Experimente mit einem Elektromagneten gesehen hatte, entschloß er sich, ein Gerät zum Übermitteln von Nachrichten herzustellen. 1835 hat er ein Modell gebaut, das – natürlich später oft und geschickt verbessert – schon alle wesentlichen Teile enthielt, aus denen ein heutiger Telegraf dieser Bauart besteht. *Telegraf* kommt vom griechischen »tele« – fern, weit und »gráphein« – schreiben; ein Gerät, mit dem man in die Ferne schreiben kann. Der Grundgedanke ist, alle Buchstaben, Zahlen und Zeichen in verschiedene Zusammenstellungen von *Punkten* und *Strichen* umzuwandeln, die man als *kurze* und *lange Stromstöße* leicht übertragen kann. Am Ankunftsort wird das »Morsetelegramm« in die normale Schreibweise zurückübersetzt. Das Morsealphabet lernen wir noch kennen.

Die Morsetaste

Sie ist nach Bild 146 sehr leicht zu bauen; wir fangen mit ihr an. Auf einer Grundplatte mit drei Apparatklemmen ist ein Kontakthebel mit einem Arbeitskontakt und einem Ruhekontakt angeordnet

Bild 146. Unsere Morsetaste

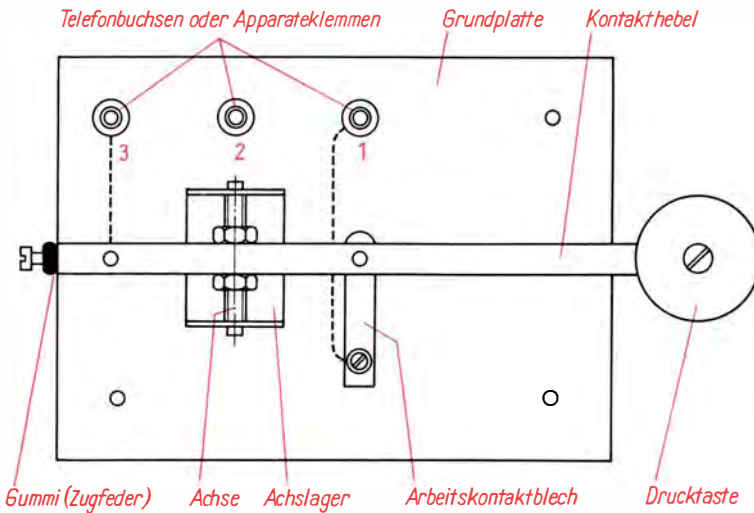
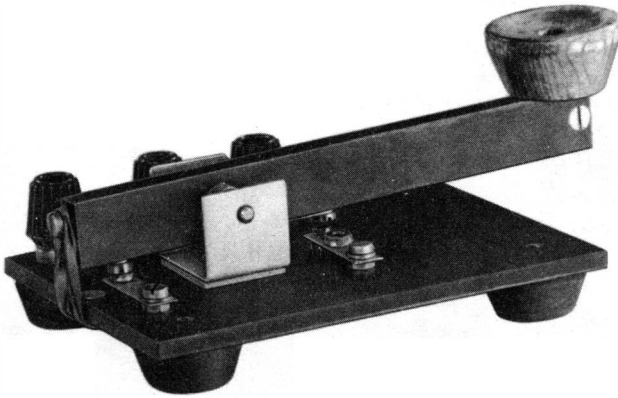


Bild 147. Prinzipskizze der Morsetaste

(Bild 147). Der Arbeitskontakt (etwa in der Mitte) gibt die Stromstöße zur Gegenstation durch; der geschlossene Ruhekontakt (am Ende des Hebels) läßt die Stromstöße der anderen Station zu uns durch. Die Grundplatte aus Hartpapier (4...6 mm dick) wird nach Bild 148b bearbeitet.

Der Kontakthebel aus Hartpapier (6 mm dick) erhält nach Bild 148d eine 5-mm-Achsbohrung AB und M3-Gewindebohrungen für den Druckknopf K, die beiden Kontaktschrauben AK und RK und für die Schraube R, die den Rückhol-Schnips-gummi oben festhält. Den Druckknopf (Tasterknopf) fertigen wir nach unseren Möglichkeiten und nach unserem Geschmack an. Zu beachten ist dabei: Holz ist gut geeignet. Der Knopf wird mit

einer Senkkopfschraube in K angeschraubt und oben ein wenig ausgehöhlt, damit die Fingerkuppe beim Telegrafieren voll aufliegt. Danach richtet sich auch die Größe der oberen (schön geglätteten und möglichst lackierten) Fläche (bis 30 mm Durchmesser). Nach dem Hebel zu verjüngt sich der Knopf; am oberen, schön abgerundeten Rand können wir einige Millimeter den größten Durchmesser beibehalten. Wir beachten: Die Taste wird beim Geben leicht zwischen Daumen und Mittelfinger gehalten (wobei der Zeigefinger auf dem Knopf liegt) und aus dem lockeren Handgelenk heraus niedergedrückt. Damit man schnell geben kann, muß der Abstand beim Arbeitskontakt (Geberkontakt) sehr klein sein, nur etwa 0,5 mm.

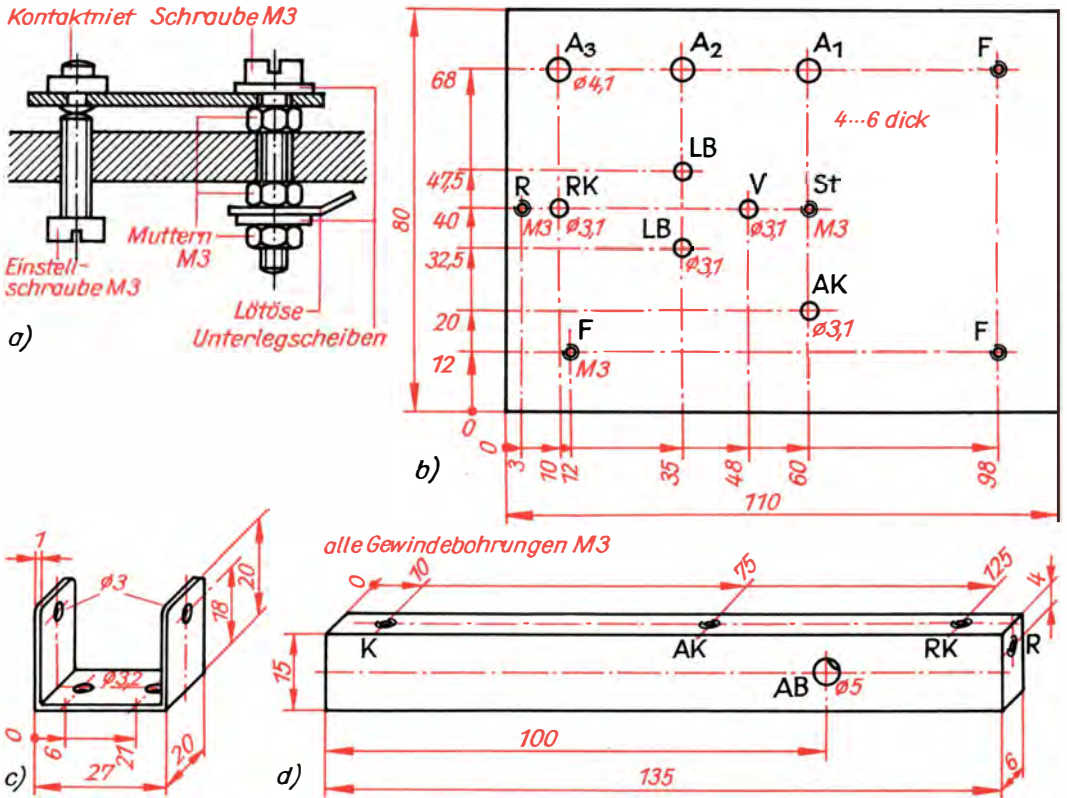


Bild 148. Bauteile der Morsetaste: a) Montage des Arbeitskontaktes, b) Grundplatte, c) Lagerbock, d) Kontakthebel: A₁ . . . A₃ Apparateklemmen, F GummifüÙe, AK Arbeitskontakt, St Stellschraube zum Arbeitskontakt, V DurchlaÙ für Verbindungsleitung, LB Lagerbock des Hebels, RK Ruhekontakt, R M3-Schraube für Schnipsgummi oder Zugfeder

Die Achse ist ein Messing- oder Eisenstab von 35 mm Länge mit M5-Gewinde. Beide Enden verkürzen wir auf je 5 mm Länge mit 3 mm Durchmesser ohne Gewinde (abdrehen oder abfeilen). Wir befestigen diese Achse mit zwei Muttern M5 in der Achsbohrung des Kontakthebels. Der Lagerbock aus 1 mm dickem Eisenblech wird nach Bild 148c angefertigt. Als Kontaktschrauben verwenden wir Messingschrauben M3 mit Halbrundköpfen oder, wenn wir die nicht haben, mit Zylinderköpfen. Den Arbeitskontakt müssen wir aus den genannten Gründen verstellbar einrichten. Dazu nehmen wir

einen Streifen Federmessingblech (Taschenlampenbatterie), 30 mm lang, mit einer 3-mm-Bohrung an jedem Ende – 5 mm von der Schmalseite entfernt. Bild 148a zeigt, wie der Messingstreifen bei der Montage an der Grundplatte verschraubt wird. Am anderen Loch löten wir den unteren Teil des Arbeitskontaktes an (verkürzte Messingschraube oder Unterbrecherkontakt). An dieser Schmalseite wird das Federblech abgerundet.

Wir sind fertig zur Montage:

Die drei Apparateklemmen (oder Telefonbuchsen) in A₁, A₂ und A₃ und die vier GummifüÙe in F an der Grundplatte befestigen, dabei wird der eine Fuß gleich mit A₃ verschraubt.

Von der Unterseite die M3-Schraube R (für Rückstelligummi) und die Stellschraube zum Arbeitskontakt in St einschrauben.

Von oben die Arbeitskontaktfeder in AK so befestigen, wie es Bild 148a zeigt.

Dann folgt die Ruhekontaktschraube in RK; die

obere Fläche des Schraubenkopfes liegt etwa 4 mm über der Grundplatte.

In AK wird der federnde Arbeitskontakt so angebracht, daß der Kontakt genau über der Stellschraube in St liegt.

In LB und LB wird der Lagerbock befestigt.

Nun verbinden wir die beiden Kontaktschrauben an der (schmalen) Unterseite des Kontakthebels mit einem blanken Kupferdraht und löten in der Mitte, also unterhalb der Achsbohrung, ein etwa 80 mm langes Stück isolierte Litze an (Bild 149a).

Dann folgt: Einsetzen der oberen Halteschraube M3 für den Rückstellgummi in R und des Knopfes (mit einer M3-Schraube) in K; die Achse haben wir bereits in AB festgeschraubt.

Wir bringen diese Achse in den Lagerbock, der dazu vorübergehend etwas aufgebogen wird; sie muß dort ohne wesentliches Spiel leicht drehbar sein.

Die Litze führen wir in einem Bogen (weil sich der Hebel bewegt) durch V an der Unterseite der Grundplatte zur mittleren Klemme A₂.

Der Arbeitskontakt AK wird mit A₁, der Ruhekontakt RK mit A₃ verbunden (Bild 149b).

An den Halteschrauben R (Grundplatte) und

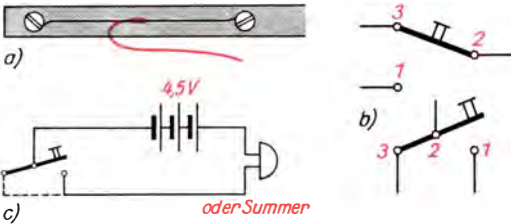
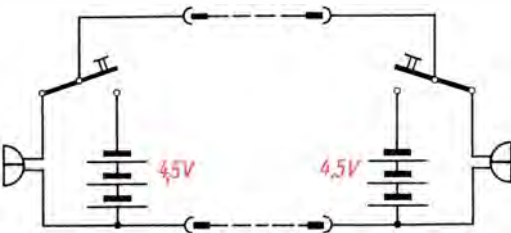


Bild 149. Verdrahtung am Kontakthebel (a), zwei mögliche Schaltungs-Darstellungen der Morsetaste (b) und Schaltung zur Funktionsprüfung (c)

Bild 150. Telegraf-Gegenverkehr mit Summer



R (Hebel) wird ein Schnipsgummi so eingehängt, daß der Hebel leicht niedergedrückt werden kann, der Ruhekontakt aber sofort nach Loslassen der Taste wieder mit dem nötigen Andruck geschlossen wird; das Gummiband wird vermutlich mehrmals um die Schrauben geführt werden müssen.

Nach Einstellen (mit Stellschraube) des Abstandes zwischen den beiden Teilen des Arbeitskontaktes auf etwa 0,5 mm in Ruhestellung ist die Morsetaste fertig, und wir kommen zur *Funktionsprüfung* nach Bild 149c. Eine Klingel oder ein Summer wird über beide Kontakte der Taste mit einer Stromquelle verbunden. Wir prüfen, ob beide Kontakte, sauber voneinander getrennt, den Stromkreis richtig (und abwechselnd) schließen und öffnen.

Zu einem Gegenverkehr zweier Telegrafestationen brauchen wir *zwei* Morsetasten als Geber – und *zwei* Morseschreiber als Empfänger! Wer nicht abwarten kann, hat die Möglichkeit, mit zwei Morsetasten und zwei Summern (und selbstverständlich zwei Spannungsquellen) schon einen Gegenverkehr aufzubauen (Bild 150). Aber wir sind dann auf unser Gehör angewiesen, und das Mitschreiben ist für den Anfänger sehr anstrengend. Der im Telegrafieren Geübte allerdings nimmt die Hörzeichen mühelos auf. Im öffentlichen Telegrafverkehr wurde seit 1880 lange Zeit der »Klopfer« (der nur die Bewegungen des Ankers hören ließ) und seit 1925 der Summer benutzt. Unsere Ansprüche liegen höher; wir wollen nicht nur die Zeichen schreiben, sondern mit Hilfe unseres Fernschalters womöglich auch die »Gegenstation« selbst ein- und ausschalten, wenn sie nicht besetzt ist.

Der Morseschreiber

Er fällt (als zweiter Teil des Morsetelegrafen) konstruktiv dadurch auf, daß alle seine Teile auf einer senkrechten Montageplatte angeordnet sind, die ihrerseits auf einem einfachen Grundbrett steht. Bild 151 zeigt die Gesamtansicht.

Wir beginnen mit dem *Grundbrett* aus Holz (15 mm dick, Bild 152). Es hat drei 4,2-mm-Bohrungen: eine (Mo) zum Befestigen unserer elektrischen Maschine I als Antriebsmotor und zwei (BS₃ und BS₄) für ein Befestigungsholz (Holzquader, Bild 153), mit dem die Montageplatte später auf dem Grundbrett mit Senkkopfschrauben M4 (damit nirgendwo Kratzer entstehen) verschraubt wird.

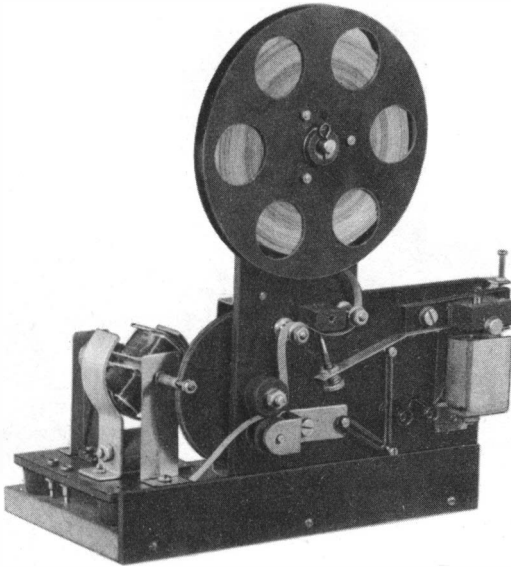


Bild 151. Unser Morseschreiber

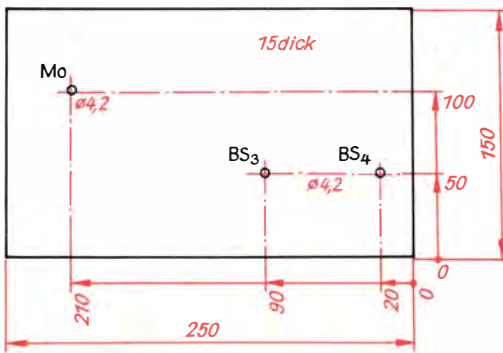
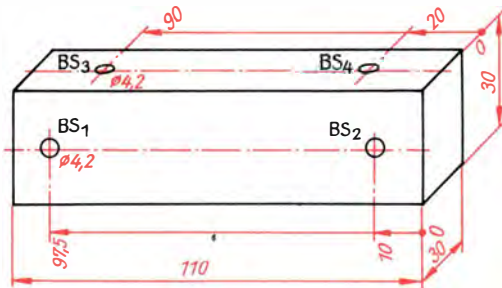


Bild 152. Grundbrett des Morseschreibers

Bild 153. Befestigungsholz



Wir schrauben beide Teile zusammen und legen sie einstweilen beiseite.

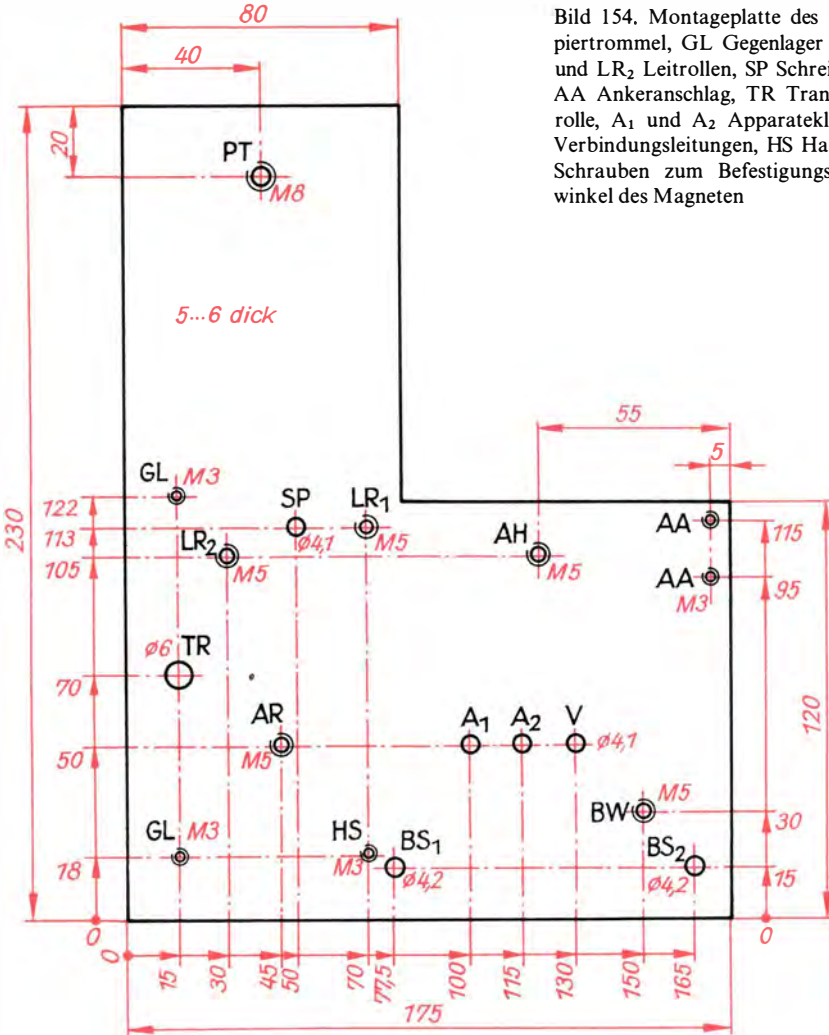
Die *Montageplatte* aus 5...6 mm dickem Hartpapier (Bild 154) ist sechseckig. Der Ansatz oben ist für die Lagerung der Papiertrommel bestimmt. Die beiden Apparateklammern setzen wir in A_1 und A_2 ein, ebenso die Halteschraube in HS – lang herausragend und mit einer Mutter gesichert.

Die einzelnen Bauteile bauen wir der Reihe nach und montieren sie gleich anschließend: Elektromagneten, Anker, Schreibeinrichtung und Papiertransport. Der *Elektromagnet* erhält einen Außenpol aus Weicheisen nach Werkstattnorm N_5 (Bild 8) mit folgenden Maßen in mm: $a = 34$; $b = 45$; $c = 30$; $d = 2$; $e = 6$; $f = 17$; $g = 15$. Der dazugehörige Befestigungswinkel aus Weicheisen wird nach N_6 mit folgenden Maßen in mm hergestellt: $a = 34$; $b = c = 30$; $d = 2$; $e_1 = 6$; $e_2 = 5,2$; $f_1 = 17$; $f_2 = 10$; $g_1 = g_2 = 15$ (bei $h_1 = h_2 = 0$). Der Spulenkörper (Hülse aus Papier, Seiten aus Pappe, alles schellackiert) wird nach N_2 mit folgenden Maßen in mm gebaut: $a_1 = 30$; $a_2 = 12$; $a_3 = 10$; $c = 40$; $d = 2$. Er erhält eine Wicklung von 1000 Windungen CuL 0,50. Die Drahtenden werden mit Isolierschläuchen gesichert, die Spule wird mit schellackgetränktem Papier umhüllt. Der Spulenkern (Innenpol) aus Weicheisen, nach N_4 anzufertigen, hat folgende Maße in mm: $a_1 = 10$; $a_2 = M6$; $b_1 = 53$; $b_2 = 43$; das Gewinde ist 10 mm lang. Wir setzen den Elektromagneten zusammen und befestigen ihn mit dem Winkel mit einer Schraube M5 auf der Montageplatte in BW – mit den offenen Polen nach oben; die Drahtenden führen wir durch V zu den beiden Apparateklammern.

Die Schreibeinrichtung

Der *Anker* besteht aus einem Weicheisen-Ankerstab, einem Ankerblock (Hartpapier) und einem zweiteiligen Ankerhebel aus Hartpapier und Stahlblech (Bild 155). Der Stab sitzt im Block und im Hartpapierende des Hebels; am anderen Hebelende ist der Schreibstifthalter angebracht. Der *Ankerstab* ist eine kleine Walze aus Weicheisen, 35 mm lang (10 mm Durchmesser) mit einer radialen Gewindebohrung M3 genau in der Mitte, 17,5 mm von beiden Enden entfernt. Der Block, ein Quader aus Hartpapier, Hartholz oder Aluminium ist 15 mm × 22 mm × 30 mm groß (Bild 156a) und mit drei M3-

Bild 154. Montageplatte des Morseschreibers: PT Papiertrommel, GL Gegenlager der Transportwelle, LR₁ und LR₂ Leitrollen, SP Schreibplatte, AH Ankerhebel, AA Ankeranschlag, TR Transportrolle, AR Andruckrolle, A₁ und A₂ Apparatklemmen, V Durchlaß für Verbindungsleitungen, HS Halteschraube, BS₁ und BS₂ Schrauben zum Befestigungsholz, BW Befestigungswinkel des Magnetens

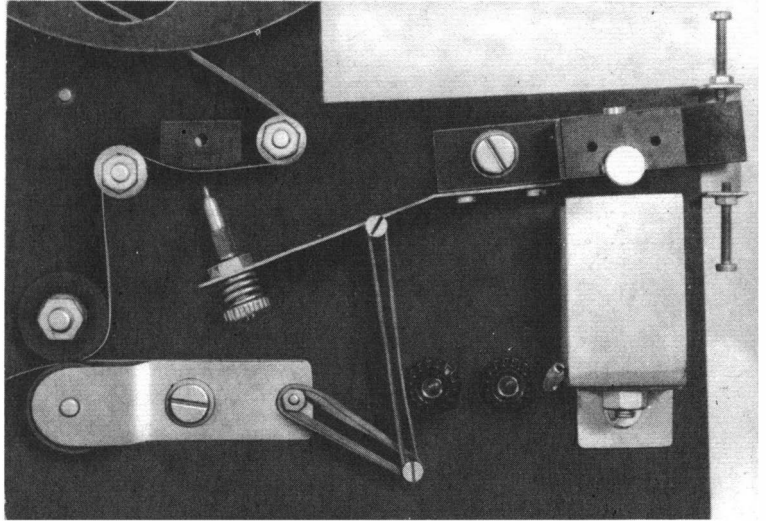


Gewindebohrungen versehen, die beiden äußeren senkrecht zu der mittleren für die Schraube zum Ankerstab. Für diesen Stab ist eine Bohrung von 10 mm Durchmesser nötig: Sie ist an einer Seite des Blockes offen, weil der Stab hier 3 mm herausragen soll, um einen guten Kontakt zu den Magnetpolen zu bekommen.

Wir finden diese »offene« Bohrung – ebenso wie die (allerdings gewindelosen) Löcher für zwei der M3-Schrauben im Hartpapierteil des Ankerhebels wieder (Bild 156b). Damit beide Teile, Hebel und Block, tadellos zusammenpassen, bohren wir das

10-mm-Loch bei beiden gleichzeitig! Zunächst fertigen wir den Hebelteil bis auf dieses Loch an – aus Block auf dem Hebelteil fest, B₁ auf B₁ und B₂ auf B₂. Die M3-Schrauben stecken wir durch die Bohrungen im Hebel. Das 10-mm-Loch können wir so noch nicht bohren, ohne daß der Bohrer »verläuft« und der Werkstoff reißt. Deswegen legen wir neben Hebel und Block einen gleichhohen Quader aus Hartholz oder Hartpapier, und zwar an die Seite des zu bohrenden Loches. Alles wird in einer Zwinde verspannt – und nun können wir sauber bohren.

Bild 155. Lage von Anker- und Schreibhebel



Der Anker wird dann (von oben) im Block mit einer M3-Schraube festgeschraubt. Der Eisenteil des Ankerhebels ist unser *Schreibhebel* aus federndem Stahlblech, beispielsweise von einer Klammer für Einkochgläser (Bild 157a). Er ist 67 mm bzw. 30 mm von seinen Enden entfernt um etwa 14° abgebogen. Nach Bild 157b wird 20 mm von der Biegestelle entfernt unten eine Halteschraube M3 für die Rückstellfeder angelötet. Auf die große Bohrung (am Ende des längeren Schenkels) löten oder kleben wir oben eine Mutter M6 auf. Dann schrauben wir den Schreibhebel unten am Hartpapier-Ankerhebel an.

Um den gesamten Ankerschreibhebel zu vervollständigen, bauen wir gleich anschließend den *Schreibstifthalter*. Wir bohren der Länge nach mitten durch eine (mit Kopf) 15 mm lange M6-Zy-

linderkopf-Schraube ein Loch für einen gewöhnlichen Bleistiftminen-Einsatz eines Zirkels. Der Durchmesser muß dem des Einsatzes entsprechen (meist zwischen 3,2 und 4,5 mm); wir nehmen einen mit möglichst kleinem Durchmesser. Den Schraubenkopf feilen wir auf 4 mm ab, bis der Schlitz verschwunden ist, runden die Kanten ab und bringen mit einer Vierkantfeile eine Rändelung (zahnradähnlich) auf dem Umfang an. Der Zirkel-Mineneinsatz wird nun in die Bohrung von der Gewindegewinde her fest hineingesteckt; wir können dann eine Mine vom Schraubenkopf her einführen. Ist diese Mine zu hart, so reißt das Papier, denn der Stift muß immerhin mit einiger Federkraft angedrückt werden, wenn er schreiben soll. Eine zu weiche Mine zerbricht dabei. Gut geeignet ist der Härtegrad 2B! Wir runden die Mine oben an der Spitze

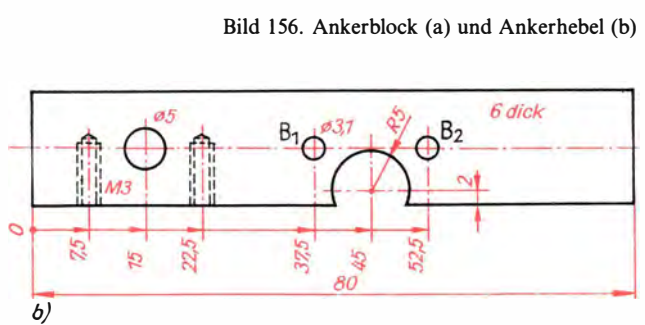
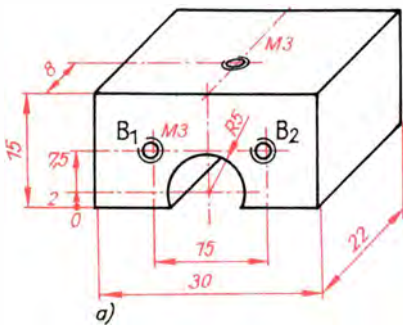


Bild 156. Ankerblock (a) und Ankerhebel (b)

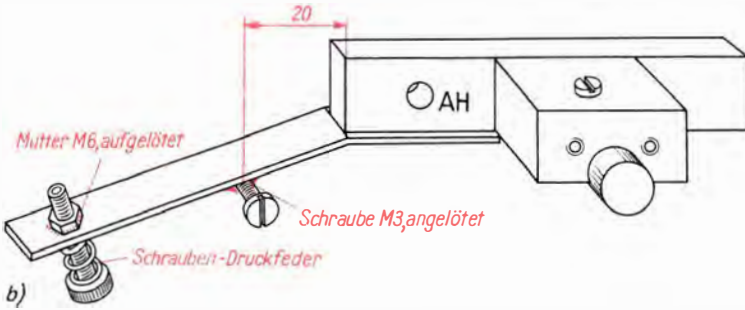
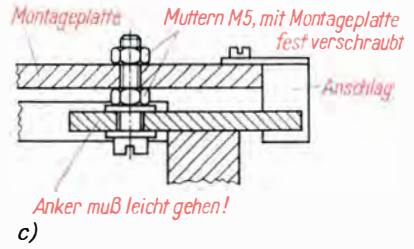
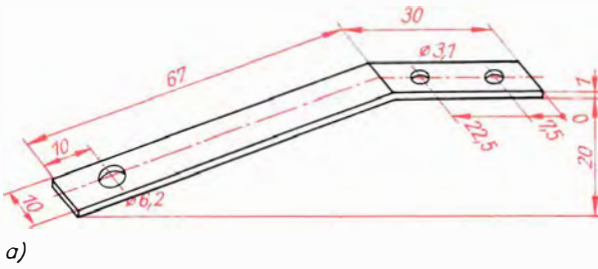
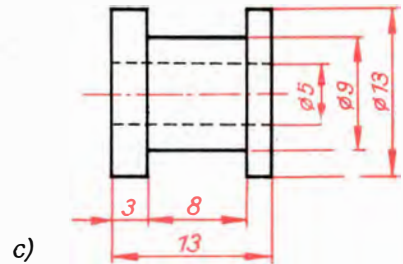
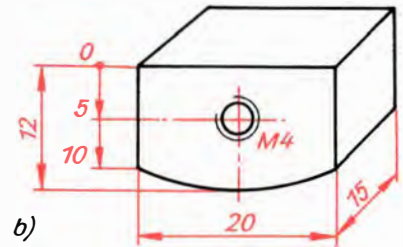
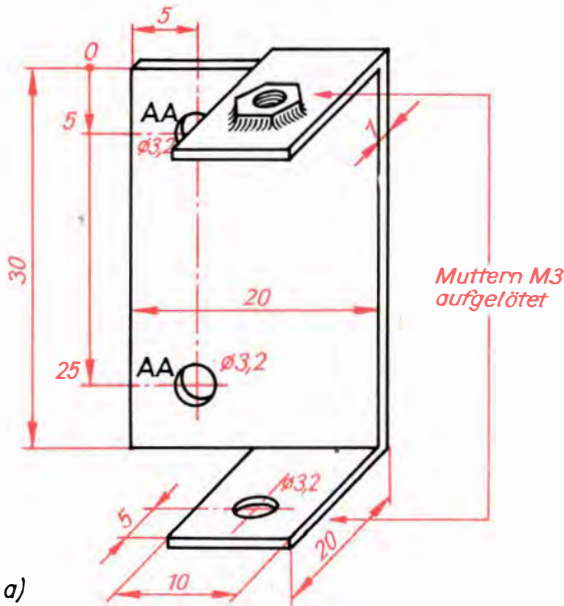


Bild 157. Montage des Anker- und des Schreibhebels: a) Schreibhebel, b) so werden Anker- und Schreibhebel miteinander verschraubt, c) Lagerung des Ankerhebels

Bild 158. Teile des Morseschreibers: a) Ankeranschlag, b) Schreibplatte, c) Leitrolle



leicht an. Um die Lage des Halters zu sichern, legen wir zwischen Schraubenkopf und Hebel noch eine kurze, aber kräftige Druckfeder (eine Gegenmutter ist umständlicher zu handhaben, wenn wir die abgenutzte Mine etwas nachstellen wollen).

Den fertigen Anker- und Schreibhebel montieren wir (Bild 157c) leicht beweglich auf der Montageplatte in AH. Die Achse, eine (mit Kopf) mindestens 15 mm lange M5-Schraube, befestigen wir mit zwei Muttern an der Montageplatte; dann folgen (von hinten nach vorn) eine Unterlegscheibe, der Hebel, eine zweite Unterlegscheibe und der Schraubenkopf.

Der Ankerstab muß alle Polenden des Magneten gleichzeitig berühren können. Die Bewegung des Ankers muß nun nach oben und unten begrenzt werden. Der Weg soll nicht zu groß sein, und der Ankerstab darf im Betrieb die Pole nicht berühren, weil er dann leicht »kleben« bliebe. Dazu brauchen wir einen *Ankeranschlag* aus 1 mm dickem Eisenblech nach Bild 158a. Über die Bohrung in der oberen Zunge und unter die Bohrung in der unteren Zunge wird je eine M3-Mutter gelötet. Der Anschlag wird auf der Montageplatte bei den Gewinden AA angeschraubt; dann setzen wir die beiden Anschlagsschrauben M3 ein.

Zum Schreiben braucht man eine Schreibunterlage, die leicht gerundete *Schreibplatte* aus Hartpapier oder Aluminium (Bild 158b). Am M4-Gewinde schrauben wir die Schreibplatte an der Montageplatte in SP fest. Zum Schreiben ist ein Papierstreifentransport notwendig. Der von oben aus der Trommel kommende Streifen soll unter der rechten Leitrolle, unter der Schreibplatte entlang und über die linke Leitrolle, unter der Schreibplatte entlang

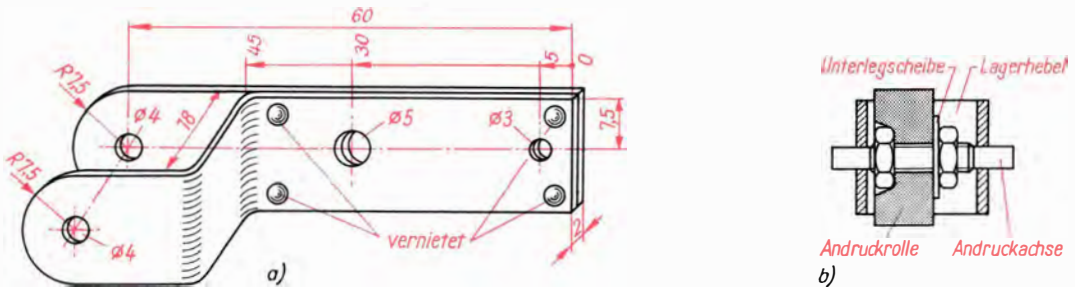
und über die linke Leitrolle hinweg zu den Gummierollen (Transportwelle und Andruckrolle) laufen.

Die beiden *Leitrollen* werden nach Bild 158c aus einem Aluminiumstab von 13 mm Durchmesser in fünf Arbeitsgängen hergestellt:

1. Bohren. Wir reißen die Mitte an, indem wir den Meßschieber auf den halben Durchmesser (also 6,5 mm) einstellen und ihn an den sauber gefeilten Querschnitt (die Stirnseite) des Stabes seitlich mit einem Schenkel anlegen. Der andere liegt auf der Kreisfläche des Querschnittes – genau auf einem Durchmesser. Mit der Reißnadel reißen wir diesen Durchmesser an. Das wiederholen wir mehrmals, indem wir jedesmal den Meßschieber an eine andere Stelle des Umfanges legen. Der Schnittpunkt der Durchmesser ist der gesuchte Mittelpunkt.
2. Die breite Nut einfeilen. (Mit einer Drehmaschine geht's leichter!)
3. Absägen.
4. Stirnseiten eben feilen.
5. Entgraten. Die Leitrollen werden mit M5-Schrauben oder entsprechenden Gewindebolzen an der Montageplatte (LR₁ und LR₂) angeschraubt. Die stärkere Seite jeder Rolle liegt zur Platte hin; zwischen beide wird eine Unterlegscheibe gesetzt. Die Rollen müssen sehr leicht laufen, die Gewinde dagegen sollen sehr fest sitzen (auf der Rückseite der Platte durch je eine Mutter sichern).

Bewegt wird der Papierstreifen wie ein Magnetband im Tonbandgerät: durch ein *Transportrad* und ein *Andruckrad*, beides weiche, 12 mm hohe Gummwalzen (20 mm Durchmesser) mit einer Längsbohrung von 6 mm Durchmesser. Wir können sie aus Gummifüßen zurechtschneiden; diese haben gleich die Senkung, die wir für eine Mutter brauchen. Löcher in Korken und Gummi schneidet man mit einem *Korkbohrer* der Chemiker. Er be-

Bild 159. Am Andruck-Lagerhebel (a) wird die Andruckrolle (b) befestigt



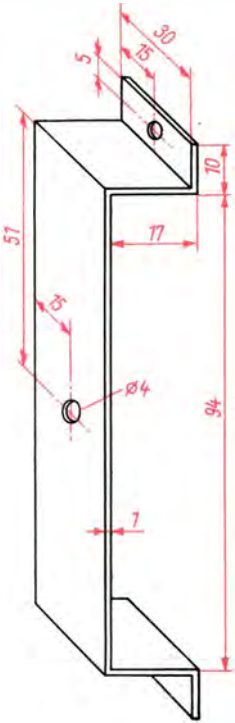
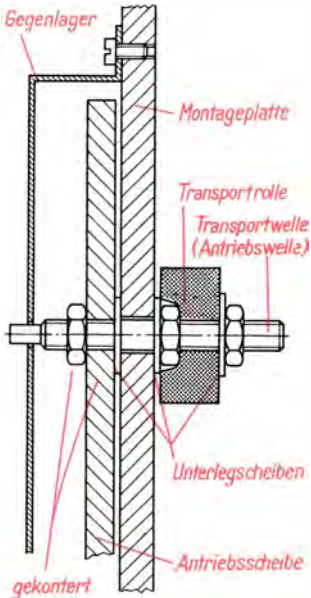


Bild 160. Gegenlager der Transportwelle

Bild 161. Montage des Antriebs



steht aus einem Satz kleiner Hartmessingrohre, die unten angeschliffen und oben mit einem Griff versehen sind. Bild 159b zeigt die Form der Rollen. Während die Transportrolle auf der Antriebswelle befestigt wird, wird die Andruckrolle leicht beweglich in einer drehbaren Lagergabel angeordnet, die zugleich Andruckhebel ist (Bild 159a). Dieser *Andruck-Lagerhebel* wird aus zwei 1 mm dicken Eisenblechstreifen gefertigt (gebohrt, gebogen und vernietet). In der 3-mm-Bohrung am Ende des Hebels ist eine M3-Schraube einzulöten – als Halteschraube für die Andruckfeder. Statt der Schraube können wir auch einen gleichstarken Stift mit Kopf nehmen.

Die *Andruckachse* besteht aus einem 25 mm langen Eisenstab mit M6-Gewinde; er wird an einem Ende auf 2 mm Länge, am anderen Ende auf 5 mm Länge zu Lagerzapfen verjüngt, beide mit 4 mm Durchmesser. Das übrigbleibende Gewinde ist 18 mm lang. Die Andruckrolle wird nach Bild 159b auf der Andruckachse mit zwei Muttern befestigt; die verjüngten Achsenden (Zapfen) stecken wir in die Lagerbohrungen der Gabel: den kurzen Zapfen in den geraden Streifen, den längeren in den abgebogenen Schenkel. Das ganze Andrucksystem wird in AR auf der Montageplatte mit einer M5-Schraube – zwischen zwei Unterlegscheiben – leicht drehbar angeschraubt. Die Schraube darf (mit Kopf) nur 13 mm lang sein und muß fest im Gewinde der Platte sitzen.

Die *Transportwelle (Antriebswelle)* ist ein 48 mm langer Eisen- oder Messingstab von 6 mm Durchmesser. Von beiden Enden aus wird auf 20 mm Länge ein M6-Gewinde auf den Stab geschnitten, so daß in der Mitte 8 mm frei bleiben. Ein Ende wird auf 5 mm zu einem Lagerzapfen von 4 mm Durchmesser verjüngt (abgefeilt oder abgedreht); das Gewindestück ist hier danach nur noch 15 mm lang.

Wir bauen gleich noch die übrigen Teile zum Antrieb, zu dem ja auch die Transportwelle gehört: zunächst die *Antriebscheibe* aus Hartpapier (6 mm dick). Sie ist kreisrund mit einem Durchmesser von 90 mm. In der Mitte hat sie eine Gewindebohrung M6. Diese Scheibe läuft später als Reibungsrad (mit Gummiband auf dem Umfang); sie muß daher sehr genau (möglichst auf der Drehmaschine) gearbeitet werden.

Zum Wellenlager in der Montageplatte (in TR) gehört ein *Gegenlager* der Transportwelle. Es wird

nach Bild 160 aus 1 mm dickem Eisenblech geschnitten, gebohrt und gebogen und dann – wie alle außenliegenden Metallflächen unserer Modelle – mit Aluminiumbronze gestrichen.

Alle Antriebsteile werden nach Bild 161 an der Montageplatte (in TR) zusammengesetzt. Über die Antriebscheibe ziehen wir ein flaches Gummiband. Die Unterlegscheiben (0,8 . . . 1 mm dick) zwischen der Transportrolle und der Montageplatte sowie zwischen dieser und der Antriebscheibe haben außen 15 mm und innen 6,2 mm Durchmesser. Das Gegenlager wird hinter der Platte in GL und GL mit M3-Schrauben befestigt.

Den Abschluß der Bauteile bildet die drehbare *Papiertrommel* (Abwickeltrommel) auf ihrer Achse. Die *Trommelachse* besteht aus Eisen, Messing oder Aluminium mit 8 mm Durchmesser und 43 mm Länge. 5 mm vor dem einen Ende bohren wir ein radiales Loch mit 2 mm Durchmesser für einen Splint, den wir aus Eisendraht biegen. Das andere Ende erhält auf einer Länge von 15 mm ein M8-Gewinde. Als Trommel nehmen wir eine Spule, wie sie in Tonbandgeräten verwendet wird. Die Achse schrauben wir bei PT in die Montageplatte, so daß sie (ohne Gewinde) 26 mm vorn herausragt, und sichern sie auf der Rückseite mit einer Mutter; die Bohrung für den Splint muß senkrecht stehen.

Wir können die Trommel auch aus zwei Hartpapierscheiben (1,5 mm dick, 150 mm Durchmesser) herstellen. Jede Scheibe erhält dann auf einem Kreis von 100 mm Durchmesser sechs (auszusägende) Löcher von 35 mm Durchmesser. Den Abstand beider Scheiben hält im Mittelpunkt eine runde Hartpapierscheibe (8 mm dick, 50 mm Durchmesser). Sie hat zum Einfädeln des Papierstreifens einen radialen Einschnitt (10 . . . 15 mm tief). Alle drei Scheiben erhalten im Mittelpunkt eine Bohrung von etwa 4 mm Durchmesser. Dann werden sie auf einem Bolzen zusammengesteckt. Wir bringen dazu auf einem Kreis von 40 mm Durchmesser drei gleichweit voneinander entfernte 3-mm-Bohrungen an, die auf einer Seite (später der Montageplatte zugewendet) versenkt werden. Die Scheiben werden mit M3-Senkkopfschrauben verschraubt; die Achsbohrung ist zum Schluß auf 8 mm Durchmesser aufzubohren.

Nummehr wird die Trommel mit Papierband bespult. Dazu eignen sich vom letzten Fasching Papierschlängen, die weißen, gelben und roten besonders gut. (Blau und Grün verschlucken die Blei-

stifttriche.) Die einzelnen Bänder werden aneinandergeliebt. Dann schieben wir die volle Papiertrommel auf ihre Achse und fädeln das freie Papierende ein: unter der rechten Leitrolle und unter der Schreibplatte, über die linke Leitrolle nach unten und von rechts zwischen die Gummierollen. Schließlich spannen wir noch die Rückstellfeder und die Andruckfeder (oder zwei Schnipsgummis): zwischen der Halteschraube in HS und dem Gewindebolzen am Andruckhebel sowie zwischen der Halteschraube und der angelöteten Schraube am Schreibhebel.

Die nunmehr voll bestückte Montageplatte wird mit Hilfe des Befestigungsholzes auf dem Grundbrett angeschraubt; Holz und Platte mit zwei M4-Schrauben in BS₁ und BS₂, Holz und Grundbrett desgleichen in BS₃ und BS₄.

Prüfen und Einstellen (Justieren)

Beim Drehen der rückseitigen Antriebscheibe darf das Papierband nicht aus den Rollen herauslaufen. Die Andruckrolle soll mit einer Kraft von etwa 1,5 N (≈ 150 p) an die Transportrolle angedrückt werden (mit Zugkraftmesser einstellen); entsprechend sind die Wendefeder oder das Gummiband zu wählen. Die Zugkraft der Rückstellfeder am Schreibhebel ist ebensogroß. Die Papiertrommel wird mit Hilfe von Unterlegscheiben (an beiden Seiten) auf der Achse leicht beweglich so angeordnet, daß während des Betriebes das Papier nicht aus den Rollen laufen kann – nicht zu weit nach hinten oder nach vorn. Bei dem abgebildeten Modell sind die hinteren Unterlegscheiben zusammen 4 mm, die vorderen 3 mm dick. Zum Schluß wird der Splint von oben eingesetzt.

Dann nehmen wir die Schreibmine aus ihrem Halter heraus und prüfen noch einmal, ob der Anker alle Polenden zugleich berühren kann. Nun schrauben wir die untere Anschlagsschraube so weit hoch, bis der Anker von den Polenden abgehoben wird und ein Luftspalt von 0,4 . . . 0,6 mm entstanden ist (mit zwei bis drei Lagen Zeichenkarton messen). Wir geben den Anker frei und schließen über die Morsetaste eine 4,5-V-Batterie an. Dann schrauben wir die obere Anschlagsschraube langsam nach unten und stellen durch ständig wiederholtes kurzes Drücken der Taste fest, bei welcher Schraubenlage der Anker gerade eben angezogen wird. Wir drehen die

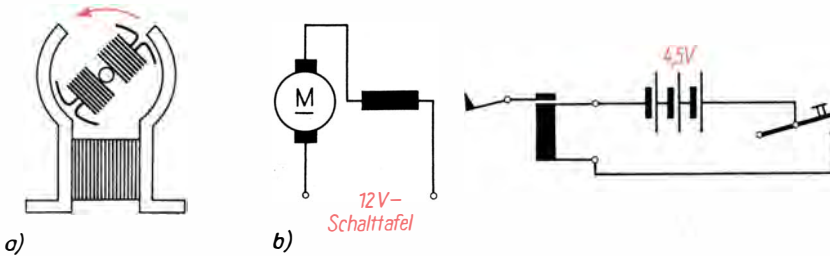


Bild 162. Funktionsprüfung des Morseschreibers: a) Selbstanlauf-Läuferstellung, b) Schaltung

Schraube nun noch einen Millimeter tiefer und lassen sie in dieser Stellung. Sollte eine Schraube zu leicht gehen, so müssen wir sie mit einer Gegenmutter feststellen. Zum Schluß wird die Schreibmine in ihren Halter eingesetzt, und zwar so hoch, daß sie bei angezogenem Anker gerade Papier und Schreibplatte erreicht (gegebenfalls Schreibhebel nachbiegen!). Dann drehen wir die Mine noch 1...2 mm höher.

Der Morseschreiber ist nun fertig – bis auf den Antrieb. Die Antriebscheibe mit dem Gummiband ist so bemessen, daß sie unmittelbar durch die Welle unserer elektrischen Maschine I angetrieben werden kann, wenn wir über diese Welle ein Stück Gummischlauch (Außendurchmesser etwa 5 mm) schieben. Das ist das einfachste *Reibungsgetriebe*. Die elektrische Maschine I wird dabei auf Kommutator und Hauptschluß geschaltet. Der herausragende Wellenteil erhält den erwähnten Gummischlauch, der fest aufsitzen muß. Der Motor wird auf dem Grundbrett so angeschraubt, daß die Welle mit dem Gummischlauch an die Antriebscheibe gedrückt wird. Die Motorgrundplatte erhält dazu in der Mitte (dicht neben der Feldspule) eine Gewindebohrung M4 für eine (mit Kopf) 36 mm lange Senkschraube, die von der Unterseite des Grundbrettes bei Mo eingeführt wird. Die Gewindebohrung liegt 51 mm von der Kommutatorschmalseite der Motorgrundplatte oder 59 mm von der Schmalseite unter dem Antriebsrad entfernt. Dank der Reibung der Gummifüße genügt diese eine Schraube. Die sehr starke Untersetzung der Drehzahl sorgt für die nötige geringe Geschwindigkeit bei der Bewegung des Papiers.

Als Endkontrolle führen wir die *Funktionsprüfung* nach Bild 162b durch. Läuft der Motor in der falschen Richtung, so wird entweder der Läufer oder

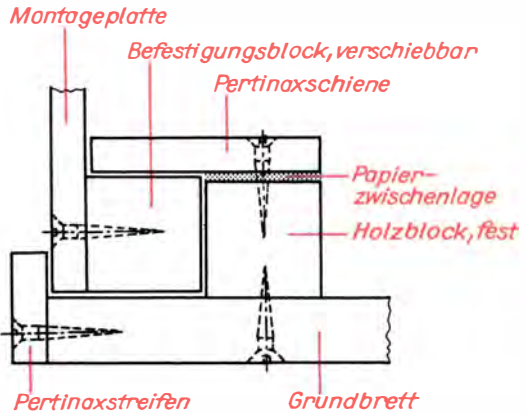


Bild 163. Die Montageplatte läuft in einer Führung

die Spule umgepolt. Unser kleiner Motor ist bei 12 V — als Antrieb gut zu verwenden, hat aber einen Nachteil: Er läuft nur bei einer bestimmten Läuferstellung an (Bild 162a). Darauf müssen wir also achten, vor allem auch, wenn eine Station zeitweise unbesetzt ist und der Empfänger dann durch den Fernschalter ein- und ausgeschaltet wird. Das entfällt, wenn wir die größere Maschine II mit dem Trommelläufer benutzen; sie hat keine »toten« Stellungen. Viele Leser werden irgendwo noch einen kleinen Motor haben, der sich auch als Antrieb eignet; Hauptsache, er ist kräftig genug, und wir können mit einem Gummischlauch auf seiner Welle die nötige Untersetzung der Drehzahl erreichen. Ein Langsamläufer ist einem Schnellläufer vorzuziehen.

Wer keine Möglichkeit hatte, die Antriebscheibe auf einer Drehmaschine abzdrehen, und eine etwas unrunde Scheibe hat, braucht eine zusätzliche Einrichtung, um die beiden Räder ständig im Reibungskontakt zu halten. Eine Lösung zeigt Bild 151: Die Montageplatte ist zwischen zwei Schienen auf dem Grundbrett verschiebbar. Ein Gummiband

zieht die Platte zum Motor hin und sorgt dafür, daß die Antriebscheibe immer an die Motorwelle gedrückt wird. Die vordere Schiene ist ein Hartpapierstreifen (5 mm dick, 40 mm hoch), der so lang wie das Grundbrett ist. Damit die Platte nicht wackelt, wird auf ihrer Rückseite unten ein hölzerner Befestigungsblock angeschraubt (Querschnitt: 18 mm breit, 28 mm Höhe; 115 mm lang). Dieser Block läuft neben einem gleichgroßen Holzquader, der mit dem Grundbrett verschraubt ist, und unter einer Hartpapierplatte, die auf diesem Quader befestigt ist (Bild 163). Das Zuggummiband ist am inneren Ende der Hartpapierplatte und an der rechten oberen Ecke der Montageplatte (hinter dem Ankeranschlag) angebracht.

Wir können auch den Motor an der Schmalseite des Grundbrettes um eine Achse kippbar machen, so daß sein Wellenende mit einem Teil des Motorgewichtes angedrückt wird. Als dritter Ausweg sei ein drittes Reibrad mit beispielsweise 20 mm Durchmesser erwähnt, das zwischen Welle und Scheibe, aber etwas oberhalb der Verbindungslinie beider, eingeschaltet und durch eine einfache Vorrichtung ständig nach unten gedrückt wird.

Mit dem Morse-Telegrafen können wir jetzt bereits (einseitig) telegrafieren. Die Schaltung für einen Gegenbetrieb mit zwei Morseschreibern entnehmen wir Bild 150; wir ersetzen darin die Summer durch die Schreiber. Der Nachteil einer solchen Anlage ist, daß beide Stationen nur zu verabredeten Zeiten miteinander telegrafieren können. Um den Kollegen der Gegenstation zum Einschalten des Motors zu

veranlassen, geben wir mehrere kurze Stromstöße durch; er wird dann als Zeichen, daß er verstanden hat, beispielsweise das Zeichen v (. . . —) senden.

Zwei Telegrafstationen im Gegenbetrieb

Bild 164 gibt eine Schaltung an, mit der der Motor der Gegenstation ein- und ausgeschaltet werden kann. Die beiden selbstgebauten *Fernschaltrelais* brauchen eine höhere Spannung als die Schreibmagneten. Die Schaltung berücksichtigt das schon. Legen wir den Hebel des Umschalters U kurzzeitig auf A, so schaltet das Relais der Gegenstation einen Schritt weiter; der Motor dort wird angelassen oder ausgeschaltet. Zum Telegrafieren (Geben und Empfangen) muß U auf T stehen. Als Umschalter eignet sich vorzüglich eine weitere Morsetaste.

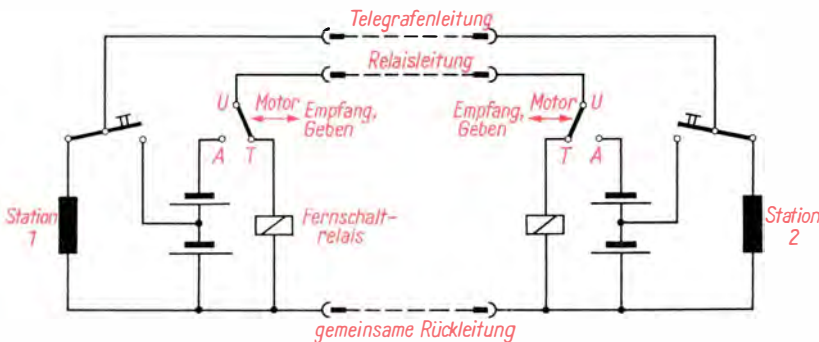
Bild 165 zeigt alle Einzelheiten der Schaltung einer Telegrafstation mit *Fernschaltrelais*. Außer der Schalttafel-Stromquelle sind zwei (in Reihe geschaltete) Taschenlampenbatterien nötig.

Nun kann der Telegrafie-Betrieb beginnen. Dafür brauchen wir aber noch das bereits zu Anfang des Kapitels genannte *Morsealphabet*:

Buchstaben

a . .	g	o	ü
ä	h	ö	v
b	i . .	p	w
c	j	q	x
ch	k	r	y
d . . .	l	s	z
e . .	m . . .	t . . .	
f	n . . .	u . . .	

Bild 164. Zwei Morse-Telegrafstationen im Gegenverkehr



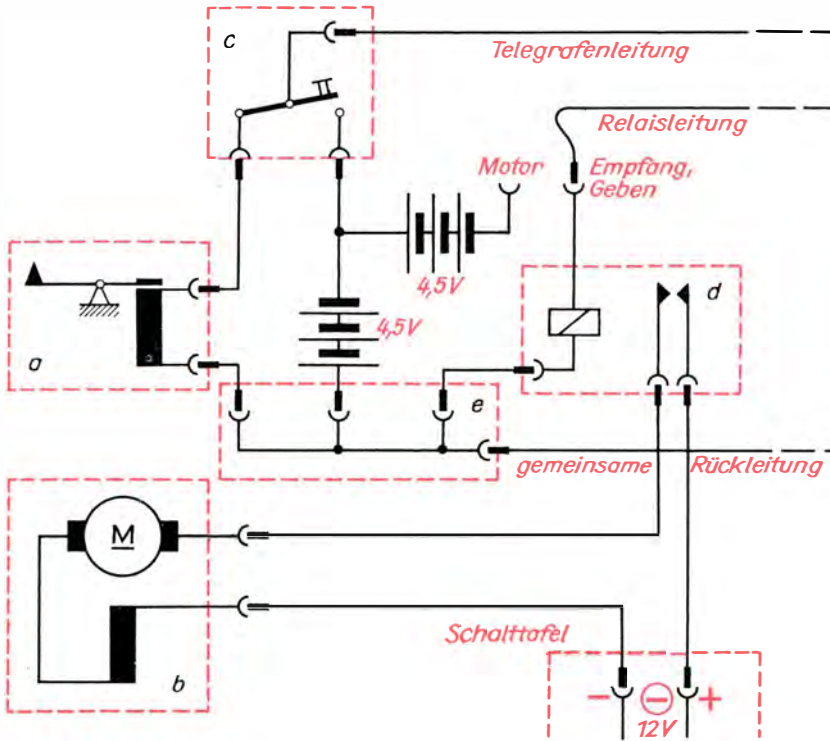


Bild 165. Schaltung einer Telegrafestation mit Fernschaltrelais: a) Morseschreiber, b) elektrische Maschine II, c) Morsetaste, d) Fernschalter, e) Verteilerbrett

Ziffern

1	-----
2	.....
3	.....
4	.....
5	.....
6	.....
7	.....
8	.....
9	.....
0	-----

abgekürzt

1	---
2	---
3	---
4	---
5	---
6	---
7	---
8	---
9	---
0	-

Unterscheidungs- und andere Zeichen

.	Punkt	.....
,	Komma	-----
:	Doppelpunkt	.....
?	Fragezeichen	.....
-	Bindestrich	.....
—	Unterstrich	.....
/	Bruchstrich	.....
SOS	Notruf	.....

Wir bauen eine Fernsprechanlage

Im Jahre 1860, wenige Jahrzehnte nach Moses erster Konstruktion des Telegrafen, baute der deutsche Physiklehrer *Philipp Reis* (1834–1874) die erste *Fernsprechanlage* der Welt. Der Schotte *Graham Bell* (1847–1922), der als Taubstummenlehrer in Amerika lebte, erfand 1876 den *Fernhörer* mit einem Elektromagneten und bald darauf die Bauart mit einem Dauermagneten; ein solcher Hörer wurde zum Geben (Hineinsprechen) und zum Hören benutzt. Der Engländer *David Edward Hughes* (1831 bis 1900), Professor für Physik und Mechanik in

Amerika, erfand 1877 das *Kohlemikrofon*. Er hatte erkannt, daß die im Fernhörer von Bell durch Induktion (Magnetfeld mit Spule und beweglicher Eisenmembran) entstandenen Sprechströme für größere Entfernungen zu schwach waren. Auch die Geschichte dieses Gerätes ist sehr aufschlußreich.

Wir wollen vier Fernhörer bauen – zwei für einen Kopfhörer und zwei für eine Fernsprechanlage mit zwei Stationen; alle sollen in Lautstärke und Klangreinheit den handelsüblichen Ausführungen entsprechen. Das ist bei sauberer Arbeit ohne große Schwierigkeiten zu erreichen. Für die beiden Mikrofone (von denen wir zwei brauchen) kaufen wir die Hauptsache, die *Kapsel* mit Membran und Kohlekörnern, besser fertig im Handel. Für diejenigen Leser, die auch das Mikrofon (griech. mikros = klein, wenig; phoné = Stimme, Ton, Schall) selbst bauen wollen, folgt zusätzlich eine Bauanleitung.

Fernhörer und Mikrofon

Beinahe »Serienproduktion«: vier Fernhörer

Bild 166 zeigt die Einzelteile des Fernhörers. Wir kaufen in einem Schreibwarengeschäft sieben Anfeuchtedosen (Innendurchmesser der Dose 50 mm. Außendurchmesser 55 mm, Höhe 20 mm), die sich vorzüglich als *Einbaudosen* für Fernhörer und Mikrofon eignen und aus denen wir die Schwämme entfernen. Jede Dose erhält im Abstand von 20 mm vom Mittelpunkt des Dosenbodens zwei einander genau gegenüberliegende Bohrungen (3,2 mm Durchmesser), der Abstand der Bohrungen voneinander ist 40 mm. Diese Löcher sind für die Be-

Bild 166. Einzelteile unseres Fernhörers

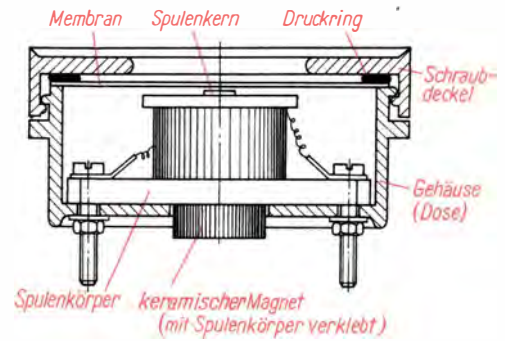
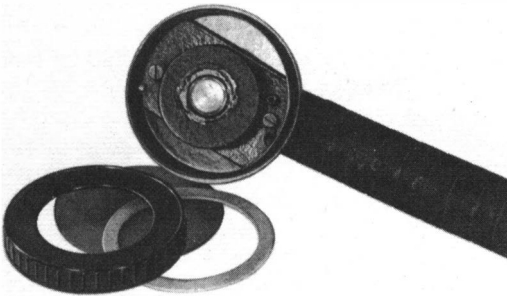


Bild 167. Querschnitt durch den Fernhörer

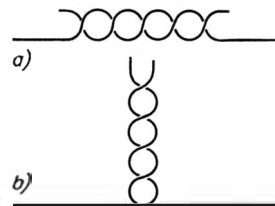


Bild 168. Richtiges (a) und falsches (b) Verdrillen des Spulendrahtes

festigungsschrauben für Spule und Halter bestimmt. Ein weiteres Loch wird im Mittelpunkt des Dosenbodens ausgearbeitet: bei vier Dosen (für Fernhörer) mit 21 mm Durchmesser, bei zwei Dosen (für handelsübliche Mikrofonkapsel) mit 5 mm Durchmesser und bei einer Dose (für Selbstbau-Mikrofon) mit 3,2 mm Durchmesser.

Für die *Spulenkern* besorgen wir uns einen Weicheisenstab (10 mm Durchmesser, etwa 60 mm lang). Von ihm müssen später vier Stücke von 14 mm Länge abgesägt werden. Vorher fertigen wir darauf die vier Spulenkörper nach N₃ (Bild 8) an, damit Kern und Spule nachher gut zusammenpassen. Die Hülse ist aus gerolltem Zeichenkarton, die einzelnen Lagen werden mit Alleskleber verleimt. Eine Spulenstirnseite besteht aus festem Karton (1,5 mm dick), die andere ist doppelt so dick, also zwei Lagen zusammenleimen. Die Maße sind (nach N₃) in mm: $a_1 = 30$; $a_2 = 12$; $a_3 = 10$; $b_1 = 49$; $b_2 = 40$; $b_3 = 30$; $c = 13,5$; $d_1 = 3$; $d_2 = 1,5$; $e = 3,2$.

Wir legen den Eisenstab beiseite, setzen die Spu-

lenkörper mit Alleskleber zusammen und tränken sie mehrmals mit Schellack. Nun muß alles 24 Stunden trocknen! Bild 167 zeigt, wie die Spule mit den übrigen Teilen des Fernhörers zusammengebaut werden soll. Außerdem sägen wir jetzt die vier 14 mm langen Spulenkern aus dem Weicheisenrohling. Die Schnittflächen müssen ganz eben und glatt sein; auch die Rundflächen werden sauber geputzt.

Sind die Spulen trocken, werden die Löcher für die Befestigungsschrauben und für die beiden Drahtdurchführungen gebohrt. Dann erhält jede Spule eine Wicklung von etwa 3500 Windungen (CuL Ω ,10). Die Abwickelrolle (Vorratsrolle) muß sich sehr leicht drehen, damit der dünne Draht nicht reißt. Geschieht das doch, so befreien wir die Drahtenden der Rißstelle von der Isolation, bestreichen sie mit Kolophonium und verzinnen sie. Dann werden die Enden nach Bild 168 sauber verdrillt und verlötet. Verdrillen nach Bild 168b führt zu erneutem Riß. Die Verbindungsstelle wird mit Alleskleber isoliert und muß einige Minuten trocknen. Die Windungszahl soll nicht erhöht werden, weil sonst der Widerstand zu groß wird, die Lautstärke wird dabei nicht größer!

Die fertigen Spulen setzen wir in ihre Gehäuse (mit der 21-mm-Bohrung im Mittelpunkt des Bodens) ein; die Befestigungsschrauben M3 werden mit Lötöse unter dem Kopf durch die Bohrungen gesteckt und mit Unterlegscheibe und Mutter festgezogen. Wir prüfen die Spulen auf Stromdurchgang mit einem unserer Meßgeräte und verlöten (wenn die Prüfung gut ausgefallen ist) jeden Spulenanfang und jedes Spulenende mit den zugehörigen Lötösen. Nun wird in jede Spulenöffnung ein Kern gedrückt. Das geht (infolge des Schellacks) etwas

schwer; der Kern sitzt dadurch ausreichend fest. Die richtige Höhe des Kernes prüfen wir nach Bild 169 mit dem Maßstab eines Meßschiebers, den wir quer über die Dosenöffnung legen. Zwischen Kern und Maßstabkante muß – gegen das Licht gesehen – deutlich ein kleiner Lichtspalt sichtbar sein! In die Öffnung am Boden jeder Dose setzen wir einen runden, vollen Dauermagneten (20 mm Durchmesser) und verkleben ihn dort mit der Unterseite des Spulenkernes. Der Kern ist nun selber zum Magneten geworden.

Jetzt die *Membran mit Druckring!* Wir brauchen fünf Stück für die vier Fernhörer und für das Selbstbau-Mikrofon. Die Membran ist ein kreisrundes Stück Weicheisenblech (52 mm Durchmesser, 0,1 bis 0,3 mm dick). Wir prüfen eine Konservendose (oder zwei, je nach Größe) mit einem Magneten, ob sie wirklich aus Eisenblech besteht, und schneiden sie ganz auf (mit Büchsenöffner den Boden entfernen und dann entlang der Lötstelle mit Blechschere aufschneiden). Dann wird das Blech vorsichtig glattgezogen (ohne Knick). Nun schneiden wir die fünf Membrane aus und entgraten sie mit einer Schlichtfeile. Die Druckringe sind aus Zeichenkarton: 0,4...0,8 mm dick; Durchmesser außen 52 mm, innen 44 mm; Breite 4 mm.

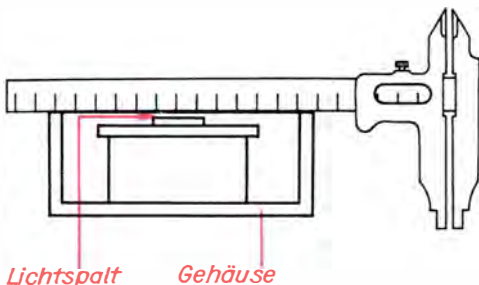
Wir setzen die Fernhörer zusammen:

- Membran auflegen,
- Druckring auf die Membran legen,
- Deckel des Gehäuses aufschrauben.

Zur *Funktionsprüfung* verbinden wir die herausragenden Schraubengewinde mit 1 V ~ (Schalttafel). Ein deutliches Brummen (50 Hz des Wechselstromes) muß zu hören sein. Dies ist das einzige Mal – bei der Probe der vier Fernhörer –, wo wir uns über dieses Brummen freuen! Später tun wir alles, um es zu unterdrücken.

Der Hörer hat aus gutem Grund einen *Dauermagneten* als Spulenkern. Da Sprechöne Wechselströme sind, würde ein Weicheisenkern bei jedem Wechsel der Stromrichtung ummagnetisiert werden – einmal ein Nordpol und dann wieder ein Südpol sein. Bei einer einzigen Schwingung würde die Membran zweimal angezogen werden, und die Schwingungszahl der Membran würde verdoppelt. Die um den Dauermagnetkern gelegte Spule verstärkt dagegen dessen Magnetfeld, wenn sie in einer Schwingungshälfte die gleiche Polarität hat, und sie schwächt es während der anderen Schwingungshälfte durch die jetzt umgekehrte Polarität. Die

Bild 169. So wird der Sitz der Spule geprüft



Polarität des Kernes bleibt grundsätzlich gleich; dadurch wird die Schwingung auch in ihrer Frequenz richtig übertragen. Für die Benutzung des Fernhörers als Mikrofon gilt sinngemäß das gleiche. Gelegentlich kann auch ein Gleichstromanteil ankommen, nämlich dann, wenn wir Fernhörer und Mikrofon mit einer Batterie in Reihe schalten. In diesem Falle könnten wir den Dauermagneten durch einen Weicheisenkern ersetzen, der durch den Gleichstromanteil des fließenden Gesamtstromes zum Elektromagneten wird.

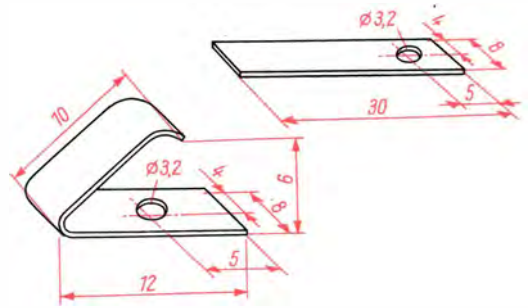


Bild 171. Gebogene und gerade Kontaktfeder

Wir bauen Mikrofone

Zunächst beginnen wir mit dem Bau eines Mikrofons mit einer handelsüblichen *Kapsel*. Die Schnittzeichnung (Bild 170) gibt alles Wesentliche an. Bild 171 enthält die Abmessungen der beiden *Kontaktfedern* (von Taschenlampenbatterien).

Zwei solcher Mikrofone setzen wir zusammen:

Die Federn mit Muttern, Unterlegscheiben und M3-Schrauben im Gehäuse befestigen;
Kapsel einsetzen;

Druckring auflegen, der aus isoliertem Schaltaht, 2 mm Gesamtdurchmesser, gebogen ist;
Gehäusedeckel aufschrauben.

Zur *Funktionsprüfung* schalten wir das Mikrofon in Reihe mit einem Fernhörer und einer Taschenlampenbatterie (4,5 V). Die Schalttafel können wir dazu nicht nehmen, weil der durch Gleichrichtung aus dem Wechselstrom entstandene Gleichstrom ein starkes Brummen bewirkt. Mikrofon und Fernhörer legen wir möglichst weit auseinander – viel-

leicht in zwei getrennte Zimmer. Wird in das schräg oder senkrecht gehaltene Mikrofon gesprochen, so muß das im Hörer gut zu hören sein. Prüfen wir ohne Helfer, so lassen wir das Mikrofon im Nebenzimmer vom Rundfunkempfänger »beschallen«.

Nun das *selbstgebaute Mikrofon* für die ehrgeizigen Leser (Bild 172)! Membran und Druckring sind die gleichen wie beim Fernhörer. Bild 173 zeigt Aufbau und Wirkungsweise des Gerätes. Der Strom der Spannungsquelle fließt, wie wir wissen, über den Fernhörer und über das Mikrofon, beide in Reihe geschaltet. Im Mikrofon muß der Strom eine merkwürdige Wegstrecke überwinden: eine Menge kleiner Kohlekörner zwischen einer »Pfanne« mit dem Kopf einer Metallschraube und einem kleinen Kegel aus Kohle, der an einer Membran sitzt. Die »Kohlekörnerstrecke« bietet dem Strom einen gewissen Ohmschen Widerstand. Dieser ändert sich jedesmal, wenn sich die Körner auch nur ganz wenig bewegen – beispielsweise wenn man auf die Membran spricht und dadurch den in die Körner hineintragenden Kohlekegel mitbewegt. Im Rhythmus der Luftschwingungen (durch das Sprechen entstanden) schwingen die Membran und das Kegelchen, und im selben Rhythmus bewegen sich die Körner. Infolgedessen ändert sich die Stromstärke. Sehr wenig nur – aber der Fernhörer gibt die Änderungen getreu wieder, und die gleichen Schallwellen treffen das Ohr am Hörer, weil dessen Membran sie den Stromschwankungen entsprechend erzeugt. Die Form des Kegels ist eine listige Lösung: Die Spitze dringt leicht in die Kohlekörner ein, und der Kegelmantel bietet eine (verhältnismäßig) große Kontaktfläche.

Wir fertigen zunächst den kleinen *Kohlekegel* an

Bild 170. Querschnitt durch das Mikrofon mit Kapsel

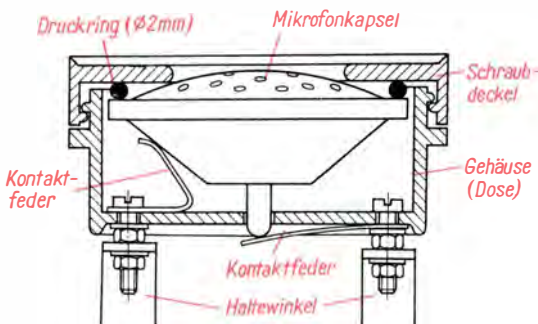


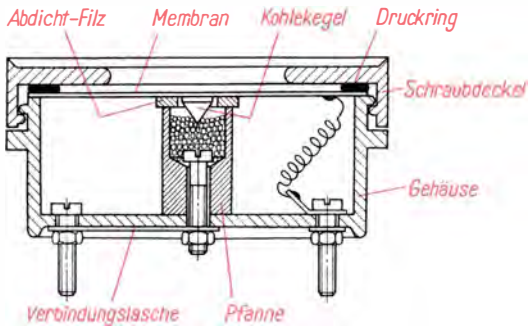
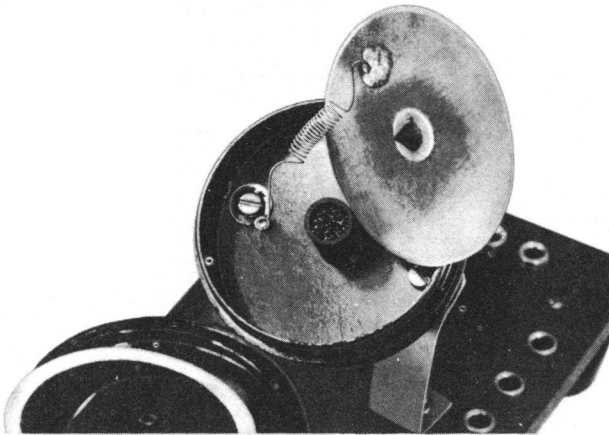
Bild 172. Ansicht unseres geöffneten Mikro-
fons

Bild 173. Querschnitt durch das Mikrofon

und löten ihn mitten auf der Membran fest. Das ist möglich, wenn wir seine Unterseite vorher ver-
kupfern! Ein Ende eines Kohlestabes (5 mm Durch-
messer) aus einer Taschenlampenbatterie wird zu
einem Kegel mit einem Winkel von 60° geschliffen
oder gefeilt. Den Kegel sägen wir 1 mm von seiner
Grundfläche entfernt vom Stab; seine so entstan-
dene Unterseite wird geebnet und nach Bild 174
galvanisch vercupfert:

Ein Stück Löschpapier, das auf einer Glasplatte
liegt, wird mit einer gesättigten Lösung von Kupfer-
sulfat (CuSO_4) angefeuchtet; das ist das »Elektro-
lysebad«. Als Katode wird die zu vercupfernde
Kegelunterseite, als Anode ein Kupferdraht-
ring auf das Löschblatt gelegt; beide werden einige Minuten
mit 4V — verbunden (Anode mit dem Pluspol).
Hat sich genügend Kupfer niedergeschlagen, wird
der Kegel auf (frischem) Löschpapier getrocknet.

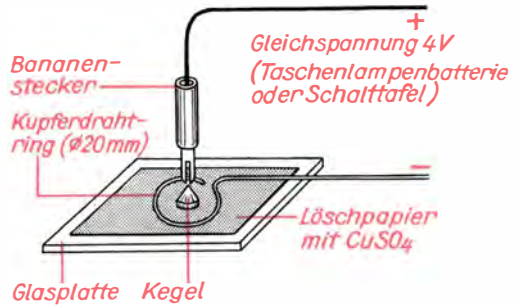


Bild 174. So wird der Kohlekegel vercupfert

Dann folgen:

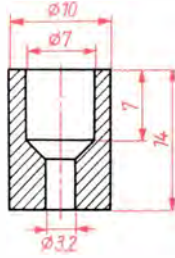
- Verzinnen der Membranmitte;
- Bestreichen der Kegelunterseite mit Lötlötfett;
- Aufsetzen des Kegels auf die Membran;
- diese wird über kleiner Gasflamme erwärmt, bis
das Lötzinn läuft;
- nach Abkühlen die Membran vorsichtig von Fett-
resten säubern.

Wenige Millimeter vom Rande entfernt (Bild 173)
wird eine Wendel aus dünnem Kupferlackdraht
(z. B. CuL 0,2) angelötet. Zum Schluß schieben wir
über den Kegel einen *Filzring* zum Abdichten: 1 mm
dick, Durchmesser außen 12 mm, innen 4,5 mm.

Der Gegenkontakt zum Kegel ist die *Pfanne*, die
nach Bild 175 aus 10 mm starker Bogenlampen-
kohle hergestellt wird:

- Auf Länge (14 mm) abschneiden,
- Stirnflächen schleifen,

Bild 175. Pfanne des Mikrofons



in eine Stirnseite etwa 8 mm tief ein 4-mm-Loch bohren, anschließend vorsichtig auf 7 mm aufbohren, mit 3,2-mm-Bohrer vollständig durchbohren.

Das ist nicht so leicht, wie es sich hier liest, denn Kohle bricht leicht; wir lassen uns jedoch nicht entmutigen und bohren ein neues Kohlestück, wenn es nötig ist.

Aus Messing- oder Aluminiumblech (0,4...1 mm dick) schneiden wir eine Verbindungslasche (28 mm lang und 12 mm breit). Sie erhält zwei Bohrungen 3,2 mm, die 20 mm voneinander und je 4 mm von den Laschenenden entfernt sind. Diese Enden schneiden wir noch rund (Radius 4 mm vom Mittelpunkt der Löcher). Die Pfanne wird mit einer M3-Anschlußschraube, Lasche und Mutter am Gehäuse verschraubt (Bild 173). Vorsicht beim Anziehen, damit die Pfanne nicht zerbricht! Nun setzen wir die zweite Anschlußschraube mit Lötöse im Gehäuse ein und löten die Wendel an der Öse an.

Jetzt der Kohlegrus (Grieß)! Von seiner Beschaffenheit sind Lautstärke und Klangreinheit des Mikrofons abhängig. Am besten ist der Kohlegrus aus einer beschädigten Mikrofonskapsel. Grus von harten Bleistiften (Graphit ist auch Kohle) und Bogenlampenkohlen wirken nicht gut. Besser eignet sich dazu die Kohle von Taschenlampenbatterien; wenn wir aus ihr mit der nötigen Sorgfalt die Körner her-

stellen, wird unser selbstgebautes Mikrofon ebenso gut wie eine gekaufte Kapsel arbeiten.

Der Grus wird so gewonnen: Den Kohlestab einer Batteriezelle in einem starken Leinenlappen mit dem Hammer zerschlagen. Um Körner gleicher Größe zu erhalten, sieben wir das Ergebnis in einem Küchensieb mit etwa 1 mm x 1 mm Maschengröße. Die zurückbleibenden Körner nochmals zerkleinern; erneut sieben. Wir wollen nur die größeren Körner benutzen und sieben alles durch ein Kaffeesieb mit engeren Maschen. Was hier im Sieb zurückbleibt, ist unser Kohlegrus; wir füllen ihn mit einem gefalteten Streifen Zeichenkarton vorsichtig in die Pfanne – bis etwa 3 mm unter den Rand, *nicht voll!* Die Körner sollen locker liegen.

Nun legen wir die Membran auf. Dabei muß der Kegel genau in die Pfanne passen, ohne sie zu berühren und damit einen Kurzschluß herbeizuführen. Dann folgt der Druckring, und schließlich wird der Gehäusedeckel aufgeschraubt.

Die Funktionsprüfung geht »wie gehabt« vor sich. Vorsichtiges Klopfen auf die Membran oder die Dose muß im Fernhörer gut zu hören sein. Ist das nicht der Fall, hilft meist ein vorsichtiges Schütteln des Mikrofons. Nützt das nichts, so müssen wir die Menge des Kohlegruses verändern – verkleinern oder vergrößern, je nachdem. Außer den Klopfgeräuschen muß ein leises Rauschen im Fernhörer zu erkennen sein. Zeigt die Klopfprobe ein gutes Ergebnis, so können wir Sprechversuche machen.

Zwei Fernhörer werden zu einem Kopfhörer

Mit einem Bügel aus Stahlfederblech verbinden wir nach Bild 176 zwei Fernhörer. Der Bügel ist 1 mm dick, 340...370 mm lang (je nach Kopfform) und 22 mm breit. Er hat zwei 4,2-mm-Bohrungen (10 mm



Bild 176. Unser Kopfhörer

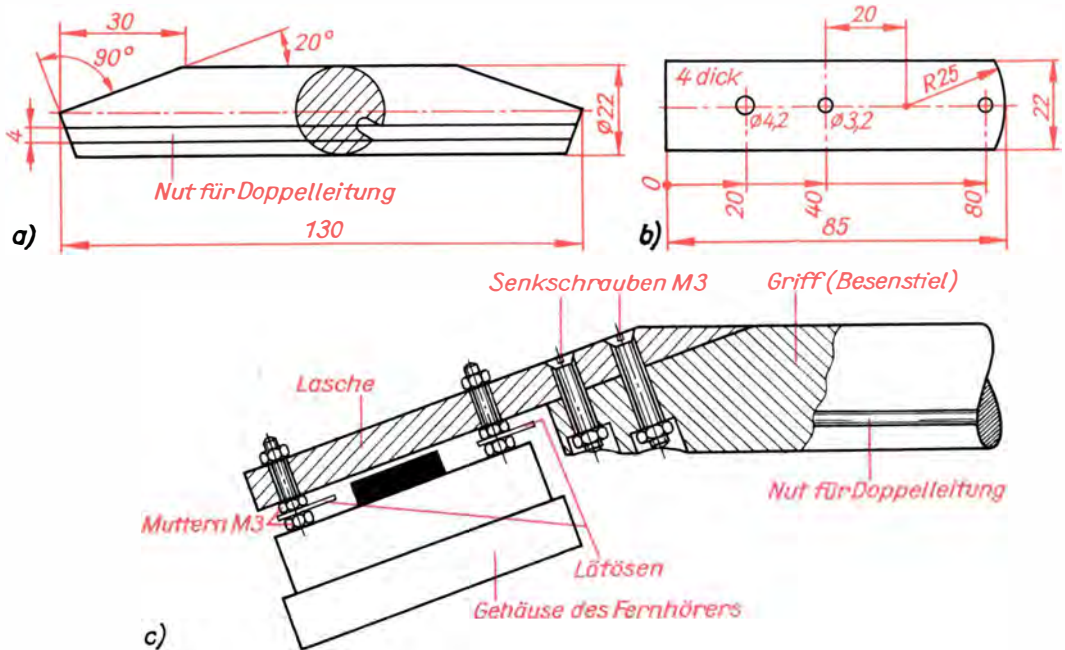


Bild 177. Hörergriff (a), Bügellasche (b) und Montage von Fernhörer bzw. Mikrofon (c)

von jedem Ende entfernt) zum Anschrauben der beiden *Laschen* (Bild 177b) aus 4 mm dickem Hartpapier. Die Laschen werden mit den beiden 3,2-mm-Bohrungen an den Anschlußschrauben der Fernhörer und mit der 4,2-mm-Bohrung an den beiden Bügelenden befestigt. Die abgerundete Seite schließt mit der Gehäuserundung ab. Ein durchgehender Metallbügel würde die Anschlußschrauben kurzschließen!

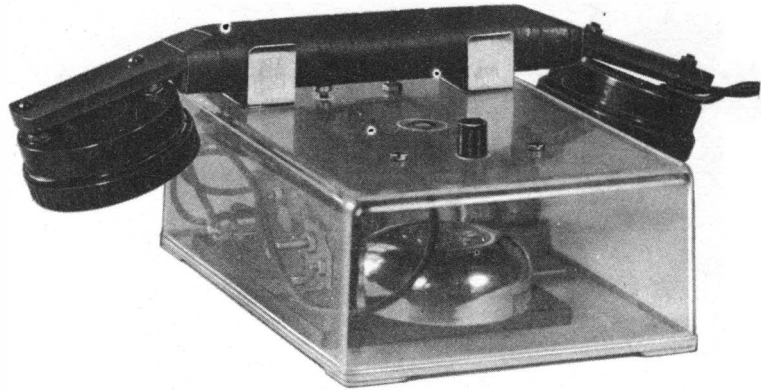
Die Spulen sind in Reihe zu schalten; die Verbindung einer Anschlußschraube des einen Hörers mit einer des anderen Hörers läuft innen am Bügel entlang und wird dort beispielsweise durch umwickeltes Isolierband festgehalten. An den beiden letzten Anschlußschrauben werden zwei Einzeldrähte (Litze), etwa 1 m lang, angeschlossen. Nach etwa 25 cm sind sie für die letzten 75 cm zu verdrehen oder durch Umwickeln mit Isolierband zusammenzufassen. Sie enden in Bananensteckern. Der ganze Bügel wird schwarz lackiert. Wir werden den Kopfhörer später auch für den Detektor-

empfänger brauchen; jetzt können wir bereits als *Funktionsprüfung* den Kopfhörer über eine lange Leitung bis in ein anderes Zimmer in Reihe mit einem Mikrofon und einer Taschenlampenbatterie schalten; der Sprechende muß im Hörer gut vernehmbar sein.

Die Fernsprechstellen

Wir wollen zwei *Fernsprechstellen* mit Hör- und Sprechgerät, Anruf und Batterie für Gegenverkehr aufbauen. Bild 178 gibt die Gesamtansicht einer Station wieder. Verstärker brauchen wir hierzu noch nicht. An Geräten haben wir dazu schon: zwei Fernhörer, zwei Mikrofone (mit Einbaukapsel), eine Klingel. Anzufertigen sind: eine zweite Klingel (falls wir nicht an ihrer Stelle einen Summer nehmen), zwei Umschalter, zwei Rufkontakte, zwei Hörergriffe. Dazu kommen zwei Taschenlampenbatterien 4,5 V und als Gehäuse (Fernsprechkästen) zwei Frischhaltedosen, etwa 60 mm × 110 mm × 160 mm groß (für Kühlschränke). Der *Hörergriff* ist ein 130 mm langes Stück Besenstiel von 22 mm Durchmesser, das nach Bild 177a abgesägt, abge-

Bild 178. Unsere Fernsprechstelle



schrägt und mit einer Nut für die Doppelleitung vom Fernhörer zum Mikrophon versehen wird. Nach Bild 177c bringen wir an beiden Enden je eine *Lasche* zum Befestigen von Fernhörer und Mikrophon an; die Senkschrauben werden auch im Griff versenkt. Die Laschen sind ähnlich denen des Kopfhörers; das dort geradegesägte Ende wird hier so bearbeitet, daß es sich der Form des Griffes anpaßt. An Stelle der einen 4,2-mm-Bohrung sind zwei 3,2-mm-Bohrungen für die Senkschrauben nötig. Beide Laschen werden mit dem Griff verschraubt.

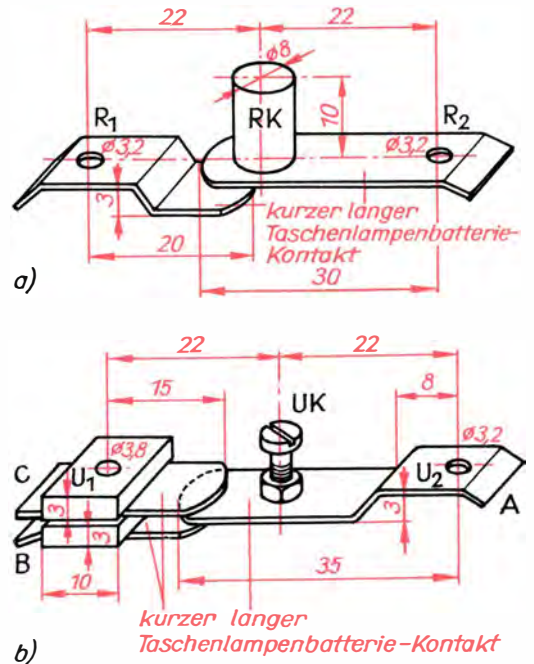
Fernhörer und Mikrophon werden hintereinandergeschaltet. Wir verdrahten ähnlich wie beim Kopfhörer: eine Anschlußschraube des Hörers mit einer des Mikrofons verbinden (am besten mit Lötösen); die Anschlußdrähte (Einzellitzen) der beiden übrigen Anschlüsse beim Mikrophon unten herausführen und auf etwa 60cm Länge verdrillen. Hörer und Mikrophon werden an ihren Laschen angeschraubt, die Leitung drückt man in die Nut (Rille) und umwickelt den Griff mit Isolierband. Griff und Laschen werden schwarz gestrichen.

Das nächste ist der Anruf: Klingel und Druckknopfschalter; dazu gehört eine Batterie. Die Klingel haben wir schon; den *Druckknopf als Rufschalter* fertigen wir aus alten Batteriekontakten (Bild 179a). Er hat eine festliegende und eine bewegliche Kontaktfeder; auf der letztgenannten sitzt ein Druckknopf.

Klingel und Batterie bauen wir auf der *Bodenplatte* des Fernsprechkastens auf, die einmal Deckel war und jetzt »zweckentfremdet« ist (Bild 180). Die Klingel wird mit zwei M3-Schrauben befestigt, die Batterie mit einem Gummibändchen (Schnipsgummi), dessen Enden durch die Bodenplatte hindurch-

geführt und unterhalb mit zwei Hölzchen festgehalten werden. Die Kontaktstreifen drücken gegen zwei kleine Kontaktwinkel aus Messingblech. Der eine davon liegt auf der Klingelplatte zwischen Ankerwinkel und Klingelmagneten (für den kurzen Streifen), der andere zwischen Ankerwinkel und Seitenwand.

Bild 179. Rufschalter (a) und Umschalter (b) der Fernsprechstelle



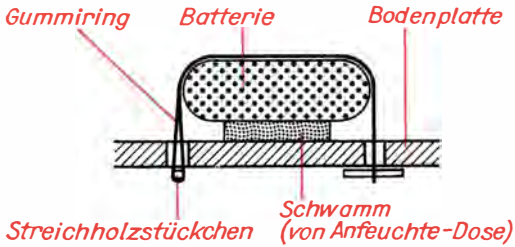
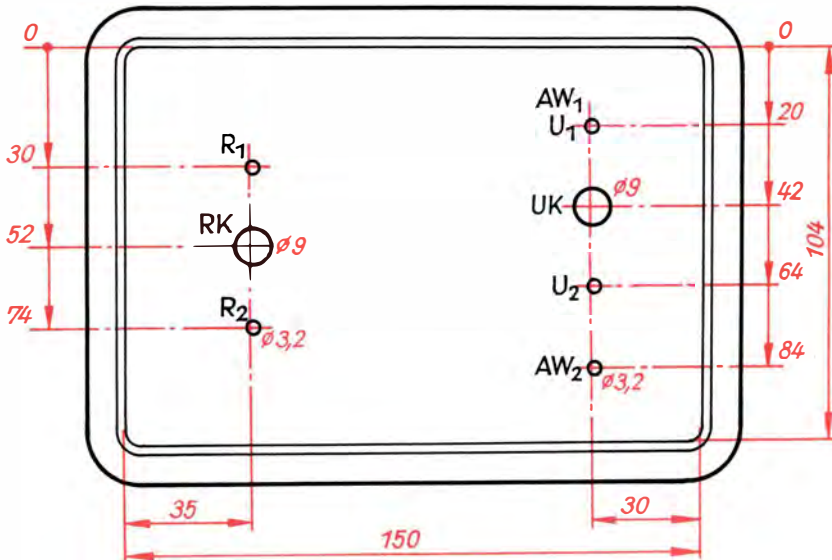


Bild 180. So wird die Batterie auf der Bodenplatte befestigt

Um einen noch besseren Kontakt zu sichern, können wir die senkrechten Schenkel der Kontaktwinkel je zweimal von oben einschneiden, die Mittelstreifen etwas zur Seite biegen und die Batteriekontakte dazwischenklemmen. Unter den Teil der Batterie, der nicht auf der Klingelplatte liegt, legen wir ein Stück Schaum- oder Schwammgummi (aus den Anfeuchte-Dosen). Wer einen lauten, hellen Klang der Glocke haben will, muß noch – am besten

Bild 181. Oberseite der Fernsprechstelle: AW_1 und AW_2 Auflegewinkel, U_1 und U_2 Kontaktfedern des Umschalters, UK Umschalter-Druckschraube, R_1 und R_2 Kontaktfedern des Rufschalters, RK Druckknopf des Rufschalters



in der Nähe der Glocke – Schall-Löcher anbringen. Einen schönen Ton gibt unser Summer; wegen seiner guten Unterbrecherkontakte spricht er auch gut an und ist besonders schreckhaften Lesern zu empfehlen.

Wir wollen einen *Gegensprechverkehr* haben; dazu brauchen wir einen *Umschalter*, der durch den Fernhörer »bedient« wird. Wir bauen ihn ebenfalls aus Kontaktfedern alter Flachbatterien, aus zwei Hartpapier-Isolierplättchen (2 mm dick) und einer einstellbaren Schraube als Schaltknopf (Bild 179b). Wir fertigen zweckmäßigerweise gleich drei Umschalter an, weil der gleiche später auch zum Lautsprecher benötigt wird. Um den Fernhörer aufzulegen, ist noch eine Gabel nötig – zwei Auflegewinkel in U-Form, die auf der Oberseite des (durchsichtigen) Kastens angebracht werden. Jeder Winkel (wir brauchen vier) wird aus 1 mm dickem Eisen- oder Aluminiumblech gebogen und ist 65 mm lang und 18 mm breit. Das (waagerechte) Mittelstück ist 23 mm lang, jeder (senkrechte) Schenkel 21 mm hoch – an den Oberkanten etwas nach außen gebogen, damit sich der Griff leichter hineinführt. Das Mittelstück hat in der Mitte eine 3,2-mm-Bohrung für eine M3-Schraube – zum Befestigen an der Kastenoberseite.

Diese Oberseite ist ursprünglich der Boden des Kastens gewesen; jetzt ist der einstige Deckel der Boden! Wir wollen den *Fernsprechkasten* zur Aufnahme der Einzelteile durch einige Bohrungen vor-

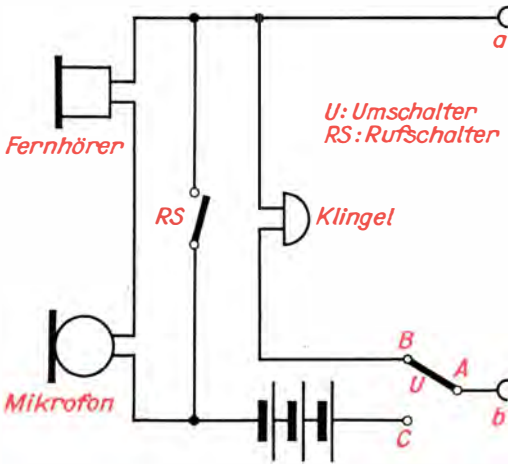
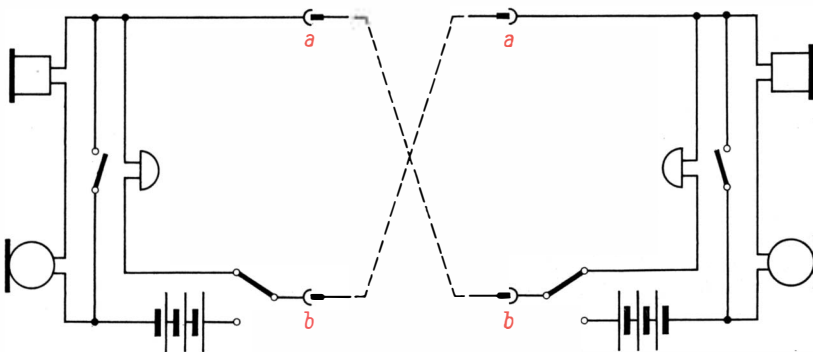


Bild 182. Schaltbild einer Fernsprechstelle

bereiten. Bild 181 zeigt die fertige Oberseite. Wir befestigen zunächst den einen Auflegewinkel auf der Kastenoberseite bei AW_2 .

Der Umschalter wird mit zwei M3-Schrauben bei U_1 und U_2 an der Kastenoberseite von unten angeschraubt; die lange, bewegliche Feder bei U_2 und die beiden kurzen, festen mit den Isolierplättchen zugleich mit dem zweiten Auflegewinkel AW_1 bei U_1 . Der Schaltknopf (die verstellbare Schraube) muß dann so weit aus der Bohrung UK herausragen, daß der aufgelegte Hörer ihn herunterdrückt, bis der Kontakt zwischen der beweglichen Kontaktfeder A und der unteren festen Kontaktplatte B sicher geschlossen ist. Nehmen wir den Hörer ab,

Bild 183. Verbindung zweier Fernsprechstellen



so muß sich die lange Kontaktfeder A gegen die obere feste Kontaktplatte (Feder) C legen. Damit die beiden festen Kontaktfedern nicht durch die Schraube bei U_1 kurzgeschlossen werden, umwickeln wir diese Schraube vorher mit Isolierband; deshalb ist die Bohrung U_1 etwas größer vorzusehen. Mit dieser Schraube wird zugleich der eine Auflegewinkel verschraubt.

Die Kontaktfedern des Rufschalters befestigen wir mit M3-Schrauben in R_1 und R_2 . Der Druckknopf (Rufknopf) ragt dann bei RK aus der Oberseite des Kastens heraus. Die Oberseite ist damit fertig.

In die kurze Seitenwand des Kastens unterhalb der Auflegewinkel (und des Hörers) bohren wir zwei 6,3-mm-Löcher nebeneinander (in der Mitte, etwa 35 mm hoch). Hier werden die Telefonbuchsen für die von außen kommende Fernsprechleitung befestigt. An der langen Seitenwand und etwa 40 mm über der Bodenplatte bei AW_2 bohren wir ein 6-mm-Loch zum Durchlassen der Hörerlitze.

Wir verdrahten mit biegsamem Kabel (Litze) nach dem Schaltbild 182. Die beiden Telefonbuchsen an der Seitenwand bezeichnen wir mit a und b. Die Leitung vom Hörer muß erst von außen durch die Seitenwand geführt werden, ehe sie angelötet werden darf.

Sind beide Fernsprechstellen fertig, folgt die Funktionsprüfung nach dem Schaltbild 183:

1. Buchse a des einen Fernsprechers über Fernleitung mit Buchse b des anderen verbinden, damit die Batterien in Reihe liegen und kein Kurzschluß entsteht. Beide Hörer liegen auf.
2. Einen Hörer abheben.
3. Rufschalter drücken; auf der Gegenstation muß Rufzeichen ertönen.

4. Rufschalter loslassen; den anderen Teilnehmer erwarten. *Achtung:* Während des Gesprächs darf die Ruftaste nicht gedrückt werden! Dadurch würde nicht nur das Gespräch unterbrochen, sondern auch das Mikrofon der Gegenstation überlastet!

Arbeiten beide Stationen einwandfrei, so können wir sie an unsere Fernleitung anlegen und auf größere Entfernung telefonieren – nach Vorschrift der Post jedoch nur innerhalb des Grundstückes. Das gilt auch für das Telegrafieren. Dabei können wir, lieber Leser, etwas ausprobieren, was der Mathematiker und Physiker *Karl August Steinheil* (1801–1870) entdeckt hat: daß man an Stelle der einen Leitung die »Erde« nehmen kann. Wir wollen gewiß keine Erdungen in das Grundwasser verlegen; aber oft genügt die Wasserleitung oder die Gasleitung. Geeignet sind natürlich nur Metallrohre; der Plaste-Wasserhahn leitet nicht!

Vorbereitungen zum Bau einer Verstärkeranlage

Am Arbeitsplatz von Dispatchern finden wir statt des gewöhnlichen Fernsprechers oft einen Lautsprecher mit Mikrofon für Wechselverkehr. Der Dispatcher braucht keinen Hörer mehr abzunehmen, zu halten und aufzulegen. Bei Sprechruhe kann der Dispatcher (mit einer gewöhnlichen Klingelanlage) angerufen werden. Er legt einen Schalter um und meldet sich. Dann schaltet er zurück und kann den anderen Teilnehmer hören. Will er antworten, so muß er den Schalter wieder umschalten – und so weiter. Will er selber anrufen, so schaltet er den Schalter zur Gegenstation und spricht.

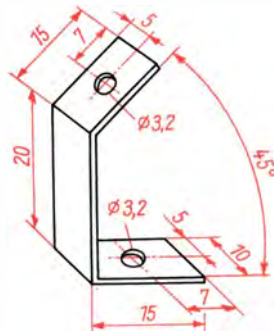
Die erheblich größere Lautstärke des Lautsprechers erfordert eine entsprechend hohe elektrische Leistung. Unsere bisherige Fernsprechanlage bringt sie nicht auf; wir müssen die Sprechströme daher mit einem *Niederfrequenzverstärker* wesentlich *verstärken*.

Wir beginnen mit dem Mikrofonbrett

Die *Eingangsstufe* unserer Verstärkeranlage ist das Mikrofon mit gekaufter Kohlekapsel. Zwei Stück davon bauen wir, wie bei der Fernsprechanlage beschrieben. Eines der fertigen Mikrofone wird später in die Frontplatte des Lautsprechers eingesetzt; das zweite wird mit zwei Haltewinkeln aus 1 mm dickem Eisenblech (Bild 184, im Bild 170 angedeutet) auf einer Grundplatte befestigt (Bild 185). Rechts ist der schon erwähnte Verstärker mit Batterie zu sehen, den wir ebenfalls bauen werden. Wir fertigen gleich zwei dieser Platten an, die zweite davon für das selbstgebaute Mikrofon. Derartige Grundplatten brauchen wir noch des öfteren; deshalb wollen wir die Herstellung übersichtlich ordnen und von der einfachsten »Urform« (Bild 186a) ausgehen, die zum Mikrofon und Umschalter paßt. Von Fall zu Fall werden die nötigen zusätzlichen Bohrungen in weiteren Bildern angegeben.

Die *ursprüngliche Grundplatte* ist aus 4...6 mm dickem Hartpapier. Bild 186b zeigt die weitere Bearbeitung für die Verwendung als Mikrofongrundplatte. Auf die beiden fertigen Grundplatten schrauben wir eines der beiden Kapselmikrofone sowie unser selbstgebautes Mikrofon (beide mit Haltewinkeln) an. Bild 187 gibt die Schaltung und Verdrahtung der Mikrofonplatte an. Zwischen B und C liegt ein Arbeitswiderstand (Schichtwiderstand) von etwa 800 Ω . Wenn wir den Mikrofonstrom verstärken wollen, können wir ihn nicht einfach an den Eingang eines Verstärkers legen. Verstärkt werden die (wechselnden) *Spannungen*. Wir müssen daher

Bild 184. Haltewinkel für das Mikrofon



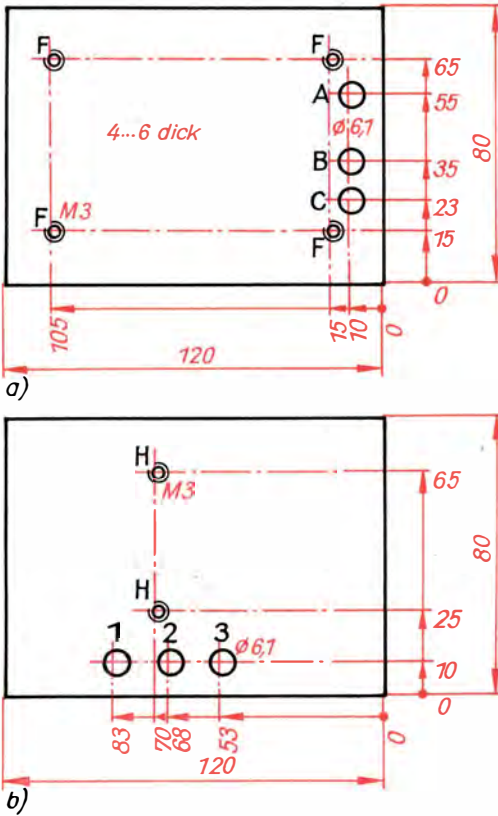


Bild 186. Ursprüngliche Grundplatte (a) und Zusatz-Bohrschema für die Grundplatte zum Mikrofon (b): F Bohrungen für GummifüÙe; A, B, C Bohrungen für Telefonbuchsen; H Gewindebohrungen für die Halte- winkel; 1, 2, 3 Bohrungen für weitere Telefonbuchsen

die im Sprechrhythmus wechselnden Ströme des Mikrofonkreises in Spannungen verwandeln. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten:

1. durch einen Transformator, der sekundär die Wechselspannung liefert.
2. durch den Spannungsabfall an einem Widerstand.

Wir wissen, daß jeder Spannungsabfall vom Widerstand und (hier maßgebend) von der Stärke des Stromes abhängig ist, der durch den Widerstand fließt: $U = I \cdot R$. Dafür brauchen wir den Arbeitswiderstand.

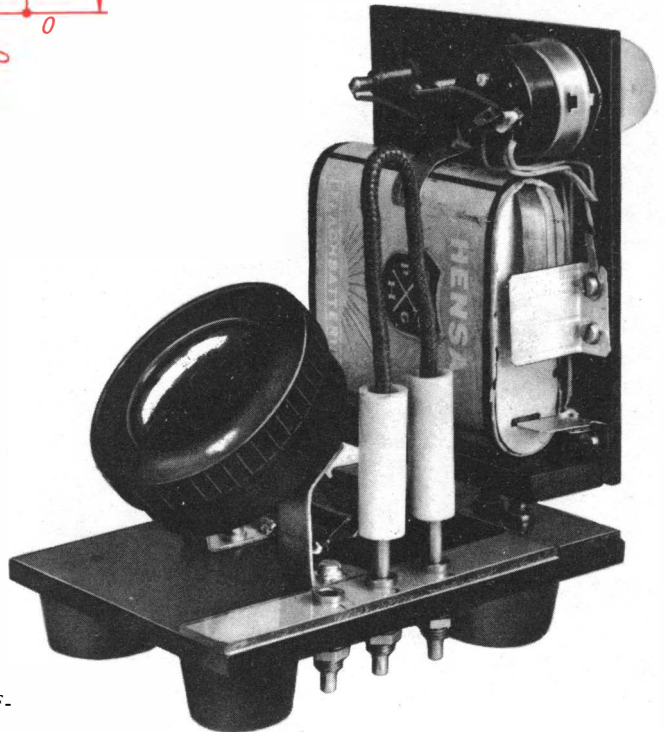


Bild 185. Ansicht des Mikrofon mit NF-Verstärker auf einer Grundplatte

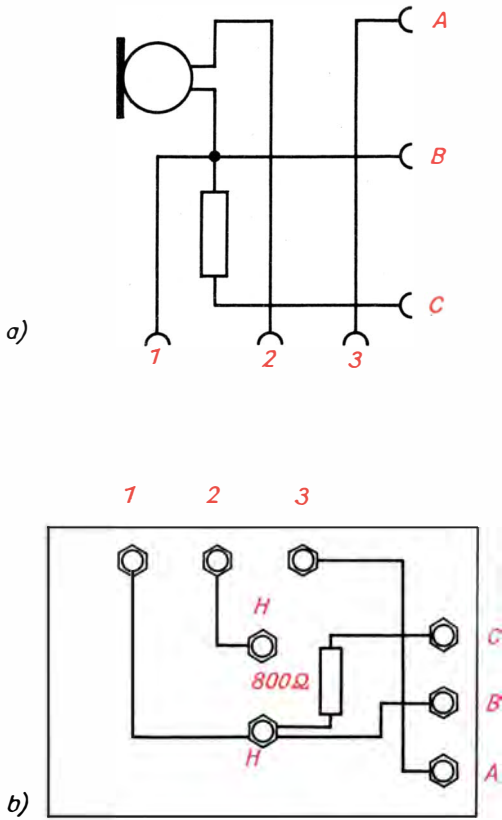


Bild 187. Schaltung des Mikrofons (a) und Verdrahtung auf der Unterseite der Mikrofongrundplatte (b)

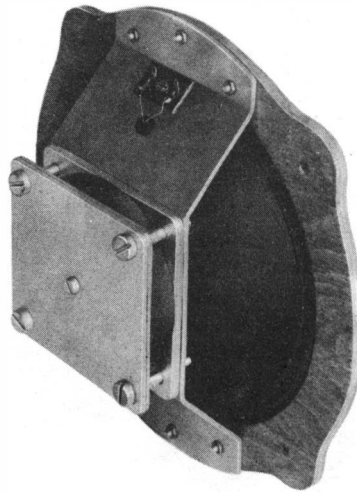
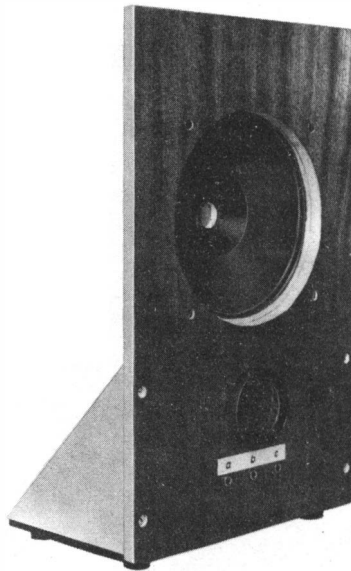


Bild 188. Unser Lautsprecher, oben mit Mikrofon und Umschalter als Gegenstation

Der Lautsprecher strahlt kräftige Schallwellen ab

Bild 188 gibt eine Gesamtansicht. Wir beginnen mit dem Bau der Membran. Von der Auswahl des richtigen Materials hängt in hohem Maße die Qualität des Lautsprechers ab. Für das Mustergerät wurde eine Membran aus 0,20 mm dickem Fotoalben-Karton (Sorte 140 g/m²) gebaut. Normaler Zeichenkarton gleicher Dicke ist zu steif.

Die Teile des Schallsystems

Die Membran ist ein abgestumpfter Kegel, der nach Bild 189a aus der Fläche eines Kreissektors (310°) geschnitten und verleimt wird. Nach dem Ausschneiden streichen wir die schraffierte Fläche einseitig dünn mit Alleskleber ein; das erhöht die Festigkeit. Nach dem Trocknen verleimen wir den Kreissektor zum Kegelstumpf. Zur leichten Beweglichkeit (Schwingfähigkeit) der Kegelmembran

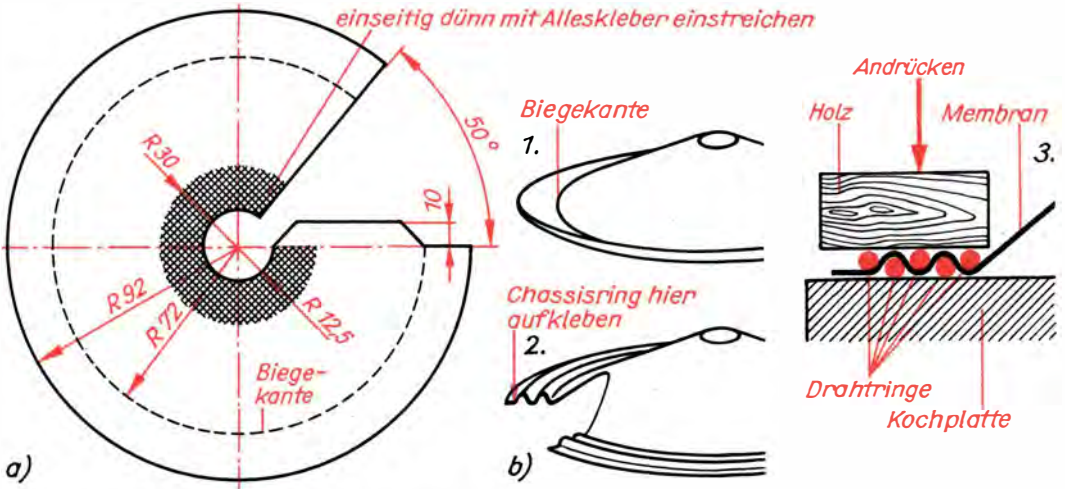


Bild 189. Bau der Membran: a) Maße des Rohlings, b) Teilschritte zur Falzung des Membranrandes

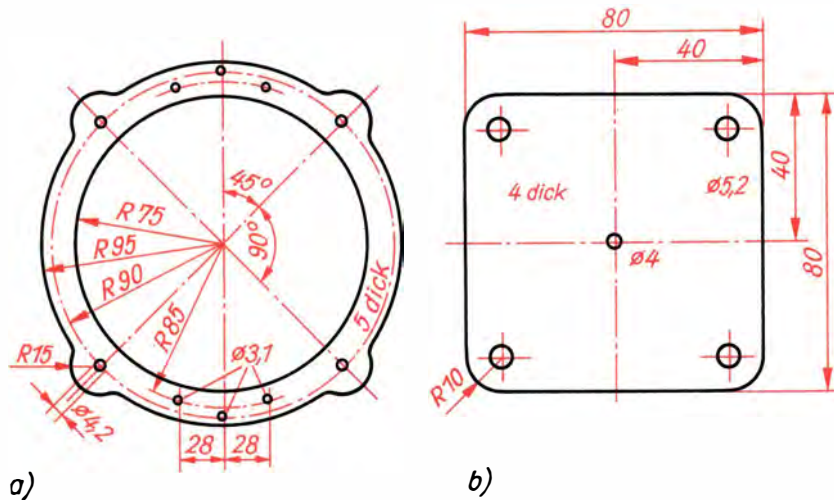
muß ihr Rand gefalzt werden. Das erfolgt in zwei Schritten:

Umbiegen des Randes und Falzen des Randes.

Wir benötigen: eine Schüssel Wasser, eine elektrische Kochplatte mit einem Durchmesser von 180...200mm, vier Holzquader etwa 30mm x 50mm x 50mm und fünf 2mm dicke Drahringe mit 124 mm, 129 mm, 134 mm, 139 mm und 144 mm Innendurchmesser, die wir selber biegen.

Zunächst drehen wir den 20mm breiten Rand so lange im Wasser, bis er gleichmäßig durchnäßt ist. Dann drücken wir den Membranrohling mit dem nassen Rand auf die vorgeheizte Kochplatte

Bild 190. Chassiring (a) und Magnetkernplatte (b)



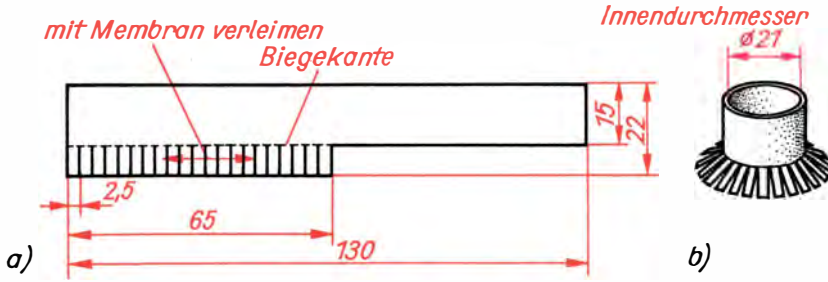


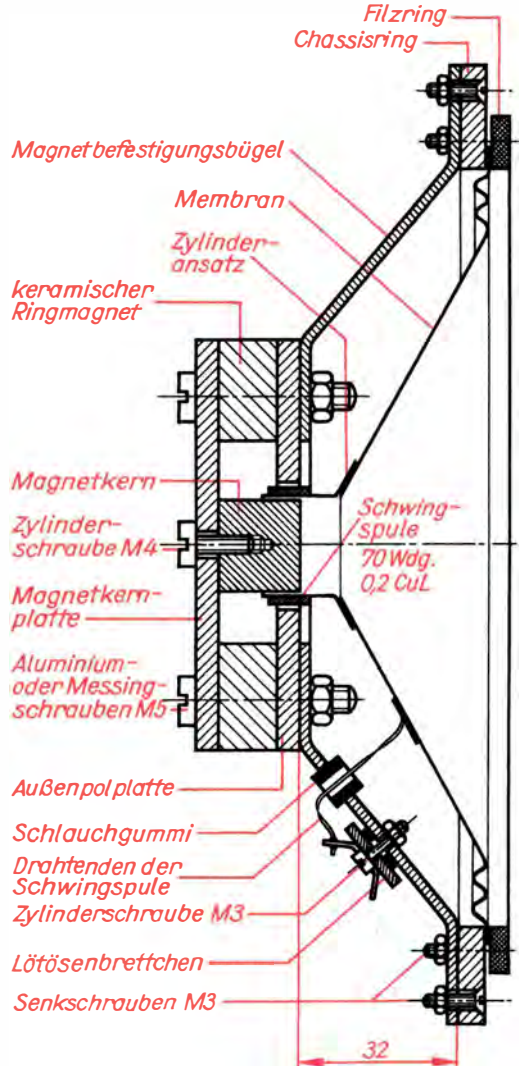
Bild 191. Zylinderansatz (Spulenkörper): a) Rohling, b) fertig verleimt

Bild 192. Querschnitt durch den Lautsprecher

und »bügeln« mit einem Holzquader den Rand vorsichtig um. Die Platte darf nicht zu heiß sein, damit die Pappe nicht versengt wird. Gelingt das Umbiegen nicht mit einem Male, feuchten wir erneut an und wiederholen das Ganze.

Für das nun folgende *Falzen* ist es vorteilhaft, wenn uns dabei ein Bastelfreund helfen kann, sonst suchen wir uns zwei Mauerziegel oder zwei Eisenstücke entsprechenden Gewichts. Auf den gut durchnäßen Rand legen wir die Ringe mit 124 mm und 134 mm Durchmesser, ferner *unter* den Rand, also auf unseren Arbeitstisch, den Ring mit 129 mm Durchmesser. Dieser Ring muß mit Fingerspitzengefühl gleichmäßig in den Zwischenraum der »Oberlinge« eingedrückt werden. Danach wiederholt sich das Ganze, wobei wir auch die beiden letzten Ringe mit verwenden. Zum Schluß legen wir Membran und Ringe auf die kalte Kochplatte, verteilen die vier Holzquader gleichmäßig auf dem Rand und üben einen leichten Druck auf sie aus. Zwei Quader werden von den Händen unseres Helfers bzw. von den Ziegeln oder Eisenstücken niedergedrückt, die beiden anderen drücken wir selber an. Dann wird die Kochplatte eingeschaltet und der gefaltete Membranrand getrocknet.

Den *Chassisring* des Lautsprechers sägen wir nach Bild 190a mit der Laubsäge aus 5 mm dickem Sperrholz aus und kleben ihn auf den ebenen Rand der Membran. Der *Zylinderansatz* der Membran wird nach Bild 191 aus Zeichenkarton hergestellt; er soll die Schwingspule tragen. Nach dem Ausschneiden falten wir die Biegekante vor, schneiden bis zu ihr kammartig ein, rollen ihn dann über einen Rundkörper von 21 mm Durchmesser (Rundholz, Medizinfläschchen oder anderem) und leimen



ihn zusammen. Nach dem Trocknen spannen wir den Ansatz vorsichtig in unsere Spulenwickelvorrichtung ein und wickeln die erste Lage mit 35 Windungen (CuL 0,2) sauber nebeneinanderliegend auf. Die erste Windung liegt 5...6 mm von der Faltkante entfernt. Auf diese Lage kleben wir dünnes Papier, damit die zweite Lage von ebenfalls 35 Windungen sauber darauf gewickelt werden kann. Die beiden (etwa 100 mm langen) Drahtenden stecken wir je zweimal durch den Spulenkörper; erst durch ein kleines Loch nach innen, dann gleich daneben durch ein zweites Loch wieder nach außen. Die Windungen werden mit Alleskleber gegen Verrutschen gesichert. Den Zylinderansatz mit der Schwingspule kleben wir nun auf die Kegelmembran. Bild 192 gibt einen Schnitt durch den gesamten Aufbau.

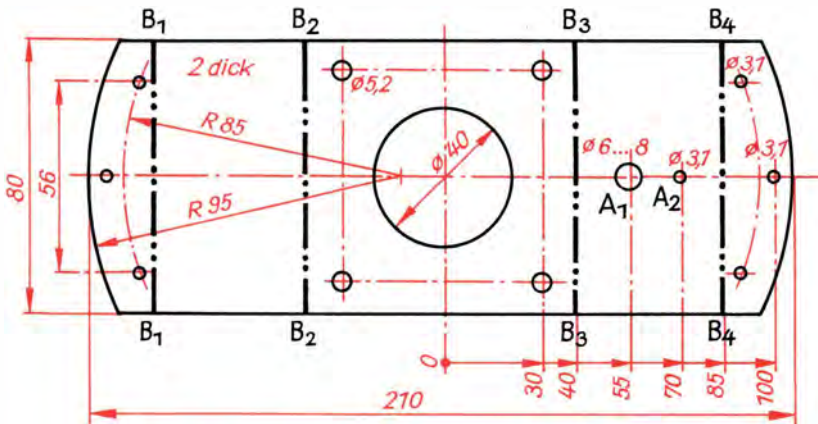
Die Teile des Dauermagnetsystems

Es ähnelt bei unserem Lautsprecher dem des Drehspul-Meßgerätes. Hier wie dort erzeugt ein Strom wechselnder Stärke in einer beweglichen Spule ein Magnetfeld, dessen Stärke sich im gleichen Rhythmus (vgl. S. 116) ändert. Dieses Magnetfeld ist einem starken, gleichbleibenden zweiten Magnetfeld eng benachbart. Beide wirken – anziehend und abstoßend – aufeinander ein. Die Wirkung zeigt sich an der drehbaren Spule des Drehspul-Meßgerätes als Drehmoment, an der Spule unseres Lautspre-

chers als Schwingung, entsprechend dem Rhythmus der Stromstärkeänderungen. Die Spule heißt deshalb *Schwingspule*. Sie überträgt die Schwingungen auf die Membran; diese versetzt die umgebende Luft ihrerseits in Schwingungen, die wir hören. Der akustisch-elektrisch-magnetisch-akustische Kreis ist geschlossen.

Wir sehen aus Bild 192, daß das (konstante) Dauermagnetsystem aus einem großen keramischen Ringmagneten, einer Magnetkernplatte, einem runden Magnetkern als Innenpol und einer Außenpolplatte besteht. Alles ist auf dem Befestigungsbügel angeschraubt. Die Schwingspule liegt beweglich über dem freien Kernende, das sie mit etwa einem Viertel ihrer Länge überragt. Der *Ringmagnet* hat einen Außendurchmesser von 70...80 mm, einen Innendurchmesser von 40 mm und eine Höhe von 11,5 mm. Die *Magnetkernplatte* aus vier Lagen 1 mm oder zwei Lagen 2 mm dicken Weicheisenbleches wird nach Bild 190b bearbeitet. In der Mitte ist mit einer M4-Schraube der *Weicheisen-Magnetkern* befestigt – eine Walze (Bolzen), 16 mm lang, mit einem Durchmesser von 20 mm. An einem Ende erhält der Rundkern in der Mitte der Stirnfläche eine 10...12 mm tiefe Gewindebohrung M4. Wir schrauben hier den Kern an der Platte fest. Kern und Platte bilden einen der beiden Polschuhe. Wir können den Kern auch aus entsprechend vielen und großen Unterlegscheiben zusammensetzen, die dann mit Schraube und Mutter (mit der Platte) zusammengehalten werden. Die *Außenpolplatte* wird ebenfalls nach Bild 190b in der gleichen Art wie die Magnetkernplatte hergestellt. An Stelle der 4-mm-Bohrung erhält sie jedoch eine 24 mm große.

Bild 193. Befestigungsbügel für das Magnetsystem



Zum Schluß fertigen wir den *Befestigungsbügel* für das Magnetsystem nach Bild 193 (und 192) aus 2 mm dickem Aluminiumblech. Die sechs 3,1-mm-Bohrungen an den Rändern dienen dem Anschrauben des Bügels an den Chassisring, die vier 5,2-mm-Bohrungen sind zum Befestigen des Magnetsystems gedacht. Das Bügelblech wird um die Biegekante B_1 – B_1 bis B_4 – B_4 nach Bild 192 gebogen. Nachdem der Bügel mit dem Chassisring verschraubt ist, schieben wir in die Bohrung A_1 ein passendes Stückchen Gummischlauch, durch das die Anschlußdrähte der Schwingspule nach außen geführt werden. In A_2 wird ein kleines Lötösenbrettchen mit zwei Lötösen so angeschraubt, daß die Ösen das Bügelblech nicht berühren können. An die Ösen löten wir die Spulenanschlüsse.

Wir montieren das Magnetsystem

Zusammenlegen der Außenpolplatte, des Ringmagneten und der Magnetkernplatte mit Innenpol. Diese Teile werden durch die Anziehungskraft des Magneten bereits fest zusammengehalten; ein seitliches Verschieben der Platten ist jedoch noch möglich.

Mit einem 2 mm dicken Aluminium-, Messing- oder Kupferstab kontrollieren wir, ob der Kern überall gleich weit von der Bohrung der Außenpolplatte entfernt ist.

Einstecken der vier Aluminium- oder Messingschrauben M5 (Eisenschrauben würden einen magnetischen Kurzschluß verursachen) von der Kernplatte her in die Eckbohrungen der beiden Platten.

Legen des justierten Magnetsystems auf die Schraubenköpfe.

Aufstecken des Bügels mit Membran und Spule auf die Außenpolplatte. Vorsicht! Spule und Membran nicht zerdrücken: Die Spule hat bei genauer Einstellung im Magnetsystem beiderseitig nur jeweils 0,5 mm Spielraum!

Wir beobachten durch die Membranöffnung, daß der Spulenkörper den Kern nirgends berührt.

Mit vier Muttern M5 wird das ausgerichtete Magnetsystem mit dem Bügel verschraubt. Danach muß sich die Membran leicht in das Magnetsystem drücken lassen und sofort wieder zurückkommen, ohne daß ein Schleifgeräusch zu hören ist.

Zur *Funktionsprobe* legen wir kurzzeitig eine Wechselspannung von maximal 2 V an die Lötösen.

Der 50-Hz-Brummtön muß deutlich zu hören sein. Zum Schluß kleben wir einen etwa 10 mm breiten Filzstreifen, wie er auch zum Abdichten von Türen und Fenstern verwendet wird, nach Bild 192 auf den Chassisring.

Die Schallwand

Aus schalltechnischen Gründen schrauben wir den Lautsprecher auf eine mindestens 220 mm breite und 350 mm hohe Sperrholzplatte als *Schallwand* und *Montagebrett* für die Gegenstation (vgl. Bild 188 links). Die Dicke der Platte soll 6...8 mm betragen. In etwa 220 mm Höhe, auf der Mittellinie, zeichnen wir den Mittelpunkt für einen Kreis mit dem Radius 75 mm. Diesen Kreis sägen wir als Schallöffnung mit der Laubsäge aus. Rings um die Öffnung (auf einem Kreis mit dem Durchmesser 180 mm) bohren wir in jeweils 90° Abstand vier Löcher von 4,2 mm Durchmesser zum Anschrauben des Lautsprechers. In halber Höhe zu der Schallöffnung sägen wir ein Loch mit 52 mm Durchmesser für ein *Mikrofon* aus. Rechts daneben bringen wir nebeneinander drei Bohrungen an wie für den *Rufschalter* der Fernsprechstelle (Bild 179b); der gleiche Umschalter kommt auch hierher. Unterhalb der Mikrofonöffnung werden drei 6,1-mm-Löcher für die Telefonbuchsen der Anschlüsse gebohrt.

Wir schrauben das Mikrofon (mit Kapsel) mit seinem Deckel am Montagebrett an und setzen den Umschalter und drei Telefonbuchsen ein. Dann wird der Lautsprecher mit vier Schrauben und Muttern M4 an die Schallwand geschraubt. Zwischen Chassisring und Schallwand kommen auf die Schraubenbolzen Unterlegscheiben aus etwa 5 mm dickem Gummi. Wir ziehen die Muttern nur so weit an, daß der Filzring gerade gleichmäßig anliegt, ohne stark gepreßt zu werden. Wer will, kann ein Stück locker gewebten, schalldurchlässigen Dekorationsstoff dazwischenlegen. Wir befestigen anschließend die Schallwand mit Hilfe zweier Seiten-Winkelstücke aus 1 mm dickem Eisenblech senkrecht auf einer *Grundplatte* aus Hartpapier (4...6 mm dick). Die Grundplatte bekommt die üblichen vier Gummifüße, dazu (an der Oberseite) zwei kleine Winkel aus Messingblech (senkrecht zueinander sitzend) als Kontakte für eine Flachbatterie. Lautsprecher, Umschalter, Mikrofon, Batterie-Anschlußwinkel und Telefonbuchsen werden nach

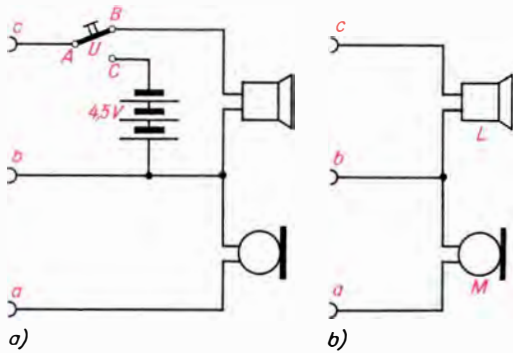


Bild 194. Schaltung der Wechselsprech-Gegenstation: a) mit Rufmöglichkeit, b) ohne Rufmöglichkeit seitens der Gegenstation

Bild 194a verdrahtet. Die drei Buchsen erhalten (vorn) die Bezeichnungen a, b und c.

Diese Form ist die *Gegenstation*; bei der *Hauptstation* (dem Dispatcher) sind Lautsprecher und Mikrofon getrennt, und ein Druckknopfumschalter ist nicht vorhanden. Mit der Gegenstation können wir die Hauptstation anrufen; dafür sind Umschalter U und die Batterie eingebaut. Verzichten wir auf diese Möglichkeit, so fallen U und die Batterie fort, und wir schalten die Station nach dem vereinfachten Plan im Bild 194b.

Verstärkertechnik

Unsere Mikrofonströme reichen für einen empfindlichen Kopfhörer, der unmittelbar am Ohr sitzt, aus; sie versetzen die Membran in genügend starke Schwingungen. Der Weg des Schalles ist kurz. Die Ströme reichen aber nicht aus, um die Schwingspule des Lautsprechers so zu bewegen, daß der Schall weithin zu hören ist, wie wir das bei einem Lautsprecher erwarten. Wir müssen sie also verstärken; dazu verwendet man Transistoren.

Wissenswertes von Halbleiter-Bauelementen

Sozusagen der Urahn des heutigen Transistors, dessen Name aus den englischen Wörtern »to transfer« (übertragen) und »resistor« (Widerstand) zusammengesetzt wurde, ist der *Kristalldetektor*. Der deutsche Physiker *Karl Ferdinand Braun* (1850 bis 1918), der Erfinder der nach ihm benannten *Kathodenstrahlröhre*, baute ihn 1875. In den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts begann damit die Entwicklung des Rundfunks. Braun befestigte eine dünne Metalldrahtspitze mit geringem Druck federnd auf einem Kristall aus Bleiglanz, Antimon-glanz oder Pyrit und stellte fest, daß diese Anordnung den elektrischen Strom nur in einer bestimmten Richtung durchließ, also wie ein Ventil, wie ein Gleichrichter wirkte.

Nur an einem bestimmten Punkt des Kristalls konnte die Drahtspitze aufgesetzt werden, an den anderen Stellen wirkte die Anordnung nicht. Da dieser Punkt mühsam gesucht werden mußte, stellte man die Metalldrahtspitze ein für allemal richtig ein und sicherte diese Spitzendiode, mit Germaniumkristall *Germanium-Spitzendiode* genannt, durch Einschmelzen in ein sehr kleines, luftdichtes Glasröhrchen (Bild 195a), denn die Luftfeuchtigkeit greift Germaniumkristalle an.

Die Berührungsstelle läßt die Elektronen in der Richtung vom Kristall zur Drahtspitze durch; der Kristall (am Gehäuse durch einen farbigen Ring oder Punkt gekennzeichnet) ist daher die *Katode*. Da Spitzendioden nur sehr geringe Ströme (von einigen Milliampere) durchlassen können, lag es nahe, die Berührungsstelle als Fläche auszubilden.

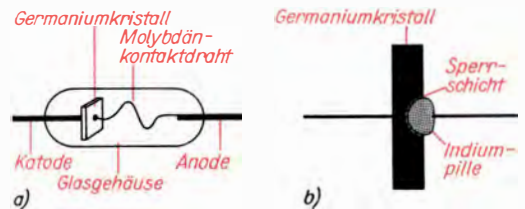


Bild 195. Prinzipieller Aufbau von Dioden: a) Spitzendiode, b) Flächendiode



Bild 196. Schaltzeichen der Diode

Man ersetzte das Kontaktdrähtchen (die *Anode*) durch eine eingeschmolzene »Kontaktpille« aus Indium (Bild 195b). So entstand die *Flächendiode*, die man wesentlich stärker belasten kann – mit Stromstärken bis 10 A, in neuen *Silizium*-Bauarten sogar schon bis 2000 A. Bild 196 zeigt das Schaltzeichen für Dioden. Wir müssen wissen, daß der Durchlaßstrom von der Anode zur Katode fließt, also im Sinne des Pfeiles im Schaltzeichen.

Die erwähnten *Halbleiter* Germanium (Ge) und Silizium (Si) stehen mit ihren elektrischen Eigenschaften zwischen den *Leitern* (etwa den Metallen) und den *Isolatoren*, wie Porzellan, Glas, Keramik, Gummi. Ob ein Festkörper den elektrischen Strom leitet oder nicht, hängt vom Aufbau seiner Kristalle ab. Jeder Kristall setzt sich aus *Atomen* zusammen, die ein regelmäßiges *Gitter* bilden. Von dessen Aufbau (Struktur) sind Art und Eigenschaften des Körpers abhängig. Atome bestehen aus Kern und Elektronen; die Elektronen der äußersten »Schale«, die *Valenzelektronen*, sind für die Bindung der einzelnen Atome untereinander verantwortlich. In Metallkristallen haben nicht alle Elektronen ihren festen Platz, einige können sich von ihren Atomen lösen; man nennt sie dann *freie Elektronen*. Sie leiten den elektrischen Strom, wenn eine Spannung angelegt wird, und machen die Metalle damit zu guten Leitern.

Im Gegensatz dazu hat der *Nichtleiter*, der Isolator, so gut wie keine freien Elektronen für den Transport elektrischer Ladungen zur Verfügung; sie werden alle für die Kristallbindung der Atome untereinander benötigt.

Leitfähigkeit aus Eigenem

Der Kristall eines *reinsten Halbleiters* ist wie der eines Isolators aufgebaut, also aus Atomen ohne freie Elektronen. Die Atome schwingen gegeneinander (»Wärmebewegung«) – um so mehr, je höher die Temperatur, das heißt die Zufuhr an Wärmeenergie, ist. Wird diese so groß wie die Energie der Bindung zwischen den Atomen, so zerbricht teilweise die Gitterbindung der Atome. Die für diese Bindung zuständigen Valenzelektronen werden so frei. Bei Zimmertemperatur sind davon in 1 cm^3 reinstem *Germanium* rund 10^{13} und in 1 cm^3 *Silizium* etwa 10^{10} freie Leitungselektronen vorhanden. Wenn man bedenkt, daß in 1 cm^3 etwa 10^{22}

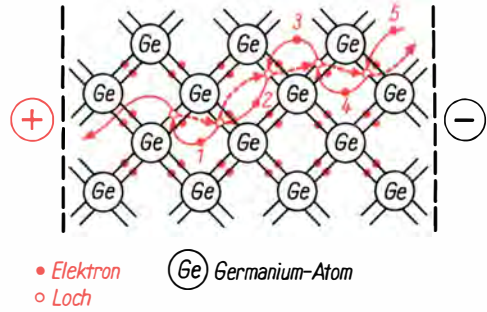


Bild 197. Wanderung der Elektronen und Löcher

Atome vorhanden sind, so kann man leicht ausrechnen, daß bei Germanium auf ein Leitungselektron $\frac{10^{22}}{10^{13}} = 10^9$ und bei Silizium sogar $\frac{10^{22}}{10^{10}} = 10^{12}$ Atome entfallen! Wird an einen solchen Halbleiter eine Spannung gelegt, so kommt es zu einer *Elektronenwanderung* – es fließt ein Strom. An der Stelle, an der das Elektron mit seiner negativen Ladung nun fehlt, ist eine positive Ladung übriggeblieben, ein *positives Loch*, auch »Fehlstelle« oder »Defektelektron« genannt (sprachlich richtig wäre »Atomdefekt« oder wenigstens »Elektronendefekt«, denn der Defekt ist da, aber das Elektron nicht mehr).

In dieses (positiv geladene) Loch springt das nächste Elektron und neutralisiert die positive Ladung. Dabei hinterläßt dieses Elektron an seinem alten Platz ein neues Loch. Das sieht im Kristallgitter so aus, als wandere nicht nur das Elektron (von Minus nach Plus), sondern auch das Loch, dieses jedoch von Plus nach Minus. Das Loch wandert jedoch nur scheinbar, weil kein Loch seinen Platz verlassen kann. Aber die Wirkung ist da: Die positive Ladung taucht an einer anderen Stelle im Gitter auf!

Insofern sprechen wir nicht nur von einer Elektronenbewegung vom negativen zum positiven Pol, sondern auch von einer Löcherwanderung als einer entgegengesetzt gerichteten Bewegung positiver Ladungen. Die Löcherwanderung erhöht die *Leitfähigkeit*, wenn die mittlere Zeit zwischen Entstehen eines Loches und seiner Füllung durch ein neu hinzukommendes Elektron (verhältnismäßig) lang ist. Das ist bei Halbleitern der Fall; bei Metallen werden die Löcher dagegen sehr schnell wie-

der neutralisiert. Diesen Vorgang und Mechanismus der Leitung des reinen Halbleiter-Werkstoffes nennt man *Eigenleitung*.

Bild 197 zeigt die Wanderung von Elektronen und positiven Löchern in einem Germaniumkristall bei Anlegen eines elektrischen Feldes. Germanium ist vierwertig; auf der äußersten Schale seines Atoms befinden sich vier Valenzelektronen, die im Kristallgitter vier weitere Germaniumatome binden. Das Bild zeigt auch, wie die Valenzelektronen »Elektronenpaare« bilden – immer ein Elektron eines Atoms mit einem gleichwertigen Elektron eines Nachbaratoms.

Leitfähigkeitszuwachs durch Kristallbaustörung

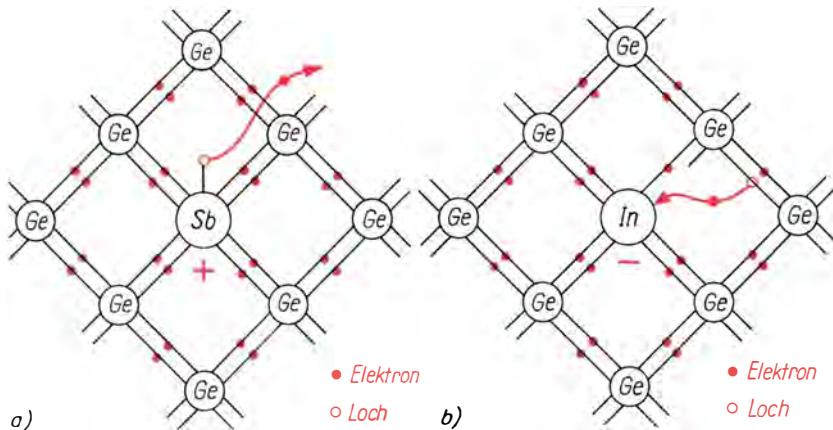
Der Begriff »Eigenleitung«, also »Leitung aus Eigenem«, führt zwangsläufig zum Gegenstück: einer Leitung durch fremden Einfluß. Das ist die *Störstellenleitung*, eine Leitung durch eine von außen zugeführte Störung im Gitteraufbau des Germaniums oder Siliziums. Die Leitfähigkeit wird dadurch erhöht, daß man das Gitter verunreinigt, daß heißt, eine kleine Anzahl von Fremdatomen (Atomen anderer Elemente) an Stelle von Germaniumatomen einbaut (*Dotieren*; lat. dotare = ausstatten). Etwa ein Fremdatom kommt auf eine

Million Atome des Germaniumgitters! Die Stelle, an der solch ein Fremdatom ein Germaniumatom ersetzt hat, heißt *Störstelle*. Weil Germanium vierwertig ist, nimmt man Atome der drei- oder fünfwertigen Elemente.

Die erste der beiden Möglichkeiten ist die, *fünfwertige Fremdatome* als Störung einzubauen (Bild 198a). Das bedeutet, daß ein Elektron zuviel ist bei dem störenden Antimon-Atom! Es ist ohne Bindungsmöglichkeit und löst sich zehnmal so leicht wie beim Aufbrechen einer Gitterbindung. Es entweicht als Leitungselektron in den Kristall und hinterläßt ein aus dem elektrischen Gleichgewicht gekommenes, *positiv* geladenes Antimon-Atom. Der Kristall bleibt im ganzen elektrisch *neutral*, hat aber nun *Elektronenüberschuß*. Die überzähligen Elektronen stehen im elektrischen Feld als Ladungsträger zur Verfügung und erhöhen daher (gemeinsam mit der Eigenleitung des Germaniums) dessen Leitfähigkeit. Im wesentlichen führen also hier Elektronen als negative Elektrizitätsträger den Ladungstransport durch; man spricht daher von einer *Elektronenüberschuß-Leitung* oder *n-Leitung* (n von negativ, Bild 199a). Dabei bedenken wir, daß bereits im reinsten, also nicht dotierten Halbleiter sowohl Elektronen als auch Löcher vorhanden sind, so daß das im dotierten ebenso der Fall sein wird. Bezeichnen wir die *Löcherdichte* (Anzahl der Löcher in 1 cm^3) mit p , die *Elektronendichte* mit n , so gilt $n \cdot p = n_i^2$.

n_E nennt man *Eigenleitungsdichte*. Sie gibt an, wie viele Ladungsträger im reinsten Halbleiter vorhanden sind (bei Germanium 10^{13} cm^{-3} , bei Silizium

Bild 198. Störstellen: a) mit fünfwertigem Antimonatom, b) mit dreiwertigem Indiumatom



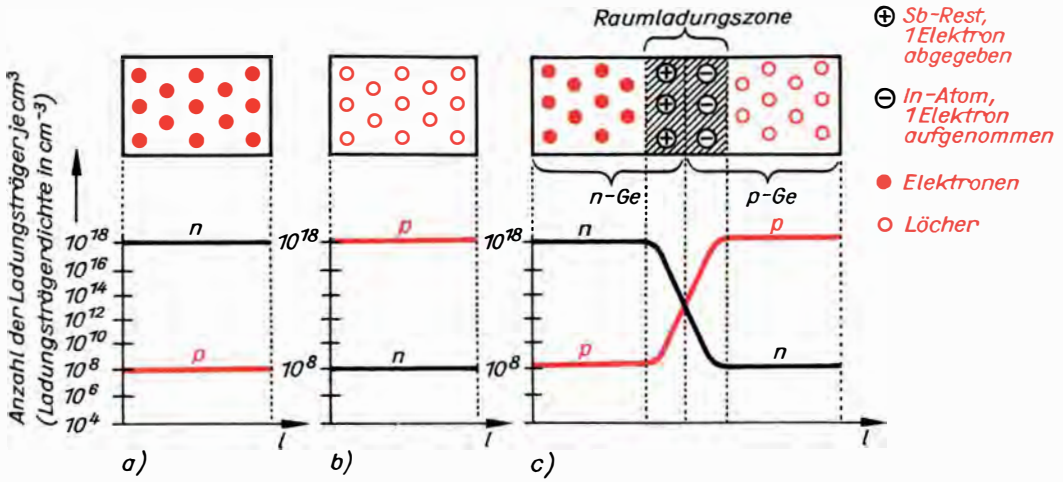


Bild 199. Ladungsträgerverteilung im Halbleiter : a) schematische Darstellung eines Halbleiters vom n-Typ und Ladungsträgerdichten, b) schematische Darstellung eines Halbleiters vom p-Typ und Ladungsträgerdichten, c) schematische Darstellung eines pn-Übergangs und Ladungsträgerverteilung

10^{10} cm^{-3}). Wenn beispielsweise eine Elektronendichte von $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ gefordert wird, so stellt sich zwangsläufig folgende Löcherdichte ein:

bei Germanium:

$$p = \frac{n_E^2}{n} = \frac{10^{26} \text{ cm}^{-6}}{10^{18} \text{ cm}^{-3}} = 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

bei Silizium:

$$p = \frac{n_E^2}{n} = \frac{10^{20} \text{ cm}^{-6}}{10^{18} \text{ cm}^{-3}} = 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

Dieses Verhältnis von wenigen Löchern zu vielen Elektronen läßt sich nicht schematisch, sondern nur in einem Diagramm mit logarithmischer Teilung darstellen; Abszissenachse: Länge des Halbleiters, Ordinatenachse: Ladungsträgerdichte (Bild 199a).

Die andere Möglichkeit ist die, nicht die Zahl der freien Elektronen, sondern die der positiven Löcher durch *dreiwertige Fremdatome* (etwa Indium) zu vergrößern (Bild 198b). Dem Fremdatom (In) fehlt zur Bindung ein Valenzelektron; dieses wird durch ein in der Nähe befindliches ersetzt, das an seiner

bisherigen Stelle ein positives Loch hinterläßt. Das Loch beginnt in der (bei der Eigenleitung) schon geschilderten Art, scheinbar im elektrischen Feld zum Minuspol zu wandern. Das Indiumatom ist jetzt *negativ* geladen. Die Leitfähigkeit ist durch positive Störstellen (Löcher) verursacht worden; man spricht von einer *p-Leitung*. Hier gilt sinngemäß wie für n-leitendes Germanium, daß auch noch eine bestimmte Anzahl von Ladungsträgern der anderen Art (hier Elektronen) vorhanden ist (Bild 199b).

Wenn ein Halbleiter-Kristallplättchen von einer Seite mit Indium und von der anderen Seite mit Antimon dotiert wird, so bilden sich in einem Kristall zwei unterschiedliche Halbleitertypen aus. An der Berührungsstelle beider Gebiete ändern sich die Dichten der *beweglichen* Ladungsträger nicht schlagartig von dem hohen Wert in dem einen auf den niedrigen im anderen Gebiet, sondern sie gleichen sich in einer Übergangszone, dem *pn-Übergang*, an (Bild 199c).

Warum erfolgt kein vollständiger Ausgleich? Wenn Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet abwandern, so wird das elektrische Gleichgewicht gestört. Dort, wo Elektronen verschwunden sind, bleiben die im Gitteraufbau fixierten Reste der Störatome (Antimon) zurück; sie sind einwertig positiv geladen. Die positive Ladung stößt die Löcher des gegenüberliegenden p-Gebietes zurück. Ebenso wirken sich die negativen Ladungen im p-Gebiet aus: Die Indiumreste sind durch Aufnahme der zugewanderten Elektronen negativ geworden; sie stoßen

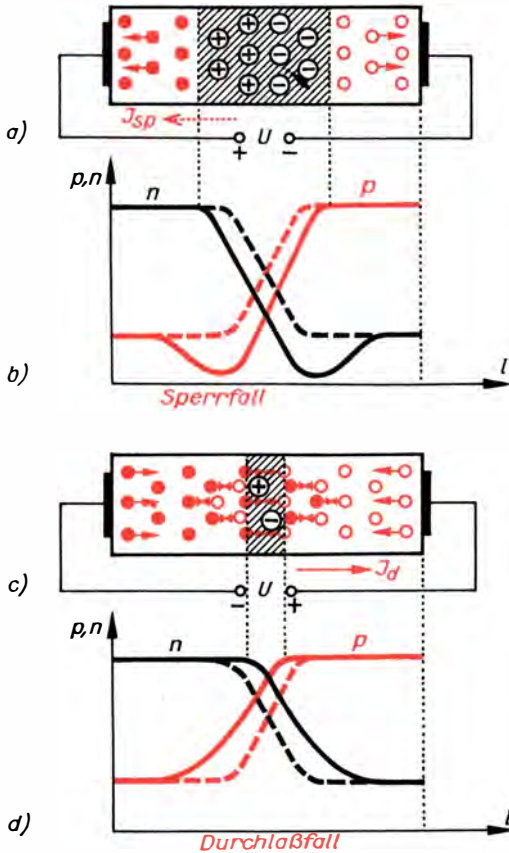


Bild 200. Äußere Spannung am pn-Übergang: a) Sperrspannung am pn-Übergang, b) Ladungsträgerverteilung, c) Durchlaßspannung am pn-Übergang, d) Ladungsträgerverteilung

die nachfolgenden Elektronen des n-Gebietes zurück. Das ist die *Raumladungszone*.

Legen wir nun an den pn-Übergang eine Gleichspannung (Pluspol an das n-Gebiet) nach Bild 200a, so »saugt« der Pluspol aus dem gegenüberliegenden p-Gebiet Elektronen und der Minuspol entsprechend Löcher aus dem n-Gebiet ab. Die Grenzschicht wird verbreitert und die Ladungsträgerdichte in ihr abgesenkt (ausgezogene Kurve im Bild 200b, gestrichelt ohne äußere Spannung). Das bedeutet ein Erhöhen des Sperrschichtwiderstandes; es fließt nur ein sehr geringer *Sperrstrom*. Im umgekehrten Fall liegt der Minuspol am n-Gebiet (Bild

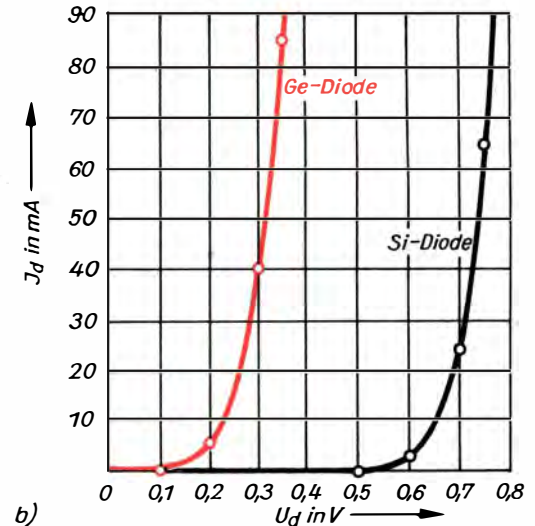
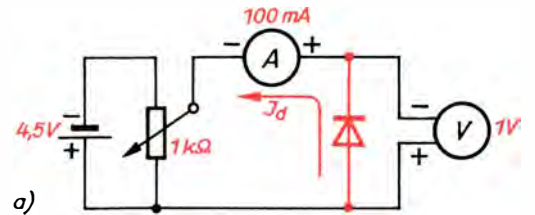
200c). Dadurch werden die Elektronen des n-Gebietes in das gegenüberliegende p-Gebiet und vom Pluspol die Löcher des p-Gebietes in das n-Gebiet »gedrückt«. Die Ladungsträgerdichte in der Grenzschicht wird größer (Bild 200d); dadurch sinkt der Sperrschichtwiderstand, und es fließt ein sehr starker *Durchlaßstrom*.

Nun wollen wir wieder experimentieren!

Wir nehmen die Kennlinien von Dioden auf

Wir untersuchen nach Bild 201 die *Kennlinien* für eine Germaniumdiode D_1 (für 0,1 A Durchlaßstrom I_d) sowie für eine Siliziumdiode D_2 (für 1 A Durchlaßstrom) nach Tabelle 2 im Anhang. Zuerst

Bild 201. Aufnahme der Durchlaß-Kennlinien von Germanium- und Siliziumdioden: a) Schaltung, b) Kennlinien



nehmen wir jeweils die *Durchlaß-Kennlinie* auf (Schaltung nach Bild 201a). Dann sind die Sperrströme I_{sp} an der Reihe: Die Anschlüsse der Diode werden vertauscht, das Potentiometer wird voll aufgedreht, der Spannungsmesser entfernt (die Sperrspannung beträgt dann $U_{sp} = 4,5 \text{ V}$). Wir tragen die Meßwerte zuerst in Tabellen ein und zeichnen dann die Kurven – beide in ein Diagramm nach Bild 201 b.

Den Sperrstrom messen wir jeweils zunächst bei normaler Zimmertemperatur und dann auch bei einer etwas höheren Temperatur. Zu diesem Zweck fassen wir das Diodengehäuse mit Daumen und Zeigefinger an.

Durchlaßfall

U_d in V	I_d in mA	
	Ge	Si
0,00	0,0	0,0
0,10	0,5	0,0
0,20	6,0	0,0
0,30	40	0,0
0,35	85	0,0
0,40		0,1
0,50		0,5
0,60		3,5
0,70		25
0,75		65

Sperrfall ($U_{sp} = 4,5 \text{ V}$)

	I_{sp} in mA bei	
	Zimmertemperatur	Handwärme
Ge	0,02	0,05
Si	nicht meßbar	

Auffällig ist, daß bei der Siliziumdiode ein Durchlaßstrom erst bei Spannungen ab etwa 0,5 V fließt, während dies bei Germanium bereits ab 0,1 V der Fall ist. Das ist materialbedingt und für alle Silizium-pn-Übergänge kennzeichnend.

Der Grund für den nicht meßbaren Sperrstrom der Siliziumdiode ist die im Vergleich zu Germanium niedrige *Eigenleitungsichte*. Nach den Do-

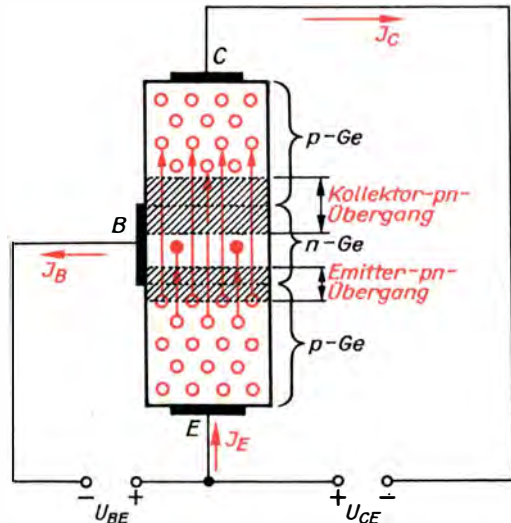
tierungsbeispielen (vgl. S. 157) ist – bei gleicher Dichte der in der Mehrzahl vorhandenen Ladungsträger (10^{18} cm^{-3}) – die Dichte der in der Minderheit vorhandenen Ladungsträger bei Silizium nur 10^2 cm^{-3} , bei Germanium dagegen 10^8 cm^{-3} . Der Sperrstrom ist bei Silizium zwar auch vorhanden, aber so klein, daß wir ihn nicht messen können.

Das Erwärmen auf Handwärme verursacht ein zusätzliches »Sprengen« von Bindungen; neue Ladungsträgerpaare entstehen und ermöglichen höheren Strom. Bei Germanium ließ sich das nachweisen; bei Silizium nicht, weil der Strom zu klein war.

Der Transistor als Verstärker

Einen Transistoraufbau erhält man, wenn man zwei pn-Übergänge dicht beieinander anordnet (Bild 202). Von zwei gegenüberliegenden Seiten ist in den n-leitenden Germaniumkristall je eine Indiumperle einlegiert, so daß sich *zwei* Grenzschichten herausbilden. Ihr Abstand liegt zwischen einem zehntel und einigen tausendstel Millimeter. Das Ganze ist sehr klein: Bei einem *Legierungstransistor* ist das n-Germanium ein 0,12 mm dickes (besser: dünnes) rechteckiges Plättchen (5 mm × 2 mm groß).

Bild 202. Wirkungsprinzip des pnp-Transistors



Auf jeder Seite wird ein Indiumkügelchen (0,3 mm Durchmesser) eingeschmolzen (aufgelegt). Während des Glühens dringen die Indiumatome von beiden Seiten in das Germanium ein und bilden eine Legierung. Wenn der Abstand der legierten Zonen wenige tausendstel Millimeter beträgt, muß der Glühprozeß (das Legieren) abgebrochen werden. Die legierten Zonen sind nun die p-Gebiete; dazwischen liegt das n-Gebiet, das nicht geändert worden ist.

Legierungstransistoren lassen sich technologisch verhältnismäßig einfach herstellen, haben aber eine relativ niedrige Grenzfrequenz. Die zur Zeit wichtigste Dotierungstechnik ist die *Diffusion*. In einem Diffusionsofen wird das Halbleitermaterial erwärmt und eine bestimmte Zeit hindurch einer Atmosphäre ausgesetzt, die mit Dotierungsmaterial (Störatomen) angereichert ist. In Abhängigkeit von Temperatur und Zeit dringen die Störatome verschieden tief ein; man kann daher die Lage des pn-Überganges genau bestimmen. Deshalb lassen sich auch wiederholt die geometrischen Abmessungen genau einhalten. Die Diffusionstechnik ist zur Grundlage der *Massenfertigung* sowie der *Mikroelektronik* (Herstellung ganzer Schaltungen auf einem Kristall) geworden.

In der oben geschilderten Anordnung (Bild 202) haben wir einen pnp-Transistor. Erhält umgekehrt p-leitendes Ausgangsmaterial beiderseitig je ein n-Gebiet, so ist das ein npn-Transistor. Jedes Gebiet hat einen grenzschichtfreien Drahtanschluß, Elektrode genannt. Bild 203 zeigt die Schaltzeichen der beiden Transistorarten. Die Bezeichnung der Elektroden bedeutet: E *Emitter*, B *Basis* und C *Kollektor*. Der Name »Basis« ist nur historisch begründet. Als die amerikanischen Physiker *Bardeen*, *Brattain* und *Shockley* nach 1945 den ersten Spitzentransistor entwickelten, war das mittlere Germaniumplättchen (rein äußerlich gesehen) die Basis für die beiden sehr dicht (0,05 . . . 0,25 mm) nebeneinander

der aufgesetzten Metalldrahtspitzen. Aus dieser Zeit stammt noch das Schaltzeichen des Transistors. Emitter stammt vom Lateinischen *emittere* = aus-senden (hier von Ladungsträgern); Kollektor kommt vom Lateinischen *colligere* = sammeln (ebenfalls von Ladungsträgern).

Die Wirkungsweise des Transistors

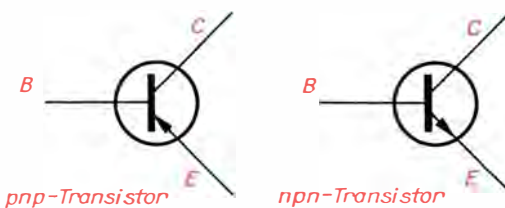
Sie beruht auf dem Zusammenwirken zweier pn-Übergänge: *Mit dem in Durchlaßrichtung betriebenen Emitter-pn-Übergang wird der in Sperrichtung gepolte Kollektor-pn-Übergang gesteuert*. Beide pn-Übergänge können wir als Dioden auffassen, die beim pnp-Transistor mit den Kathoden gegeneinander geschaltet sind. Über eine solche Diodenschaltung vermag nur ein geringer Sperrstrom zu fließen. In der am meisten verwendeten *Emitterschaltung* liegt bei pnp-Transistoren am Emitter der positive, am Kollektor der negative Pol der Spannungsquelle U_{CE} ; der hier zwischen E und C fließende Sperrstrom wird als *Kollektor-Reststrom* bezeichnet.

Legen wir nach Bild 202 zusätzlich zur Kollektorspannung U_{CE} noch eine Spannung U_{BE} zwischen Basis und Emitter, und zwar mit dem Minuspol an die Basis, so ist der Emitter-pn-Übergang in Durchlaßrichtung gepolt. Jetzt fließt ein Durchlaßstrom vom Emitter zur Basis; er wird *Basisstrom* genannt. Die Löcher aus dem Emittergebiet strömen in die Basis und »rekombinieren« (vereinigen sich wieder) *nur teilweise* mit Elektronen des Basis-n-Gebietes. Die Mehrzahl der Löcher durchleitet, vom negativen Kollektor angezogen, die schmale Basiszone und wird vom Kollektor »eingesammelt«; der *Kollektorstrom* steigt so erheblich an. Damit der Basisstrom gegenüber dem Kollektorstrom gering bleibt, muß die Basiszone sehr schmal sein. Je breiter diese nämlich wird, um so mehr Emitterlöcher rekombinieren auf dem Weg zum Kollektor-pn-Übergang mit Elektronen der Basis-n-Schicht; das führt zu einem höheren Basisstrom und zu einem geringeren Kollektorstrom.

Ist die Basiszone schmal in dem Sinne, daß die Emitter-Löcher ohne größeren Rekombinationsverlust bis zum Kollektor gelangen, so läßt sich der Kollektorstrom durch den Basisstrom steuern. *Eine geringe Erhöhung des Basisstromes bewirkt ein starkes Ansteigen des Kollektorstromes.*

Nach der Theorie nun wieder einige Versuche!

Bild 203. Schaltzeichen von Transistoren



Wir nehmen Kennlinien von Transistoren auf

Wie bereits bei den Dioden-Kennlinien praktiziert, verwenden wir auch jetzt Germanium- und Siliziumtypen; geschaltet wird nach Bild 204a. Die Transistoranschlüsse zeigt Tabelle 2.

Für uns sind wichtig:

1. $I_C = f(I_B)$; das ist die I_C - I_B -Kennlinie. Daraus ermitteln wir die *Gleichstromverstärkung*

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

und den *Stromverstärkungsfaktor*

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

2. $I_C = f(U_{BE})$; das ist die I_C - U_{BE} -Kennlinie. Sie ist wichtig zur Erklärung des Verstärkungsvorgangs. Beide Kennlinien nehmen wir für einen Ge-pnp-Typ T_1 und einen Si-npn-Typ T_2 nach Tabelle 2 auf. Als Spannungsquelle für U_{CE} verwenden wir Flachbatterien 4,5 V; U_{BE} ist wie beim Diodenversuch einstellbar.

Solange $U_{BE} = 0$ V ist, fließt kein (oder nur ein sehr geringer) Kollektorstrom. Für den Si-npn-

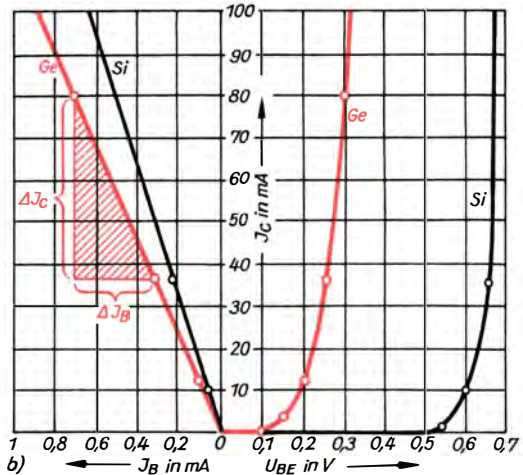
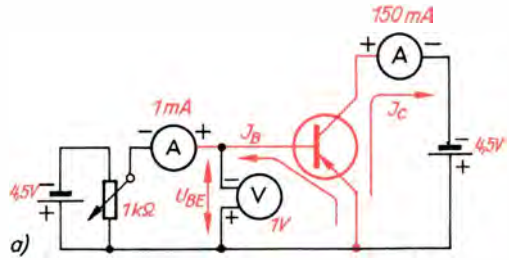


Bild 204. Schaltung für die Aufnahme der Kennlinien von Germaniumtransistoren

Meßwerte für den Si-Transistor

U_{BE} in V	I_B in mA	I_C in mA
0...0,5	0,00	0,00
0,55	0,02	1,00
0,60	0,07	10
0,65	0,22	36
0,675	0,90	150

Meßwerte für den Ge-Transistor

U_{BE} in V	I_B in mA	I_C in mA
0,00	0,00	0,00
0,10	0,00	0,00
0,15	0,03	3,00
0,20	0,12	12
0,25	0,35	36
0,30	0,70	80

Transistor polen wir die beiden Batterien und die drei Meßgeräte um.

Alle Wertpaare übertragen wir in zwei Diagrammhälften nach Bild 204b für Ge (rot) und Si (schwarz). Bei Silizium wird der letzte Meßwert aus Platzgründen nicht mehr eingezeichnet.

Bestimmung des *Stromverstärkungsfaktors* β für den Ge-Transistor

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(80 - 36) \text{ mA}}{(0,7 - 0,3) \text{ mA}} = \frac{44}{0,4} = 110.$$

Bestimmung der *Gleichstromverstärkung* B für den Ge-Transistor

$$B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{80 \text{ mA}}{0,7 \text{ mA}} = 115.$$

Beide Ergebnisse sind größenordnungsmäßig gleich.

Wir können B sehr leicht bestimmen: I_B ein-

stellen, I_C ablesen, dividieren. Die anderen Kennlinien haben den gleichen Verlauf wie die Durchlaß-Kennlinien von Dioden (vgl. Bild 201). Das kommt daher, daß der Emittier-pn-Übergang in Durchlaß betrieben wird (entsprechend Durchlaß-Kennlinien) und zwischen I_B und I_C (nach linkem Diagramm im Bild 204c) eine fast lineare Abhängigkeit besteht.

Dieser Kennlinie können wir entnehmen, wie Änderungen der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} den Kollektorstrom I_C ändern. Das ist die Grundlage für das Verstehen der *Verstärkerwirkung*. Beim *Verstärker* fließt I_C über einen Kollektorwiderstand und ruft an diesem entsprechende Spannungsschwankungen hervor; es genügt daher, die Stromänderung zu betrachten.

Bild 204c zeigt gleichzeitig: Damit bei Ansteuerung mit einer Wechselspannung (Niederfrequenz, NF) der Kollektorstrom diese Änderungen »zweiseitig« mitmachen kann und nicht etwa als »Gleichrichter« wirkt, ist eine Vor-Gleichspannung nötig. Sie wird mit einem Basiswiderstand oder -spannungsteiler aus der Betriebsspannung gewonnen. Den richtigen *Arbeitspunkt* ermitteln wir folgendermaßen:

Kollektorwiderstand (beispielsweise $R_C = 2\text{ k}\Omega$) und Betriebsspannung (z. B. $U_C = 4,5\text{ V}$) sind vorgegeben; der maximale Kollektorstrom beträgt dann

$$I_{C\text{max}} = \frac{U_C}{R_C} = \frac{4,5\text{ V}}{2\text{ k}\Omega} = 2,25\text{ mA.}$$

Minimaler Kollektorstrom: $I_{C\text{min}} = 0\text{ mA.}$

Genau in der Mitte dazwischen liegt der Arbeitspunkt, nämlich bei $\frac{I_{C\text{max}}}{2} = \frac{2,25\text{ mA}}{2} = 1,125\text{ mA.}$

Damit dieser Kollektorstrom I_C fließen kann, ist eine bestimmte Basisvorspannung notwendig. Diese Vorspannung darf aber nur an die Basis und nicht an die vorgeschaltete Quelle der zu verstärkenden Wechselspannung gelangen; deshalb wird vor die Basis ein Kondensator C_B geschaltet (Bild 205). Der Kondensator C_C hält Gleichspannung vom Ausgang fern.

Um die Wirkungsweise des Transistors als Verstärker zu verstehen, betrachten wir das dreiteilige Diagramm (Bild 206). Links oben ist die Kennlinie des Transistors dargestellt; darunter liegt das Zeitdiagramm der Eingangsspannung. Die zu verstärkende Wechselspannung ist der Basis-Vorspannung überlagert. Das Zeitdiagramm rechts oben zeigt, wie der Kollektorstrom von der Eingangs-Wechsel-

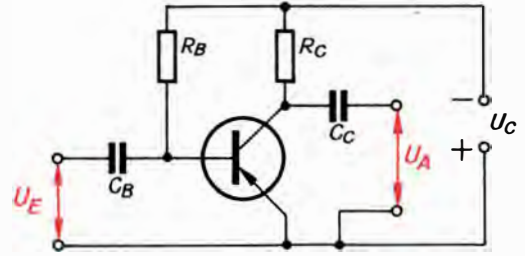


Bild 205. Grundsätzliche Schaltung eines Verstärkers für Wechselspannungen

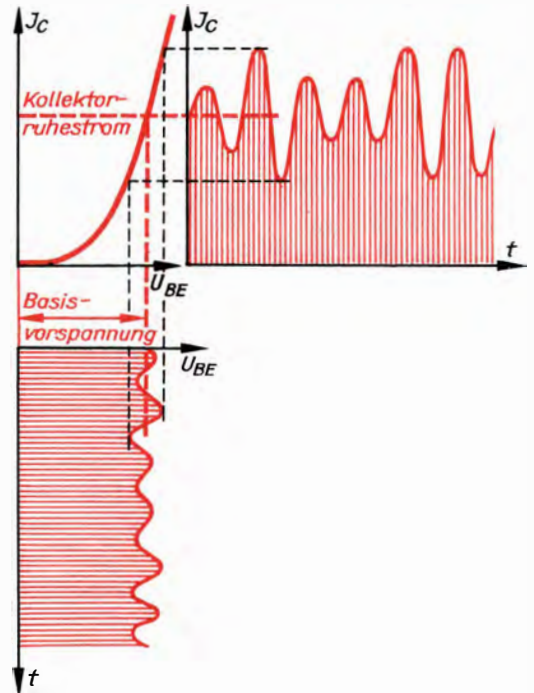


Bild 206. Zur Verstärkerwirkung eines Transistors

spannung beeinflusst wird. Die Änderungen des Kollektorstromes entsprechen genau denen der zu verstärkenden Spannung.

Es gibt viele Bauarten von Transistoren und drei verschiedene Schaltungen: die *Emitterschaltung*, die *Basisschaltung* und die *Kollektorschaltung* (Bild 207). Wir wählen die für unsere zu verstärkenden niederfrequenten Tonschwingungen günstigste und in der Praxis viel verwendete Emitterschaltung.

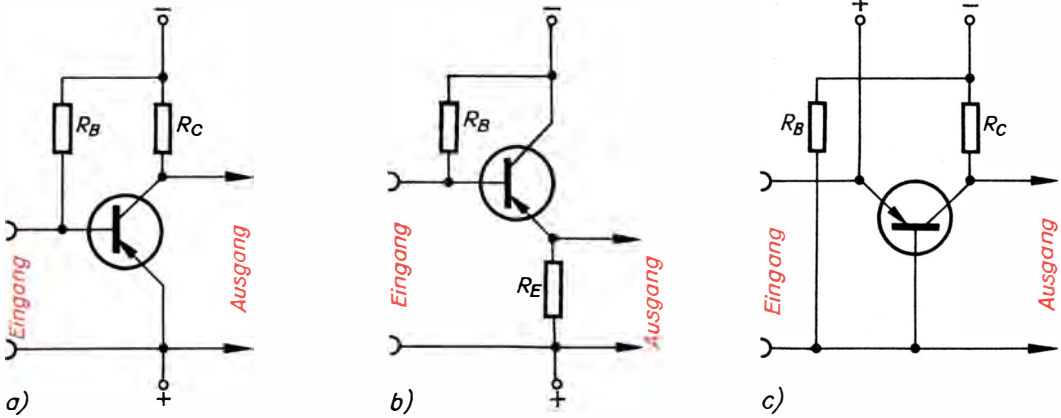


Bild 207. Schaltungsarten eines Transistors: a) Emitter-schaltung, b) Kollektorschaltung, c) Basisschaltung

Wir bauen den NF-Verstärker I für geringe Leistung

Nach der vielen, aber zum Verständnis der Vorgänge notwendigen Theorie nun die Praxis! Bevor wir unseren Niederfrequenz(NF)-Verstärker bauen, stellen wir nach Bild 208 einen einstufigen Verstärker aus den einzelnen Schaltteilen vorübergehend und versuchsweise zusammen: $R = 220 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \mu\text{F}/10 \text{V}$, T nach Tabelle 2. Wir schließen ihn (in der Schaltung links) an unseren Mikrofonkreis an und beobachten, ob der Empfang im Kopfhörer lauter geworden ist. Wenn wir den Elektrolytkondensator in die Basisleitung einbauen, müssen wir die Polarität beachten: + an die Basis! Ist die

Verstärkung im Kopfhörer deutlich festzustellen, beginnt der Bau unseres dreistufigen *NF-Verstärkers I* in seiner geplanten Form.

Er wird auf einer kleinen *Grundplatte* aus Hartpapier (6 mm dick) aufgebaut, die drei Anschluß-Bananenstecker trägt (Bild 209a). Alle Schaltelemente sind auf der senkrechten *Montageplatte* (Bild 209b) befestigt, die aus 3 mm dickem Hartpapier hergestellt wird. 32 unbezeichnete Bohrungen von 1 mm Durchmesser nehmen kleine Kupfer- oder Messing-Drahtstifte auf, an denen die Schaltelemente verlötet werden (dürfen an der Rückseite nicht vorstehen).

Bild 210 zeigt die Vorderseite des NF-Verstärkers, Bild 211 den Schaltplan. Die Rückseite ist im Bild 185 zu sehen: die Batterie, von der Schelle gehalten, mit den beiden Kontaktwinkeln; die Gewindebolzen der beiden Buchsen und die Anschlüsse des Potentiometers und des Schalters. Nicht sichtbar ist das kleine Halteblech für die Batterie (an der anderen Schmalseite der Grundplatte). Die Batterie

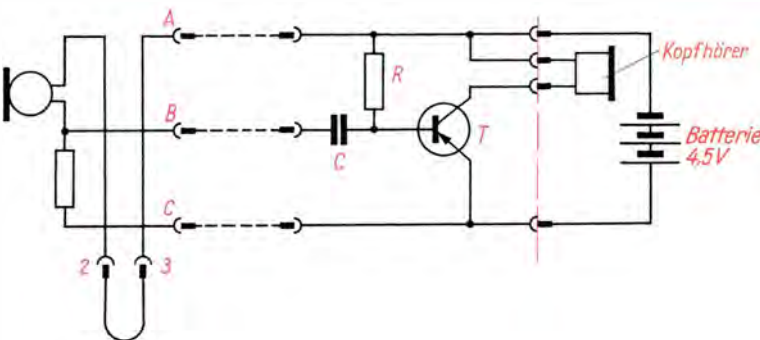
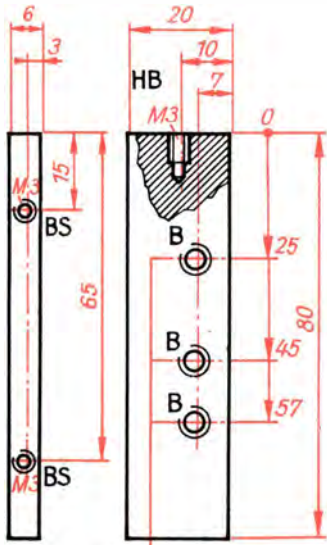
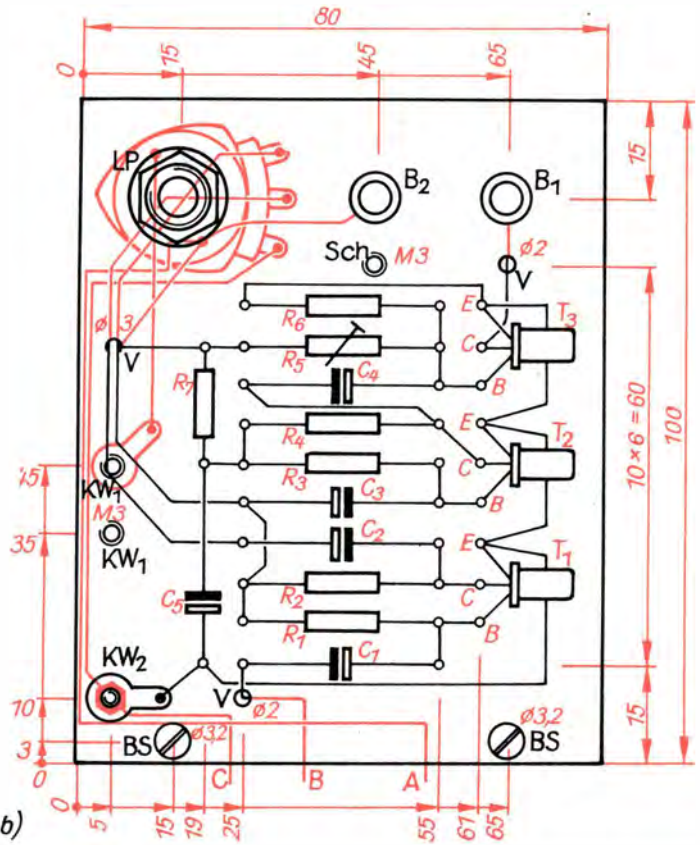


Bild 208. Aufbau eines einstufigen NF-Verstärkers



M4 oder M5, richtet sich nach dem Bananenstecker-Gewinde

a)



b)



Bild 209. NF-Verstärker I: a) Grundplatte, b) Montageplatte mit Verdrahtungsplan: BS Befestigungsschrauben M3 zwischen Grundplatte und Montageplatte, HB Halblech für Flachbatterie, B Bananenstecker (Gewindegröße richtet sich nach dem Gewinde der Bananenstecker), V Verbindungsleitung, KW₁ breiter Kontaktwinkel für den langen Kontaktstreifen der Flachbatterie, KW₂ schmaler Kontaktwinkel zum kurzen Kontaktstreifen, Sch Blechselle, B₁ und B₂ Telefonbuchsen, LP Lautstärkepotentiometer mit Schalter

Bild 210. Unser NF-Verstärker I auf dem Mikrofonbrett

auf der Rückseite wird leicht auswechselbar mit Schelle, Halblech und Kontaktwinkeln gehalten. Verdrahtet wird nach Foto, Verdrahtungsplan und Schaltbild (Bild 209b, Bild 210 und Bild 211). Nachstehend die Schaltelemente unseres NF-Verstärkers I: T_1 , T_2 und T_3 nach Tabelle 2 (S. 243): $C_1 \dots C_4 = 10 \mu\text{F}/6\text{V}$; $C_5 = 50 \mu\text{F}/6\text{V}$; $R_1 = 200$ bis $1000 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 100 \dots 500 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 2,2 \text{ k}\Omega$; $R_5 = 10 \text{ k}\Omega$ (Einstellwiderstand $0,1 \text{ W}$); $R_6 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_7 = 470 \Omega$; $P = 5 \text{ k}\Omega/\log$. (Lautstärkepotentiometer mit logarithmischer Kennlinie, mit Schalter S gekoppelt); $Ba = 4,5 \text{ V}$. Die Widerstände müssen eine Belastbarkeit von $0,1 \text{ W}$ haben.

Die Größen der Widerstände R_1 , R_3 und R_5 hängen von den Stromverstärkungsfaktoren der Transistoren T_1 , T_2 und T_3 ab. Wir ermitteln die richtigen Werte für R_1 und R_3 , indem wir in Reihe zu R_2 bei X bzw. zu R_4 bei Y einen Strommesser schalten (Pluspol zum Widerstand, Meßbereich etwa 3 mA) und bei X einen Kollektorstrom für T_1 von $0,4 \dots 0,5 \text{ mA}$, bei Y für T_2 einen Strom von $0,8 \dots 1,0 \text{ mA}$ einstellen. Zeigt der Strommesser einen höheren Wert an, ist der Widerstand R_1 bzw. R_3 zu klein; liegt der Strom unter dem angegebenen Wert, muß der Widerstand verkleinert werden.

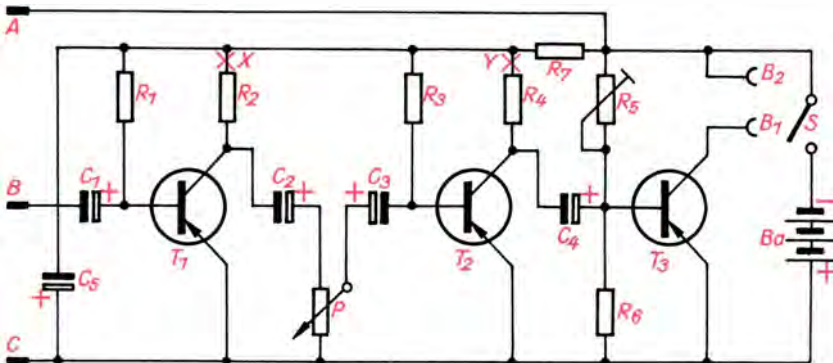
Zum Einstellen des Kollektorstromes der Endstufe schließen wir an die Telefonbuchsen unseren Kopfhörer und den Strommesser in Reihe. Wir verkleinern, vom Größtwert beginnend, langsam den wirksamen Widerstandswert des Einstellwiderstandes R_5 , bis der Strommesser einen Strom von $1,5 \text{ mA}$ anzeigt. Diese Einstellung ist nicht endgül-

tig. Wird ein anderes Ausgangsbauelement angeschlossen, etwa ein Lautsprecher-Übertrager, so muß ein anderer Kollektorstrom eingestellt werden: $3 \dots 5 \text{ mA}$. Aus diesem Grund verwenden wir keinen Festwiderstand.

Bei der *Funktionsprüfung mit Mikrofon und Kopfhörer* muß dieser schon wie ein kleiner Lautsprecher wirken. Geschaltet wird wie im Bild 208, nur mit dem Unterschied, daß der Verstärker jetzt drei Stufen hat. Warum schalten wir nicht gleich den Lautsprecher an Stelle des Kopfhörers ein? Das liegt daran, daß die Widerstände des Verstärker-ausganges und der Lautsprecher-Schwingspule ganz und gar nicht zusammenpassen! Die Schwingspule hat etwa 6Ω Wechselstrom-Widerstand, *Impedanz* genannt. Wir dürfen diesen Widerstand nicht mit dem Ohmschen, das heißt Gleichstrom-Widerstand, verwechseln! Unser NF-Verstärker I hat dagegen einen Ausgangswiderstand (Impedanz) von 2 bis $5 \text{ k}\Omega$. Würden wir die Schwingspule unmittelbar an den Ausgang des Verstärkers legen, so würde der Lautsprecher infolge der Fehlanpassung (6Ω zu $2 \dots 5 \text{ k}\Omega$) im günstigsten Falle ein »Leisesprecher« sein.

Um dem abzuhelpen, fügen wir ein Zwischenglied zum Anpassen der sehr unterschiedlichen Widerstände ein: einen *Übertrager*, auch Impedanzwandler genannt. Der Bauart nach ist er ein Transformator; sein Zweck ist aber nicht, Wechselspannungen und Wechselströme zu ändern, sondern den Widerstand des Lautsprechers dem Ausgangswiderstand des Verstärkers anzugleichen. Wir verwenden dazu unseren Experimentier-Transformator (Bild 104). Um herauszufinden, wie der Transformator als Übertrager geschaltet werden muß, brauchen wir den Zusammenhang zwischen den Windungszahlen

Bild 211. Schaltbild des NF-Verstärkers I



und den Widerständen; Ausgangsbeziehung ist die Transformatorgleichung:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Auch für die Impedanzen Z gilt das Ohmsche Gesetz (hier des Wechselstromes!):

$$Z_p = \frac{U_p}{I_p} \text{ und } Z_s = \frac{U_s}{I_s}$$

Stellen wir diese beiden Zusammenhänge nach den Spannungen um ($U_p = Z_p \cdot I_p$ und $U_s = Z_s \cdot I_s$) und setzen sie in die Ausgangsbeziehung ein, so erhalten wir:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{Z_p}{Z_s} \cdot \frac{I_p}{I_s}$$

$\frac{I_p}{I_s}$ ist aber nach der Transformatorgleichung nichts anderes als $\frac{N_s}{N_p}$; also setzen wir diesen Ausdruck ein:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{Z_p}{Z_s} \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

Durch Multiplikation dieser Gleichung mit N_p und Division durch N_s ergibt sich schließlich $\frac{N_p^2}{N_s^2} = \frac{Z_p}{Z_s}$; die Impedanzen sind den Quadraten der Windungszahlen direkt proportional. Je größer die Windungszahl, um so größer ist der Widerstand. Daraus leiten wir ab, daß die Transformatorspule mit der großen Windungszahl jetzt als Primärspule dienen muß und der niederohmige Lautsprecher an die Spule mit weniger Windungen anzuschließen ist. Der Übertrager muß also im umgekehrten Sinne

als bei der bisherigen Verwendung (als Transformator) geschaltet werden.

Für $Z_p = 5000 \Omega$, $N_p = 5500$ und $N_s = 180$ (Windungen) erhalten wir einen sekundären Widerstand von:

$$Z_s = \frac{Z_p \cdot N_s^2}{N_p^2} = \frac{5000 \Omega \cdot 180^2}{5500^2} = 5,36 \Omega$$

Das bedeutet: Unser Lautsprecher mit 6Ω Spulenwiderstand kann mit unserem als Übertrager wirkenden »Abwärts-Transformator« an den NF-Verstärker I angeschlossen werden. Weil dieser Übertrager gut zum NF-Verstärker I paßt, nennen wir ihn Übertrager I.

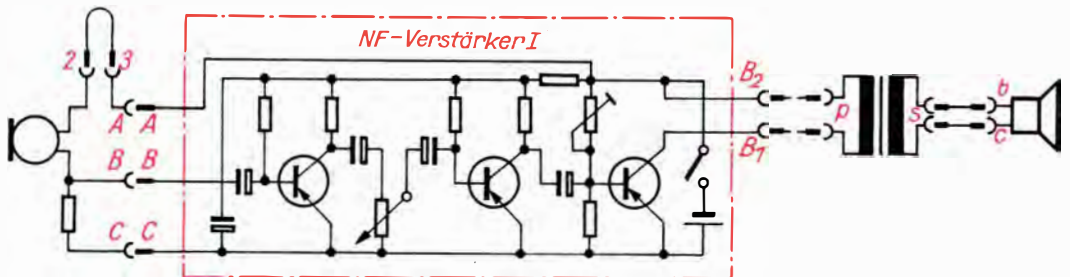
Erste Experimente mit dem Lautsprecher

Die Mikrofon-Übertragungsanlage

Jetzt haben wir alles beisammen, um zur Funktionsprüfung gleich eine vollständige Mikrofon-Übertragungsanlage mit Lautsprecher, Übertrager und NF-Verstärker I nach Schaltbild 212 aufzubauen, wie sie bei Vorträgen in großen Sälen oft nötig ist. In einer Leitung vom Verstärkerausgang zum Übertrager schalten wir einen Strommesser und stellen mit Einstellwiderstand R_5 (Bild 211) für die Endstufe einen Kollektorstrom von $3 \dots 5 \text{ mA}$ ein. Die Sekundärwicklung des Übertragers (die ursprüngliche Primärwicklung des Transformators!) wird an die Buchsen b und c unseres Lautsprechers angeschlossen; an der Mikrofonplatte sind die Buchsen 2 und 3 kurzgeschlossen. Wir benutzen zunächst Mikrofon, Lautsprecher und Übertrager »aus eigener Produktion«.

Dann wechseln wir das selbstgebaute Mikrofon gegen ein Kapselmikrofon aus. Dabei kann wieder

Bild 212. Mikrofon-Übertragungsanlage



nur in einer Richtung übertragen werden, denn der Verstärker arbeitet mit festgelegtem Eingang und Ausgang nur in einer bestimmten Richtung. Für die Verstärkung bei Vorträgen reicht das noch völlig aus, auch beispielsweise für das Übertragen in einen anderen Raum. Wenn sich jedoch zwei Teilnehmer miteinander auf ähnliche Weise – mit Lautsprecher und Mikrofon – unterhalten wollen, dann brauchen wir noch eine Vorrichtung, die im Wechsel der Sprechrichtung auch die Geräte einschaltet (Mikrofon und Lautsprecher) und umschaltet (Verstärker). Dieses kleine, aber wichtige Gerät ist der *zweipolige Umschalter*.

Der Umschalter ist mit neun Telefonbuchsen auf einer Grundplatte angeordnet; Bild 213a zeigt, wie die »Urform« der Grundplatte (Bild 186a) zusätzlich bearbeitet werden muß, damit sie zur Umschaltergrundplatte wird. In die 10-mm-Mittelbohrung wird der (gekauft) Umschalter von unten eingesetzt und mit der dazugehörigen Mutter festgeschraubt. Im Bild 213b ist weiter die Verdrahtung und im Bild 213c die Schaltung angegeben. Da der Umschalter ziemlich tief liegt, genügen die üblichen GummifüÙe nicht; wir nehmen längere HolzfüÙe oder etwa 38 mm lange M3-Schrauben, die wir unten an der Platte mit je einer Mutter sichern (kontern). Die Schraubenköpfe werden mit Gummi oder Kork umklebt. Dieser Umschalter ist sehr vielseitig verwendbar: für wahlweisen Anschluß zweier Mikrofone oder eines Mikrofons und eines Empfängers (ohne Lautsprecher), und zwar nicht nur für die Wechselsprechanlage.

Wir bauen eine Wechselsprechanlage

Zuerst die *Wechselsprechanlage ohne Rufmöglichkeit seitens der Gegenstation* (Bild 214). Hierzu wird ein zweiter Lautsprecher gebraucht. Wenn wir ihn nicht selbst bauen wollen, kaufen wir ihn mit den Werten 4...6Ω/3 W und bauen ihn in ein Gehäuse ein (Bild 215). Wir nehmen einen 3-W-Lautsprecher, weil wir später noch einen größeren Leistungsverstärker (II) bauen wollen. Vorläufig erhält der Überträger I seinen Platz mit im Lautsprechergehäuse (ohne Grundbrett).

Die Buchsen 1...6 des Umschalters werden nach Schaltbild 216 mit den entsprechenden Buchsen des Mikrofons und des Lautsprechers verbunden. An a, b und c schließen wir die Gegenstation (im Bild rechts) an. Batterie, Umschalter und Klingel

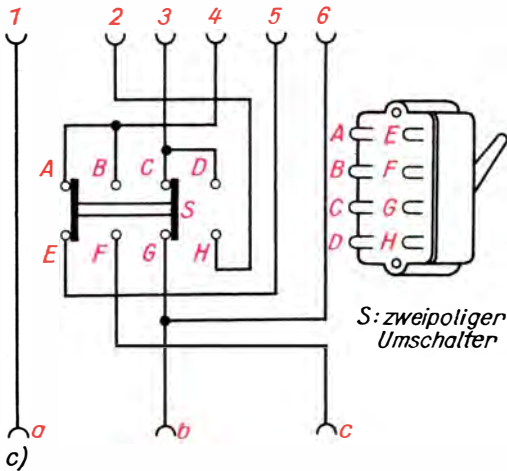
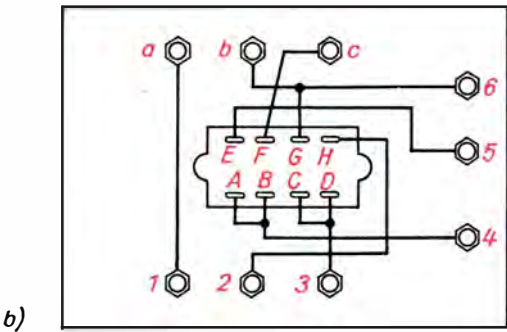
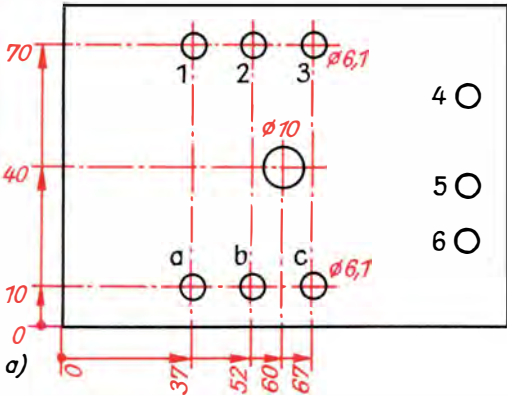


Bild 213. Zweipoliger Umschalter: a) Ergänzung zur Grundplatte, b) Verdrahtung, c) Schaltung mit Schalteranschlüssen

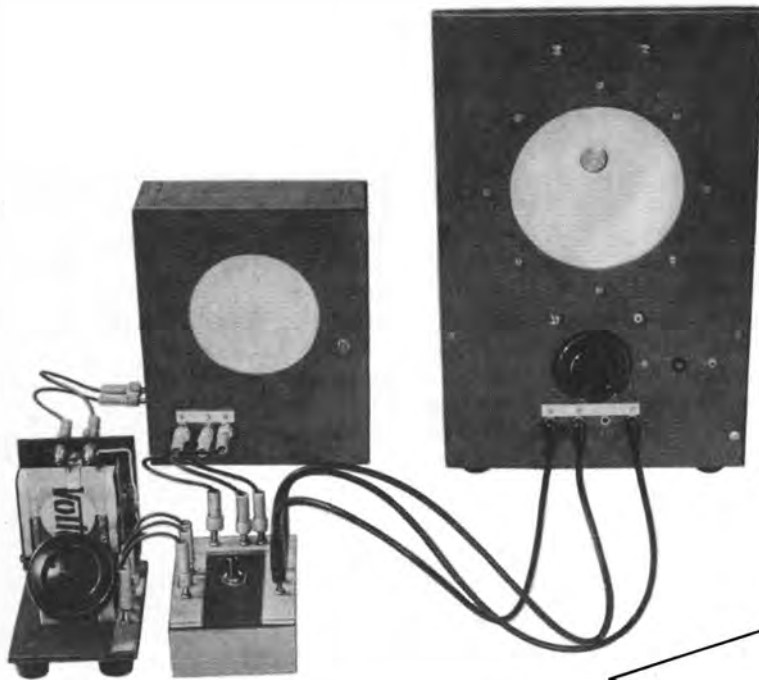


Bild 214. Ansicht unserer Wechselsprechanlage mit NF-Verstärker I

(oder Summer) lassen wir bei dieser Schaltung fort, weil wir ja zunächst ohne diese Rufmöglichkeit sprechen wollen. Durch Betätigen des zweipoligen Umschalters ist ein Wechselsprechen möglich. Die Gegenstation muß, weil sie selber keine Rufmöglichkeit hat, auf die Aufforderung warten.

Der gesamte Aufbau gilt auch für die *Wechselsprechanlage mit Rufmöglichkeit seitens der Gegenstation*: Wir schalten zusätzlich Umschalter, Batterie und Klingel ein; Ruf über Leitungen b und c, Anschluß der Klingel an c und b der Umschalterplatte (die Klingel spricht nur an, wenn der Umschalter auf »Hören« steht). Beide Stationen haben Lautsprecher und Mikrofon, die Hauptstation ist mit dem NF-Verstärker versehen.

Bei Sprechruhe muß die Hauptstelle auf »Hören« (am Umschalter) geschaltet sein. Sie ruft die Gegenstation durch Umschalten auf »Sprechen« und durch Rufen (Hineinsprechen in das Mikrofon). Die Gegenstation ruft, wie bekannt, durch ein Klingelzeichen.

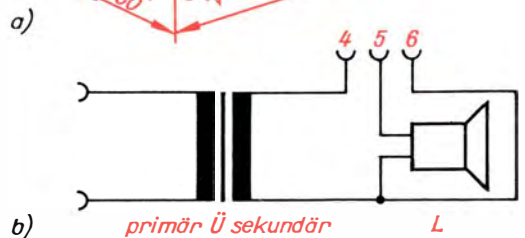
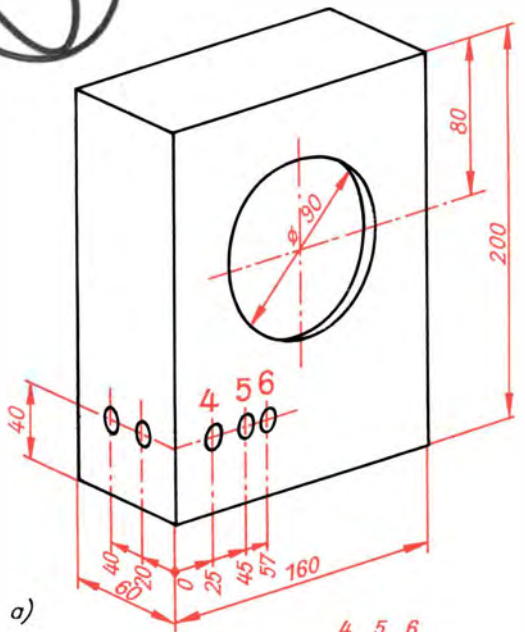


Bild 215. Lautsprecher: a) Gehäuse, b) Schaltung mit Übertrager

primär Ü sekundär L

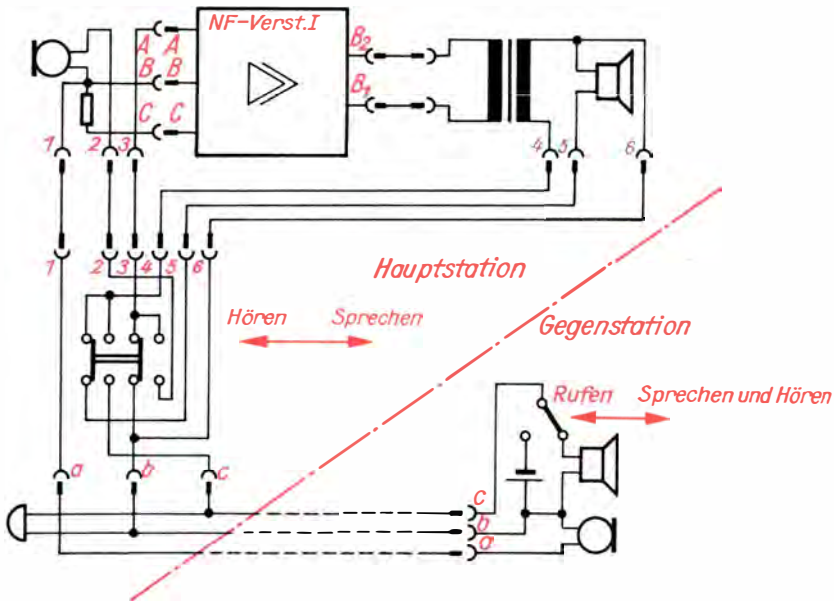


Bild 216. Wechselsprechanlage mit Rufmöglichkeit durch die Gegenstation

NF-Verstärker II großer Leistung für höhere Ansprüche

Der NF-Verstärker I ergibt wegen seiner relativ geringen Leistung naturgemäß nur eine entsprechend geringe Lautstärke. Wir bauen daher den NF-Verstärker II (Bilder 217 und 218) mit größerer Leistung; geschaltet wird nach Bild 219. Die erste Stufe mit dem Transistor T_1 (siehe Tabelle 2, S. 243)

ist eine normale Vorstufe in Emitterschaltung; das Lautstärkepotentiometer liegt diesmal unmittelbar am Eingang. Die zweite Stufe mit dem Transistor T_2 arbeitet in Kollektorschaltung; ihr Arbeitswiderstand ergibt sich aus der Parallelschaltung des Widerstandes R_5 und dem Eingangswiderstand des Endstufentransistors T_3 . Da T_3 mit 20 V bei 0,2 A betrieben wird (das ergibt eine Gleichstromleistung von $P = 20 \text{ V} \cdot 0,2 \text{ A} = 4 \text{ W!}$), muß die entstehende Wärme über einen Kühlkörper abgeleitet werden. Die Kombination R_7/C_4 ist Siebglied (vgl. S. 102) für die Endstufe; R_6/C_2 ist Siebglied für die Vorstufen, dient aber zugleich der Entkopplung.

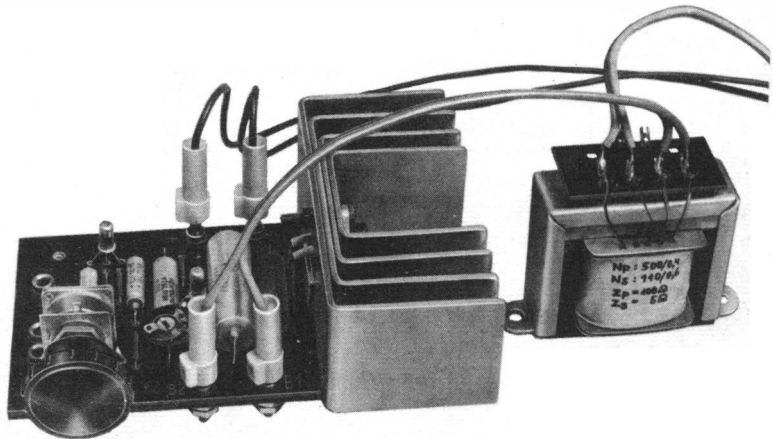


Bild 217. Unser NF-Verstärker II mit Übertrager

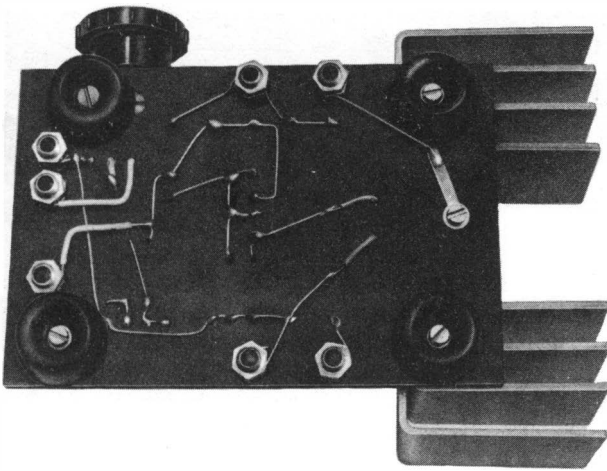
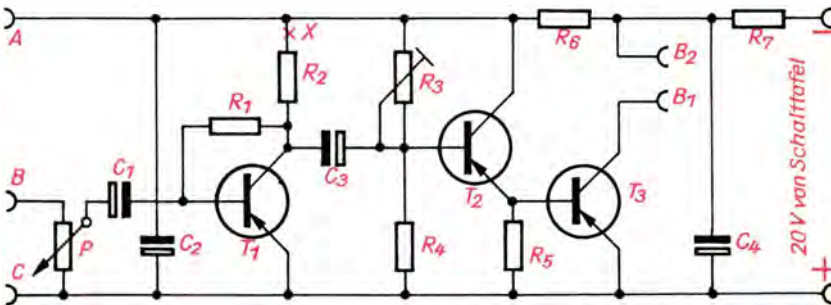


Bild 218. Die Unterseite des NF-Verstärkers II

Bild 219. Schaltbild des NF-Verstärkers II



Die Spannung wird der Schalttafel entnommen, die für diesen Zweck etwas ergänzt werden muß: Sie erhält einen zusätzlichen Ladekondensator $2000\mu\text{F}/25\text{V}$, und zwar unmittelbar parallel zu den Gleichspannungs-Ausgangsbuchsen. Außerdem bauen wir bei dieser Gelegenheit noch vier Kondensatoren von je $4,7\text{ nF}$ ein, und zwar je einen parallel zu einer Diode des Graetz-Gleichrichters. Sie sind für die späteren Radio-Versuche mit dem NF-Verstärker II nötig, um Brummscheinungen zu vermeiden.

Aufgebaut wird der Verstärker II auf einer Grundplatte aus Hartpapier entsprechend Bild 220. Die Bauelemente sind mit den rechtwinklig abgeboenen Lötanschlüssen »von oben« durchzustekken und unterhalb des Brettchens zu verdrahten (im Bild 220 rot gezeichnet). Bei Leitungskreuzungen verwenden wir isolierten Schaltaht. Das Potentiometer wird mit einem Winkel nach der Norm N_6 (Bild 8) angeschraubt (Maße in mm): $a = 15$,

$b = 35$, $c = 20$, $d = 1$, $e_1 = 10$, $f_1 = 5$, $f_2 = 10$, $g_1 = 5$, $g_2 = 10$, $h_1 = 10$, $h_2 = 0$.

Zum Ableiten der in T_3 entstehenden Wärme fertigen wir nach Bild 220 aus 40 mm breiten und 2 mm dicken Aluminiumstreifen einen Kühlkörper mit einer Oberfläche von 200 cm^2 . Die gebogenen Streifen werden gemeinsam mit dem Transistor T_3 verschraubt. Vorher löten wir an die Anschlüsse von Basis und von Emitter die Zuleitungsdrähte und schieben Isolierschlauch über die Lötstellen. Der Kühlkörper wird mit einem kleinen Winkel aus Aluminium auf dem Grundbrett angeschraubt; die Maße nach Norm N_6 in mm: $a = 20$, $b = 15,5$, $c = 20$, $d = 2$, $e_1 = e_2 = 3$, $f_1 = f_2 = 5$, $g_1 = g_2 = 10$, $h_1 = h_2 = 0$.

Die Bezeichnungen der Anschlußbuchsen sind bei beiden Verstärkern (I und II) gleich; in den folgenden Einsatzbeispielen können daher wahlweise beide verwendet werden. Hier die Werte der Bauelemente des NF-Verstärkers II: T_1 , T_2 und T_3

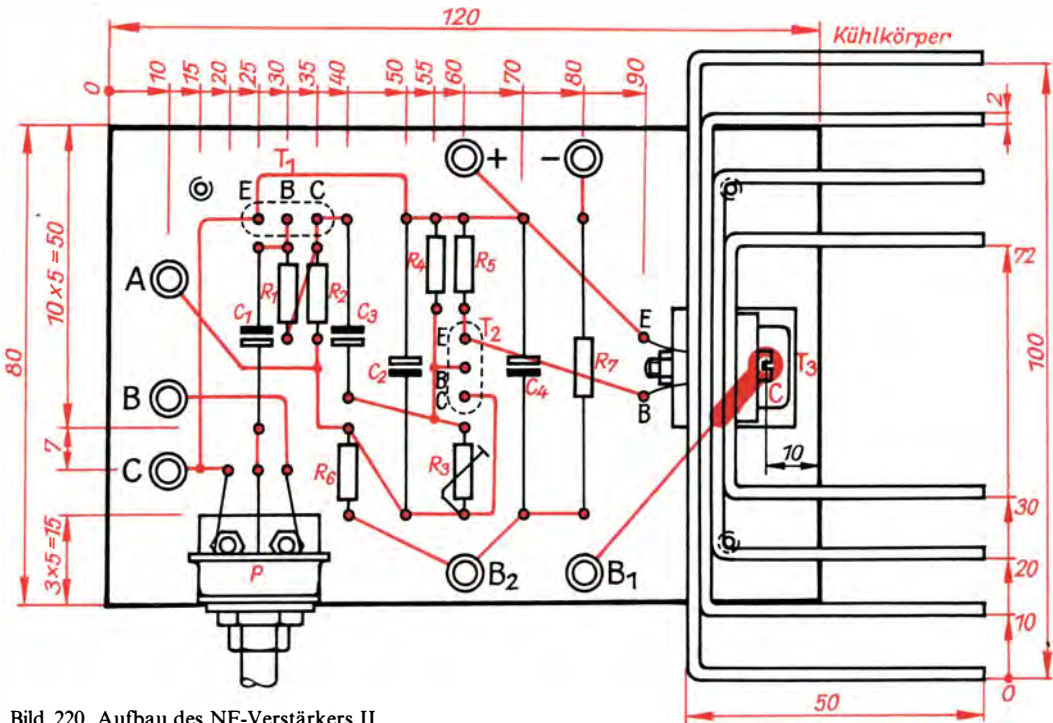


Bild 220. Aufbau des NF-Verstärkers II

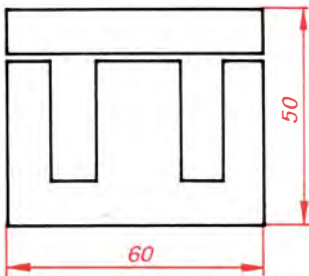


Bild 221. Kernbleche mit EI-Schnitt für den Übertrager II

nach Tabelle 2 (Anhang); P : 100 k Ω /log.; $R_1 = 50 \dots 500$ k Ω ; $R_2 = 2,2$ k Ω ; $R_3 = 100$ k Ω ; $R_4 = 2,2$ k Ω ; $R_5 = 270$ k Ω ; $R_6 = 2,7$ k Ω ; $R_7 = 20 \Omega/1$ W; $C_1 = 20 \mu\text{F}/10$ V; $C_2 = 100 \mu\text{F}/10$ V; $C_3 = 20 \mu\text{F}/10$ V; $C_4 = 500 \mu\text{F}/25$ V.

Zum Verstärker II gehört auch ein Übertrager II. Seine Kernbleche stellen wir diesmal nicht selber her; wir besorgen uns Kernbleche EI 60 oder einen

alten Übertrager dieser Größe: Kern 60 mm lang, 50 mm hoch, 20 mm dick (Bild 221). Die Maße des Spulenkörpers nach Norm N₁ in mm: $a_1 = b_1 = 40$, $a_2 = b_2 = 22$, $a_3 = b_3 = 20$, $c = 29$, $d = 1$. Der Primärwiderstand des Übertragers II beträgt nach

$$\text{den Betriebsdaten von } T_3: Z_p = \frac{20 \text{ V}}{0,2 \text{ A}} = 100 \Omega,$$

sein Sekundärwiderstand 6 Ω . Wählen wir für die Primärspule $N_p = 500$ Windungen, muß nach der

$$\text{Formel } \frac{Z_p}{Z_s} = \frac{N_p^2}{N_s^2} \text{ die Sekundärspule } N_s = N_p \sqrt{\frac{Z_s}{Z_p}}$$

$$= 500 \sqrt{\frac{6 \Omega}{100 \Omega}} \approx 125 \text{ Windungen erhalten.}$$

Wir wickeln zuerst die Primärspule (500 Windungen/CuL 0,4), die wir dann mit Zeichenkarton isolieren und dieses mit Schellack streichen. Nach dem Trocknen ist die Sekundärspule an der Reihe, sie hat 125 Windungen (CuL 0,6). Alles wieder mit Zeichenkarton abdecken, mit Schellack streichen und die Anschlußdrähte kennzeichnen! Der Zusammenbau ist hier einfacher als beim Schalttafel-Transformator:

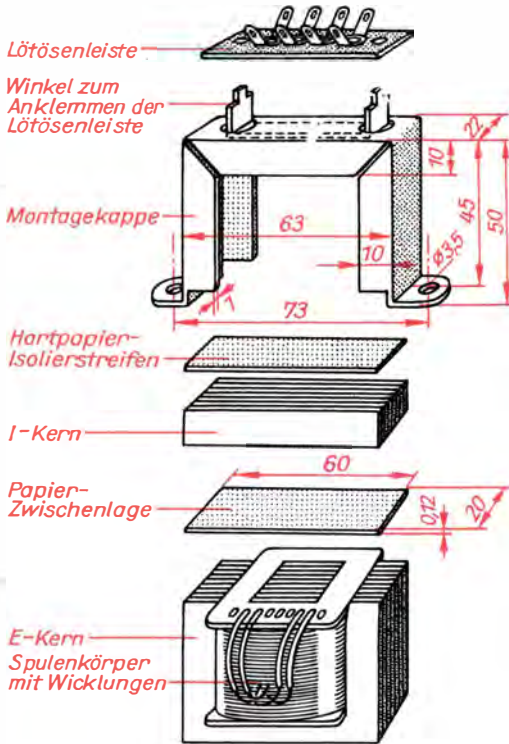


Bild 222. Montage des Übertragers II

Zuerst alle E-Bleche in die Spulenöffnung schieben, dann (nach Ausrichten) eine 0,1...0,15 mm dicke Zeichenkarton-Lage (60 mm × 20 mm) auf die »Pole« legen, nun die Bleche des I-Kernes in die zum Kern passende Montagekappe schieben (bis sie sich gegenseitig festklemmen), schließlich die Montagekappe mit I-Kern auf den E-Kern mit Spule stecken (Bild 222).

Die richtigen Arbeitspunkte stellen wir wie folgt ein:

1. Übertrager II mit Lautsprecher an Verstärker II anschließen, in die Leitung von B₂ zum Übertrager Strommesser (Minuspole an B₂) einschalten. Mit R₃ stellen wir einen Kollektorstrom von 0,2 A ein.
2. Für R₁ zunächst einen Einstellwiderstand 1 MΩ einbauen, Strommesser bei X einschalten und einen Strom von 1,8 mA einstellen.
3. Beide Einstellungen mehrmals wiederholen, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Danach löten

wir den 1-MΩ-Einstellwiderstand aus, ermitteln durch Strom- und Spannungsmessung seinen Widerstandswert und löten einen Festwiderstand gleicher Größe ein.

Tonanlagen jetzt mit dem Verstärker II

Der Übertrager I im Lautsprechergehäuse wird nun durch den Übertrager II ersetzt; die Schaltung bleibt unverändert. Wir schalten die Mikrofonanlage nach Bild 223a. Für die Leitung B zwischen Mikrofonbrett und Verstärker ist ein abgeschirmtes Kabel (Abschirmung an Buchse C) erforderlich, wenn das Mikrofon weiter als etwa 20 cm vom Verstärker entfernt ist. Für die Leitung B₁ vom Verstärker zum Übertrager verwenden wir ebenfalls ein abgeschirmtes Kabel: Innenleitung an B₁, Abschirmung an Masse (Buchse C).

Der Fernhörer als Mikrofon

Bevor das Mikrofon eingeführt war, benutzte man den Fernhörer abwechselnd zum Sprechen und zum Hören. Durch die Luft-Schallschwingungen beim Sprechen wird die Membran im Sprechrhythmus bewegt; sie verändert dadurch ihrerseits im gleichen Rhythmus das Magnetfeld, vor dem sie schwingt. Die Folge sind Induktionsspannungen und Induktionsströme in der Spule des Fernhörers. Diese Ströme werden zum Hörer des anderen Fernsprechteilnehmers geleitet. Das ist eine Wechselsprechanlage der einfachsten Form; der Hörer arbeitet abwechselnd als Mikrofon und als Fernhörer. Wollen wir diesen Versuch nachvollziehen, schalten wir nach Bild 223b an die Stelle des Kohlemikrofons unseren Fernhörer (Kopfhörer). Einen Übertrager (Transformator) brauchen wir dabei nicht, weil die Spule des Fernhörers einen genügend hohen Widerstand hat.

Der Lautsprecher als Tauchspul-Mikrofon

Der nächste Versuch ist ähnlich: Wir benutzen unseren selbstgebauten Lautsprecher als Mikrofon, als *Tauchspul-Mikrofon* (Bild 223c). In vielen Wechselsprechanlagen und bei Diktiergeräten spart

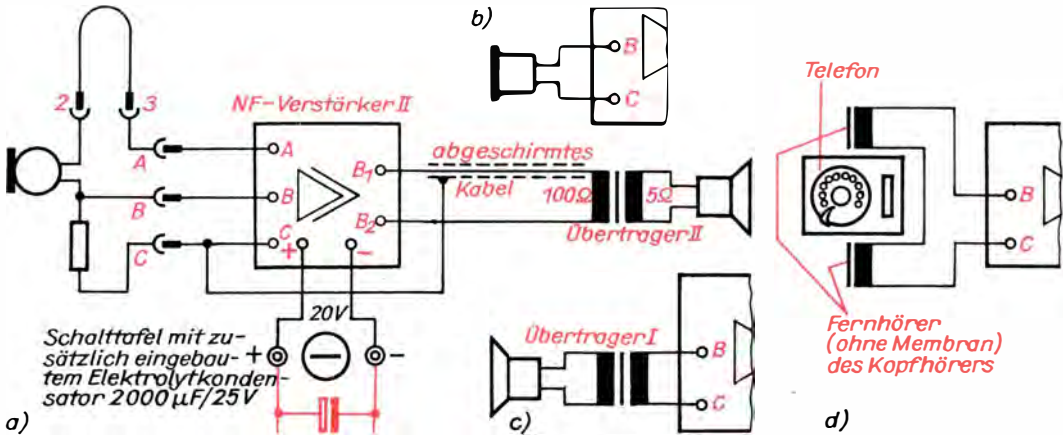


Bild 223. Mikrofonanlage mit NF-Verstärker II: a) vollständige Schaltung, b) Fernhörer als Mikrofon, c) Lautsprecher als Mikrofon, d) Telefon-Adapter

man so ein besonderes Mikrofon ein und hat den Vorteil, daß die Sprache durch die Tauchspule des als Mikrofon geschalteten Lautsprechers noch sauberer als mit dem Kohlemikrofon übertragen wird. Die Schwingspule des »Mikrofons« ist niederohmig; wir müssen daher den Übertrager I zwischen sie und den Verstärkereingang schalten. Die ehemalige Sekundärwicklung des Übertragers I (180 Windungen) wird jetzt als Primärwicklung an die Schwingspule gelegt, denn unser Übertrager ist jetzt Eingangsübertrager.

Bei diesen Versuchen (Fernhörer sowie Lautsprecher als Mikrofon) ist die Empfangslautstärke etwas geringer als beim Kohlemikrofon; dafür werden Sprache und Töne merklich sauberer, deutlicher wiedergegeben. Die Kohlekörnchen können den Schwingungen nicht so genau wie eine Membran folgen.

Wenn bei einigen Versuchen ein häßliches Pfeifen auftritt, kommt das von der *akustischen Rückkopplung*; das heißt: Die Schallwellen aus dem Lautsprecher treffen auf das Mikrofon und erregen dieses erneut (akustische Selbsterregung). Abhilfe ist dadurch möglich, daß wir Mikrofon und Lautsprecher in verschiedene Richtungen drehen oder beide in verschiedenen Zimmern aufbauen.

Ein Telefon-Adapter zum Mithören

Mit dem *Telefon-Adapter*, dem Fernsprech-»Anpasser« (lat. adaptare: anpassen) kann man beim gewöhnlichen Fernsprechen mithören – auch das, was der unsichtbare Teilnehmer sagt. Voraussetzung ist nur, daß der Fernsprechkasten nicht aus Eisen ist. Die Spulen im Inneren des Kastens sind nicht abgeschirmt; ihr Magnetfeld breitet sich (mit dem Quadrat der Entfernung an Stärke abnehmend) nach außen aus. Wir schrauben von unserem Kopfhörer die beiden (abschirmenden) Membranen ab und klemmen den Fernsprecher (unterhalb von Gabel und Wählscheibe) zwischen die beiden Fernhörer (Bild 223d). Der Kopfhöreranschluß kann dank seinem hohen Widerstand unmittelbar an den Eingang des NF-Verstärkers II gelegt werden.

Noch eine Wechselsprechanlage – ganz neuzeitlich

Nachdem wir in einem der letzten Versuche festgestellt haben, daß man den Lautsprecher auch als Tauchspulmikrofon verwenden kann, wollen wir ihn sowohl zum Sprechen als auch zum Hören in einer Wechselsprechanlage einsetzen; der Lautsprecher jeder Station wird – nach jeweiligem Umschalten – zum Mikrofon. Die bisherigen beiden Mikrofone entfallen. Die Anlage wird dadurch billiger – und

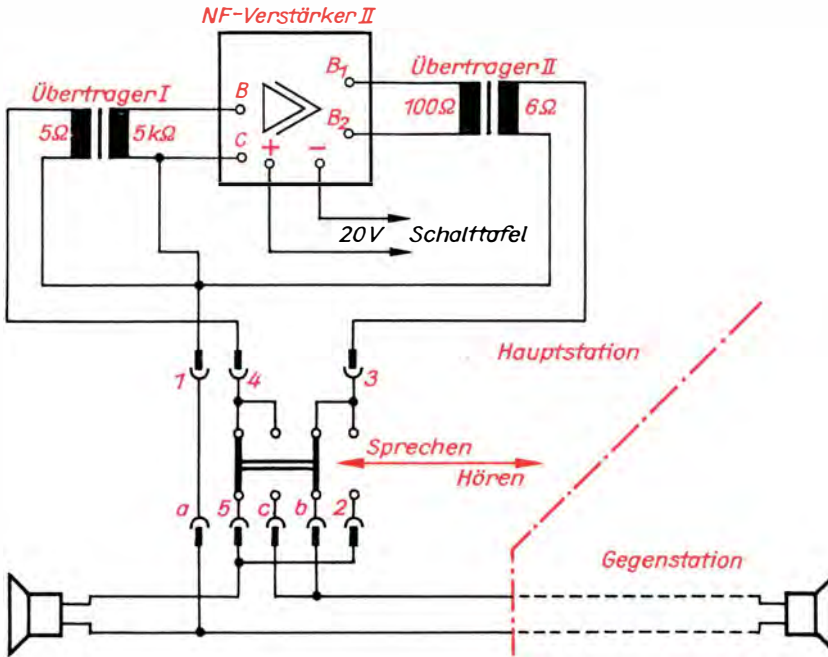


Bild 224. Wechselsprechanlage mit Lautsprecher als Mikrofon

die Übertragung der Sprache dabei, wie wir wissen, noch sauberer; industriell gefertigte Anlagen arbeiten nach diesem Prinzip. Die Verstärkungsleistung unseres Verstärkers reicht auch für den jetzt schwächeren Mikrofonstrom aus (Bild 224). Am Ausgang des Verstärkers II liegt der Übertrager II (aus Gehäuse ausbauen), am Eingang Übertrager I.

Nachrichtenträger ist die Funkwelle

Für den Empfang der Funkwellen brauchen wir auf jeden Fall eine Antenne und eine gute Erdleitung, beispielsweise den Anschluß an eine Wasserleitung (auch Warmwasser-Zentralheizung). Hier werden die elektromagnetischen Funkwellen aufgefangen, die der Sender abstrahlt.

Funkwellen sind elektromagnetische Wellen und bestehen aus zwei Teilen, der Trägerwelle (Bild 226a), die der Wellenlänge des Senders in ihrer Frequenz entspricht, und der Tonwelle (Bild 226b), die ihr im Sender durch den Mikrofonstrom »aufgepackt« (aufmoduliert) wird. Die Tonwelle entsteht auf einigen Umwegen aus der zu übertragenden Sprache oder Musik. Sie verändert nach ihrem Rhythmus die Trägerwelle, sie moduliert (verändert) deren Schwingungsweiten (Amplituden).

Bild 226c zeigt die Modulation der Trägerwelle durch die Tonwelle. Wir sehen eine Wechselspannung, deren Schwingungsweite im positiven (oberen) wie im negativen (unteren) Bereich unperiodisch wechselt – ein Zeichen, daß hier nicht

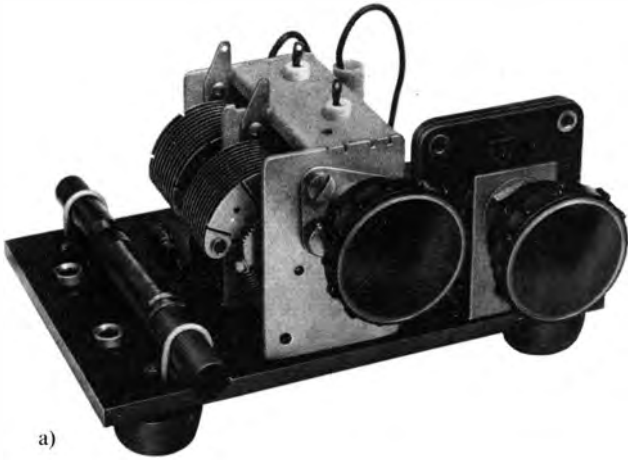
Wir bauen Radios

Es liegt nahe, die vielseitige Lautsprecheranlage auch für den Rundfunkempfang auszunutzen! Wir wollen das mit zwei »klassischen« Detektor- bzw. Dioden-Empfängern tun: einem ganz einfachen und einem mit Hochfrequenz(HF)-Verstärker und Rückkopplung. Bild 225 zeigt zwei Ansichten des letztgenannten Empfängers. Beide Geräte sind für den Mittelwellen-Bereich ausgelegt; mit der zweiten Baustufe ist Fernempfang möglich.

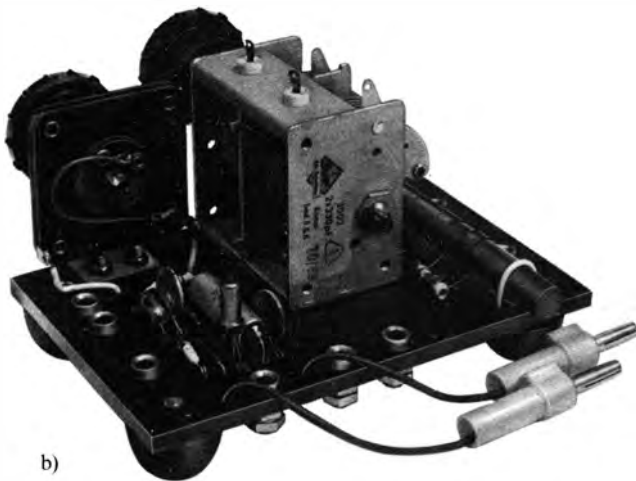
ein bestimmter Ton gesendet wird (denn der würde die Amplitude periodisch ändern). Denken wir uns die Spitzen der Schwingungen miteinander verbunden, so können wir die Tonfrequenz deutlicher erkennen. In Wirklichkeit gibt es eine solche Verbindungslinie nicht; die Tonwelle ist die fortlaufende Änderung der Amplitude der Trägerwelle! Zwischen 30 und 4500 Hz (Schwingungen je Sekunde) liegt die Frequenz der Tonwelle bei Mittelwellenempfang. Der Tonbereich, den das menschliche Ohr aufnehmen kann, ist größer; er reicht von 16 Hz bis 20000 Hz (in der Jugend, mit zunehmendem Alter wird's weniger). Die Frequenz der Trägerwelle ist wesentlich höher; im Mittelwellenbereich, der für uns in Betracht kommt, zwi-

schen 500000 und 1,6 Millionen Hz, oder anders ausgedrückt: 0,5...1,6 MHz.

Wenn solche Hochfrequenz-Funkwellen auf ihrem Wege auf Metall treffen, so erzeugen sie darin durch Induktion hochfrequente Spannungs- und Stromschwingungen. Um möglichst viel von der Hochfrequenzenergie für den Empfänger einzufangen, baut man Antennen- und Erdleitungen. Leider können wir mit der empfangenen Funkwelle noch nichts anfangen, denn ihre beiden Schwingungshälften heben einander auf. Aber wir kennen die Abhilfe schon vom *Gleichrichter* her: Wir bauen einfach eine Diode ein, die eine der beiden Schwingungshälften (Richtungen des Induktionsstromes in unserer Antenne) sperrt und nur die



a)



b)

Bild 225. Unser Rundfunkempfänger mit HF-Verstärker und Diodendemodulator: a) Bedienungsseite, b) Verstärkerseite

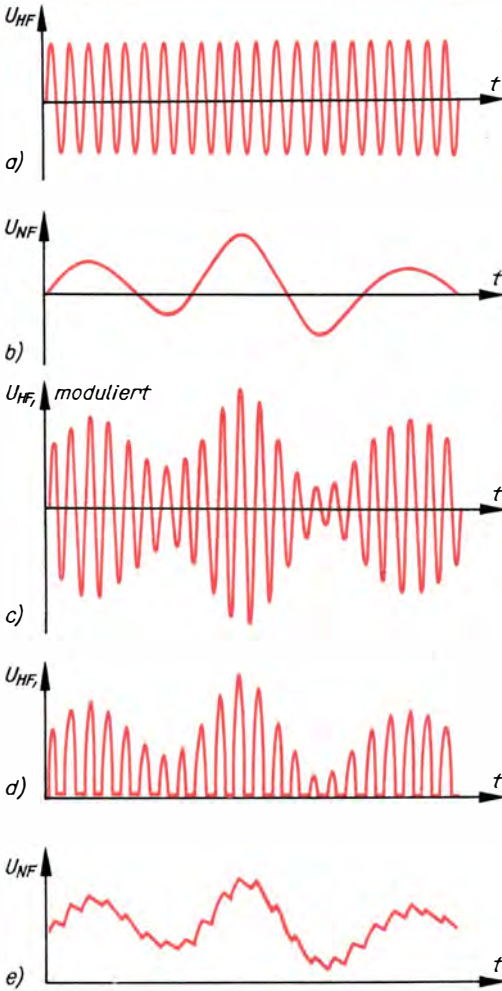


Bild 226. Modulation und Demodulation: a) Trägerwelle (HF), b) Tonwelle (NF), c) so wird die HF durch die NF moduliert, d) gleichgerichtete moduliert HF, e) mit Ladecondensator zur NF »geglättete«, moduliert HF

andere durchläßt (Bild 226d)! Sie heißt jetzt *Demodulator*. So erhalten wir – mit einem Kopfhörer – die Schaltung nach Bild 227a. Wir hören zwar – aber leider *alle* einfallenden Sender gleichzeitig.

Der Weg, nur *eine* gewünschte Frequenz oder Wellenlänge zu empfangen, führt über die Erscheinung des Mitschwingens, der *Resonanz*. Viele

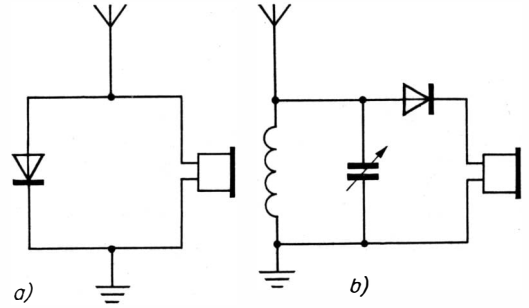


Bild 227. Empfangsschaltungen: a) ohne Abstimmung, b) einfacher Diodenempfänger

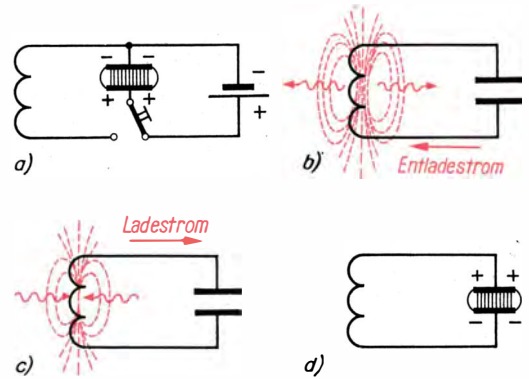


Bild 228. Wirkungsweise eines Schwingkreises

haben vielleicht schon erlebt, wie ein Auto im Rhythmus der Motorschwingungen mitschwingt – manchmal »resoniert« die Luft im geschlossenen Kraftwagen so stark, daß es unangenehm für die Insassen ist. Wir dagegen wollen das Mitschwingen gerade erreichen, und dazu verwenden wir den *Schwingkreis*, der aus einer Spule mit einer bestimmten Induktivität und einem Kondensator mit einer bestimmten Kapazität besteht. Wir erhalten den Empfänger nach Bild 227b.

Solch ein Schwingkreis ist die Grundlage der ganzen Rundfunktechnik! Er arbeitet verblüffend einfach:

1. Bei offenem Schwingkreis laden wir den Kondensator auf (Bild 228a); dieser trägt jetzt die ruhende elektrische Energie. Wir schließen den Schwingkreis; der Kondensator entlädt sich über die Spule.

2. Der Entladestrom des Kondensators baut in der Spule ein Magnetfeld auf (Bild 228b); die Energie des Schwingkreises befindet sich nunmehr als magnetische Energie in der Spule. Der Kondensator ist entladen; es fließt kein Strom mehr.
3. Da kein Strom mehr fließt, bricht das Magnetfeld zusammen; dabei induziert es in den Windungen der eigenen Spule (Selbstinduktion) einen neuen Strom, der die gleiche Richtung wie der erste hat (Bild 228c).
4. Dieser neue Strom (*Selbstinduktionsstrom*) lädt den Kondensator auf (Bild 228d); die Schwingungsenergie liegt wieder im Kondensator, und das Spiel dieses Hin- und Herströmens, dieses Schwingens, geht immer so weiter, bis die Energie durch unvermeidbare Verluste (Erwärmung durch den Drahtwiderstand, magnetische Verluste) abklingt. Das ist eine *gedämpfte Schwingung*. Unsere Antenne liefert aber (solange der Sender sendet) ständig neue Energie, die die Verluste ersetzt. Wir erhalten dadurch eine *ungedämpfte Schwingung*. Jeder Kombination der Induktivität L und der Kapazität C entspricht eine bestimmte *Frequenz* der Schwingung nach der Gleichung

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

Die Wellenlänge der Schwingung in Meter erhalten wir, wenn wir die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen (300000 km/s) durch die Frequenz (in Hertz) teilen. Nur die so durch L und C eingestellte Frequenz (die *Eigenfrequenz*) nimmt unser Schwingkreis auf. Da wir aber nicht immer nur *einen* Sender, sondern nach Belieben auch andere – mit anderen Wellenlängen – hören wollen, bauen wir eine *veränderliche Kapazität* in Form eines *Drehkondensators* ein. Selbstverständlich kann man auch die Induktivität veränderlich machen, z. B. durch eine Spule, deren Induktivität durch Verschieben eines Kernes in der Spule vergrößert oder verkleinert werden kann.

Mit dem einfachen Diodenempfänger sammeln wir erste Erfahrungen

Den Grundaufbau kennen wir bereits aus Bild 225, Bild 229 zeigt den Schaltplan. Die Werte der Bauelemente betragen: $C_1 = 47 \text{ pF}$; $C_2 = 330 \text{ pF}$ bzw. 500 pF ; $C_3 = 4,7 \text{ nF}$; D nach Tabelle 2.

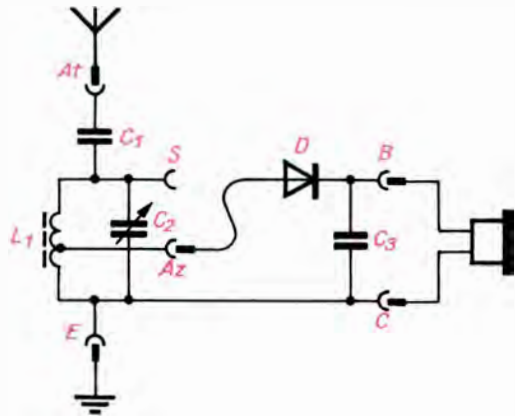


Bild 229. Schaltbild des Diodenempfängers

Über den konstruktiven Aufbau und die Verdrahtung (entsprechend dem Verstärker II) gibt Bild 230 Auskunft. Der Drehkondensator (auf jeden Fall ein Luftdrehkondensator) sollte möglichst einen Feintrieb haben. Bei einem Doppel-drehkondensator – falls ein einfacher nicht greifbar ist – wird das zweite Plattenpaket nicht angeschlossen.

Der Antennenkondensator C_1 sorgt für eine lose Ankopplung der Antenne an den Schwingkreis; das ist für eine gute *Trennschärfe* wichtig. Mit dem Kopfhörerkondensator C_3 werden, wie mit dem Ladekondensator des Gleichrichtergerätes, die demodulierten HF-Schwingungen »geglättet« (vgl. Bild 226e). Die Schwingkreisspule wickeln wir nach Bild 231 auf einen *Ferritstab*, 100 mm lang, 8 mm Durchmesser; vorher wird der Stab zur Isolierung mit Zellglas-Selbstklebeband umwickelt. Bei 500 pF Kapazität von C_2 müssen es 50 Windungen sein (Windung an Windung!), bei 330 pF 75 Windungen CuL 0,4. Sechs Windungen vor dem Ende bringen wir (wie bei dem Schalttafel-Transformator) eine Anzapfung an. Neben diese Schwingkreiswicklung L_1 wickeln wir noch acht weitere Windungen, die für die spätere Rückkopplung bestimmt sind. Das Festlegen der Anfänge und Enden der Spulen zeigt Bild 231b. Als Werkstoff für die Schlaufen eignet sich Plastfolie (beispielsweise aus Streifen eines Zellophanbeutels). Der Ferritstab wird mit zwei Schlaufen aus Isolierschlauch (von Schalt-draht, aber hier ohne Draht!) auf dem Grundbrett

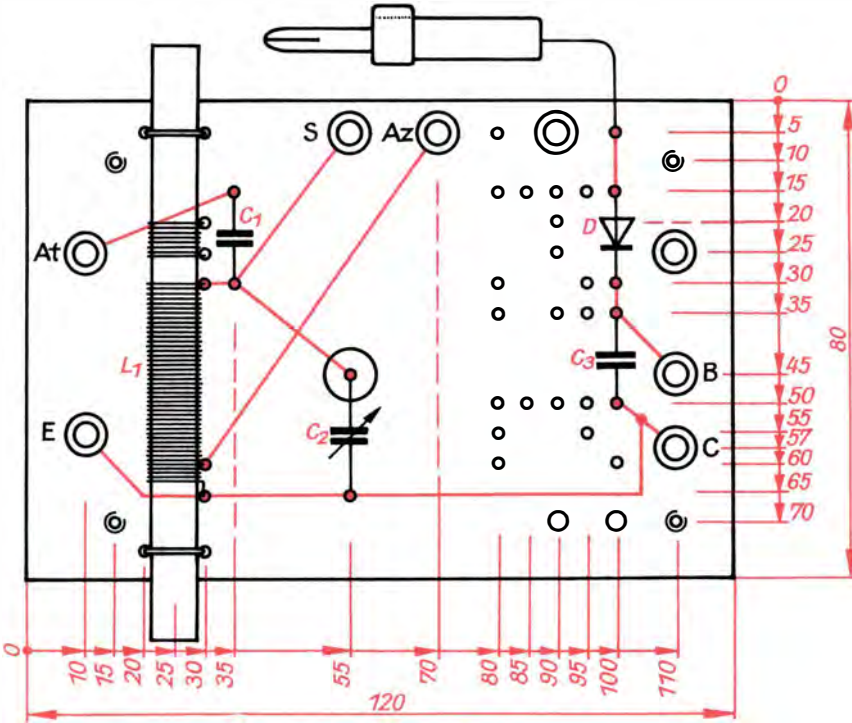


Bild 230. Aufbau des Diodenempfängers

angebunden; zwischen Stab und Brett bringen wir kleine Zwischenlagen (Unterlagen), damit der Ferritstab nicht durch die dickere Mitte mit den Wicklungen zerbricht. Der Drehkondensator wird unmittelbar auf das Grundbrett geschraubt; je nach Typ sind die Bohrungen anzubringen. Die 1-mm-Löcher im Bild 230 bohren wir alle gleich mit; dort findet später der *HF-Verstärker* seinen Platz.

An die *Diode* schließen wir über eine biegsame Leitung (Litze) einen Bananenstecker an; die Diode kann dadurch unmittelbar an den Schwingkreis (S) oder an die Anzapfung (Az) angeschlossen werden. Während bei unmittelbarem Anschluß der Orts- oder Bezirkssender nahezu im ganzen Abstimmbereich einfällt (»durchschlägt«), empfangen wir ihn über den Anzapfungsanschluß nur an einer begrenzten Drehwinkelstellung. Warum? Die Diode

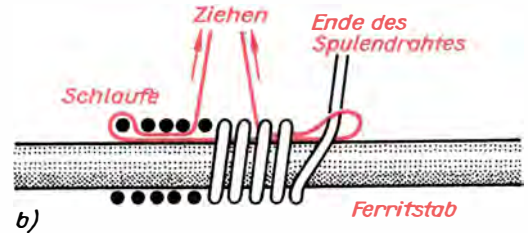
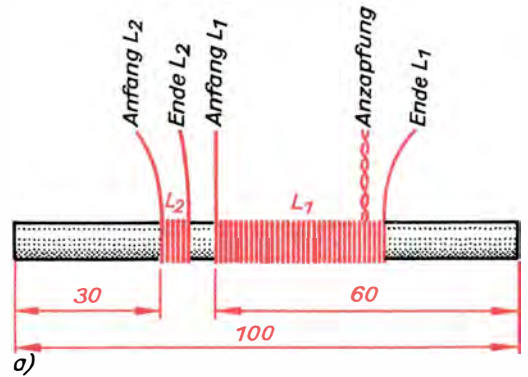


Bild 231. Zum Bau der Schwingkreisspule: a) Wickelschema, b) Festlegen der Drahtenden

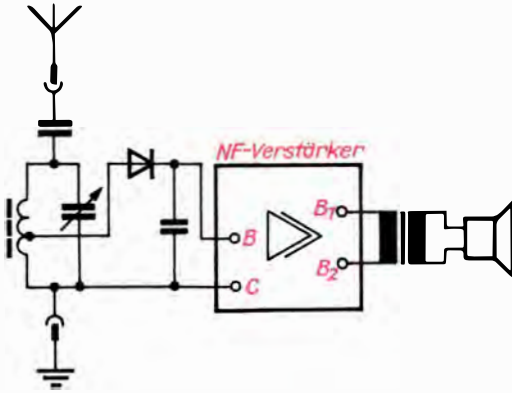


Bild 232. Diodenempfänger mit NF-Verstärker

dämpft den Kreis. Bei Anzapfungsanschluß wirkt die Spule als *Spartransformator*. Nach $\frac{Z_p}{Z_s} = \frac{N_p^2}{N_s^2}$ wird der Diodenwiderstand Z_s (an der Sekundärseite auf einen am Schwingkreis wirksamen (primären) Widerstand Z_p »hinauftransformiert«:

$$Z_p = \frac{N_p^2}{N_s^2} Z_s = \frac{75^2}{6^2} Z_s = 156 Z_s.$$

Weil der Diodenwiderstand als *Lastwiderstand* des Schwingkreises 156mal größer (als bei direktem Anschluß an S) geworden ist, wird die Dämpfung des Kreises 156mal geringer als vorher. Dadurch entsteht ein ausgeprägtes *Resonanzmaximum* – aber eben nur für die *Resonanzfrequenz*. Sobald die Fre-

quenz des Schwingkreises nicht mehr mit der des Senders übereinstimmt, ist die Schwingkreisspannung sehr niedrig. Der Ortssender »durchschlägt« nicht mehr den ganzen Bereich. Empfehlenswert ist es, für eine gute Antenne *und* eine gute Erdung zu sorgen; dann empfangen wir außer dem Orts- oder Bezirkssender auch andere Sender. Eine von beiden ist auf jeden Fall unerlässlich. So ist der Empfang mit Kopfhörer möglich.

Für einen wenn auch bescheidenen Lautsprecherempfang (Bild 232) stecken wir den NF-Verstärker I auf die Empfängerplatte und schließen am Verstärkerausgang über den Übertrager I den Lautsprecher an. Stärkeren Lautsprecherempfang gestattet unser NF-Verstärker II; wir betreiben diesen mit unserer Schalttafel und schließen ihn über kurze Kabel an den Diodenempfänger an. Durch Anschluß des jeweiligen NF-Verstärkers an die Mikrofonplatte können wir übrigens zwischendurch ein eigenes Programm durchgeben – am elegantesten mit einem Umschalter!

Ein Hochfrequenz-Verstärker steigert die Leistungsfähigkeit unseres Diodenempfängers beträchtlich

Wir können mit unseren bisher gebauten Geräten nachts zwar auch schon vereinzelt Fernsender ganz schwach empfangen; der Wunsch, sie lautstark zu hören, ist nur natürlich. Die Lösung lautet: nach-

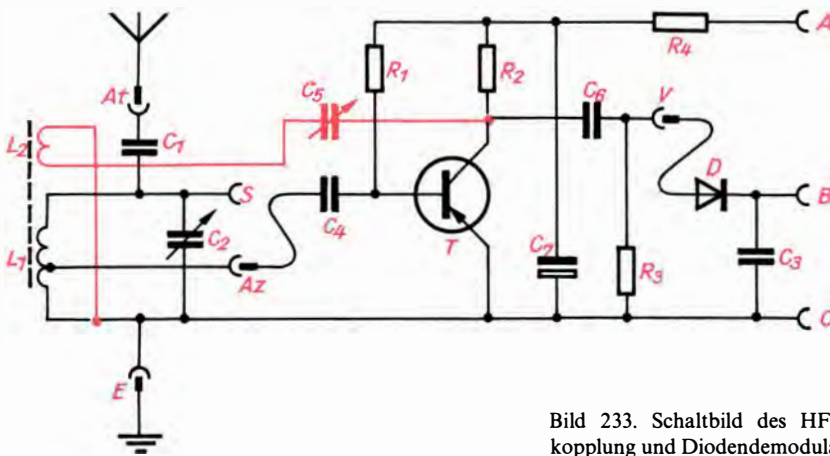


Bild 233. Schaltbild des HF-Verstärkers mit Rückkopplung und Diodendemodulator

Bild 234. Aufbau des HF-Verstärkers auf dem Grundbrett des Diodenempfängers

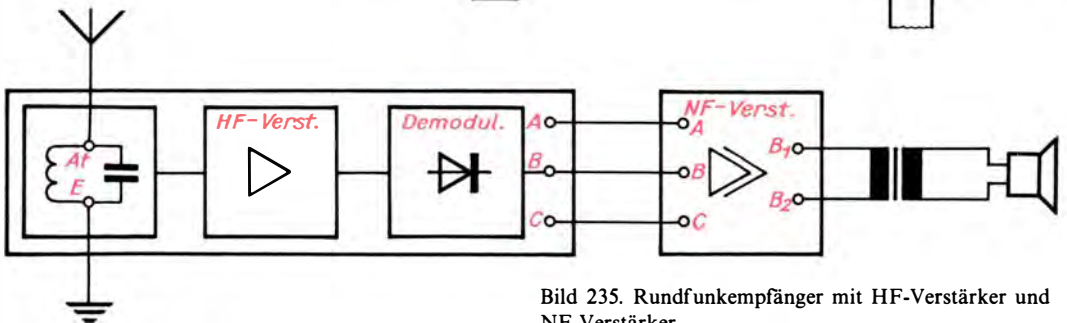
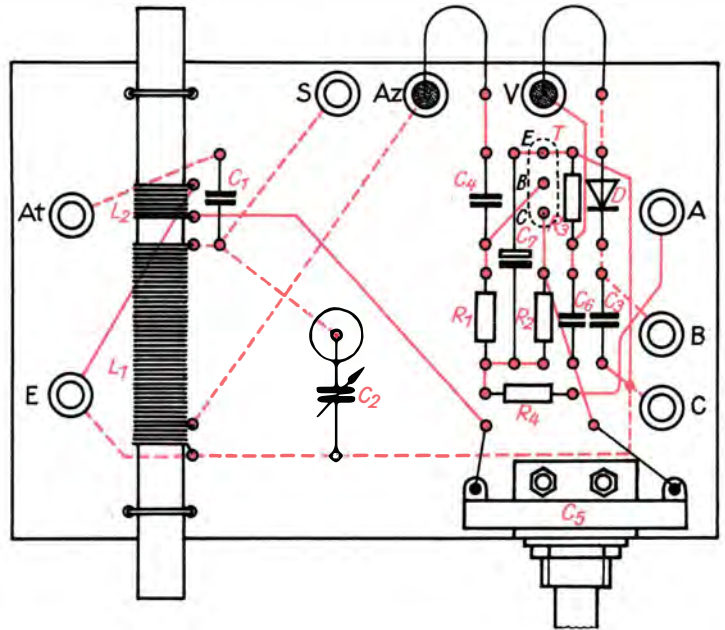


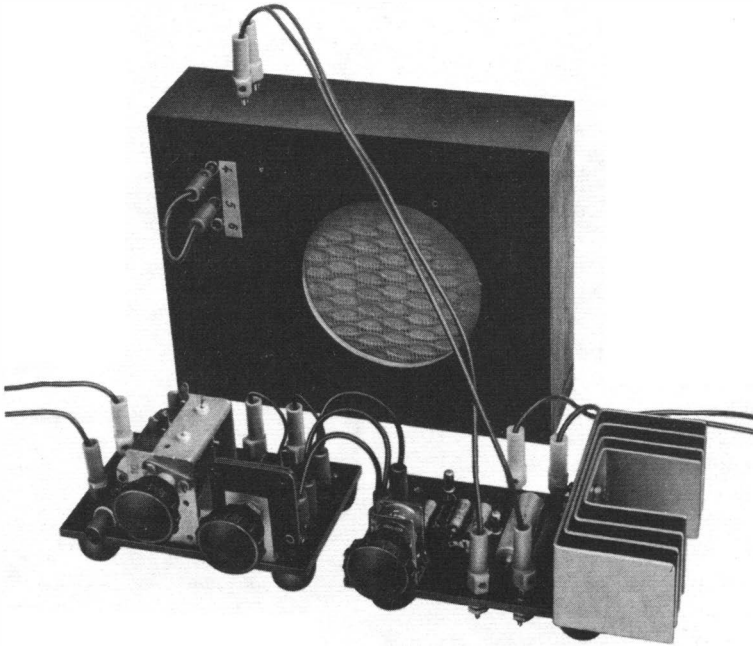
Bild 235. Rundfunkempfänger mit HF-Verstärker und NF-Verstärker

träglicher Einbau eines HF-Verstärkers in den Diodenempfänger (Bild 233). Die Werte der zusätzlichen Bauelemente des HF-Verstärkers sind: $R_1 = 100 \text{ k}\Omega \dots 1 \text{ M}\Omega$; $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 15 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$; $C_4 = 10 \text{ nF}$; $C_5 = 100 \dots 200 \text{ pF}$; $C_6 = 100 \text{ pF}$; $C_7 = 50 \mu\text{F}/10 \text{ V}$; T nach Tabelle 2.

Die Emitterstufe ist uns von den NF-Verstärkern bekannt. An die Basis gelangt jetzt freilich keine Niederfrequenz, sondern Hochfrequenz. Der Verstärkungsvorgang ist jedoch der gleiche. Die Diode des Diodenempfängers wird auch hier verwendet. Den Eingang des HF-Verstärkers schließen wir über den Bananenstecker an die Anzapfung (nicht anderswo!). Die Spannung zum Betrieb des HF-Verstärkers entnehmen wir dem NF-Verstärker

über Buchse A. Das in dieser Leitung liegende Siebglied R_4/C_7 dient der Entkopplung des HF-Verstärkers vom angeschlossenen NF-Verstärker. Der Basiswiderstand R_1 ist wie bei einer NF-Stufe vom Transistor abhängig. Wir ermitteln die richtige Größe, indem wir an A und C eine 4,5-V-Batterie anschließen (Minuspol an A), für R_1 einen 1-M Ω -Einstellwiderstand einbauen, in die Kollektorleitung (in Reihe mit R_2) einen Strommesser schalten und einen Kollektorstrom von 0,5 mA einstellen. Dann wird der Einstellwiderstand ausgebaut, ausgemessen und dafür ein Festwiderstand eingelötet. Bild 234 zeigt, wie der HF-Verstärker auf dem Grundbrett des Diodenempfängers aufgebaut wird (vgl. auch Bild 225).

Bild 236. Ansicht unseres vollständigen Rundfunkempfängers



Sehr wesentlich für gute Empfangseigenschaften ist eine einstellbare *Rückkopplung*. Für C_5 reicht ein Hartpapier-Drehkondensator von 100...200 pF Endkapazität. Zum Befestigen dient ein Winkel wie beim Potentiometer zum Verstärker II. Soll jetzt noch der Verstärker I aufsteckbar sein, muß $a = 25$ mm werden (N_6 , siehe Bild 8). Durch die Rückkopplung über C_5 und Spule L_2 gelangt ein Teil der verstärkten Hochfrequenz vom Kollektor des Transistors an den Schwingkreis zurück und entdämpft diesen; erst dadurch wird eine gute Trennschärfe der einzelnen Sender möglich. Erde ist nicht unbedingt nötig; als Antenne reicht ein Draht von 2...3 m Länge aus. Auch allein mit *Ferritantenne* ist Empfang möglich. Diese wird dann in die beste Empfangsrichtung gedreht. Solche Antennen finden wir auch in Koffer- und Taschenempfängern.

Wie der Empfänger an den NF-Verstärker (I oder – mit Schalttafelanschluß – II) anzuschließen ist, geht aus Bild 235 hervor. Bild 236 zeigt eine Ansicht unseres vollständigen Empfängers mit dem NF-Verstärker II. Beim Einstellen der Rückkopplung beachten wir, daß kein störendes Pfeifen auftritt! Pfeifen bedeutet hier Schwingen. Die rückgeführte Energie ist dann so groß, daß der Verstärker

zum Schwingungserzeuger (Oszillator) wird und die Schwingungen über die Antenne abgestrahlt werden. Unser Empfänger wird somit zum höchst unerwünschten (und unzulässigen) »Pfeisender«. Der Entstörungsdienst der Deutschen Post kann uns mit seinen Richtantennen sehr schnell ausfindig machen und zur Verantwortung ziehen. Also Vorsicht beim Einstellen der Rückkopplung – und im übrigen guten Empfang!

Licht als Informationsträger

Die Lichtempfindlichkeit des pn-Überganges hat ihren Grund: Bei Raumtemperatur befinden sich in 1 cm^3 Germanium etwa 10^{13} Ladungsträger. Diese Ladungsträgerdichte wird durch Zufuhr von Wärme erhöht. Das haben wir untersucht und bei der Kennlinie der Germaniumdiode experimentell nachgewiesen: Sie hat eine Erhöhung des Sperrstromes zur Folge. Wesentlich ist dabei aber nicht die Wärme, sondern die ihr äquivalente *Energie!*

Auch Licht ist eine Form der Energie, und wir erzielen daher mit Lichtzufuhr am pn-Übergang das gleiche Ergebnis wie bei Wärmeeinwirkung. In der *Fotodiode* mit ihrem besonders gestalteten pn-Übergang wird dieser *lichtelektrische Effekt* maximal genutzt. Wir führen dazu einen Versuch durch.

Eine Fotodiode, nach Tabelle 2, schalten wir in Reihe mit einem Strommesser (1 mA) und einer Flachbatterie (Bild 237). *Achtung: Die Diode muß auf jeden Fall in Sperrrichtung geschaltet werden!* Die *Anode* ist durch einen Farbpunkt gekennzeichnet! Ein kaum merklicher Strom fließt: der Sperrstrom oder *Dunkelstrom* (weil kein Licht in die Fotodiode gelangt); seine Größenordnung liegt bei $10\mu\text{A}$. Nun legen wir eine Glühlampe $3,8\text{ V}/0,07\text{ A}$ über einen Schalter an die Batterie. Der Abstand Diode-Glühlampe soll etwa 1 m betragen. Nach Aufleuchten der Glühlampe fließt ein Strom von rund $0,3\text{ mA}$, der *Hellstrom*, der in der Größe vom Abstand bzw. von der Lichtstärke abhängig ist. Die Fotodiode erinnert uns an das Mikrofon; dieses ist ein schallabhängiger Widerstand, jene ein lichtabhängiger Widerstand. Der von der Lichtstärke abhängige Strom wird zu vielen Zwecken ausgenutzt: zum Zählen von Personen oder Gegenständen, die durch den Lichtstrahl geleitet werden, zum Anlassen von Rolltreppen durch den Benutzer oder zum Überwachen von Räumen – hier wird ein unsichtbarer (ultravioletter) Lichtstrahl benutzt, auf den die Fotodiode ebenfalls reagiert. Lichtquelle und Diode werden im Raum listig versteckt. Der Handel bietet außerdem Fotoelemente, Fotowiderstände und Fototransistoren an, bei denen der Stromstoß ausgenutzt wird, der beim Belichten entsteht.

Ein Lichtempfänger wird gebaut

Bild 238 zeigt die Schaltung eines Lichtempfängers. Die Werte der Bauelemente sind: $R_1 = 8\text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \dots 500\text{ k}\Omega$; $R_3 = 4,7\text{ k}\Omega$; $R_4 = 8\text{ k}\Omega$; $C_1 = 5\mu\text{F}/10\text{ V}$; $C_2 = 100\mu\text{F}/10\text{ V}$; $C_3 = 5\mu\text{F}/10\text{ V}$; FD und T nach Tabelle 2.

FD bildet mit R_1 eine Reihenschaltung (ähnlich wie beim Mikrofon); von hier geht es zur Basis des Vorverstärkers in Emitterschaltung. Über C_3 wird das vorverstärkte Signal abgegriffen. R_4/C_2 ist das Siebglied für die Betriebsspannung. Aufgebaut wird die Schaltung nach Bild 239. Wir nieten in a, b und c Lötösen ein und löten daran Bananenstecker A,

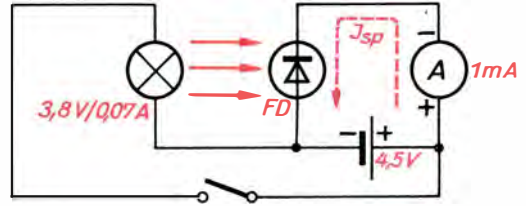


Bild 237. Die Fotodiode verwandelt Licht in elektrischen Strom

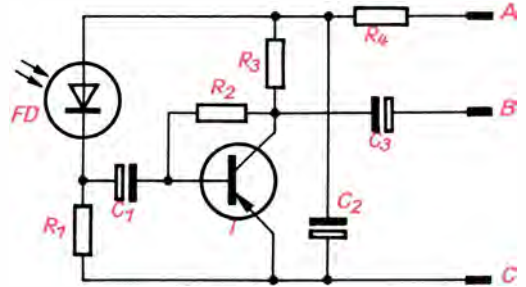


Bild 238. Schaltbild des Lichtempfängers

B und C. Dadurch läßt sich der Lichtempfänger unmittelbar auf den Verstärker II stecken. Ehe wir die Fotodiode einbauen, muß der richtige Arbeitspunkt der Verstärkerstufe eingestellt werden. Für R_2 verwenden wir deshalb wieder einen Einstellwiderstand von $500\text{ k}\Omega$. An C schließen wir den Pluspol einer $4,5\text{-V}$ -Batterie, an A den Pluspol eines Strommessers an; die Minuspole von Batterie und Strommesser werden miteinander verbunden. Wir verkleinern den Einstellwiderstand so weit, bis der Strommesser $0,3\text{ mA}$ anzeigt; dann wie üblich auslöten, ausmessen und Festwiderstand einbauen. Die Fotodiode schieben wir von der Verdrahtungsseite her durch die Bohrung d (etwa $4,4\text{ mm}$ Durchmesser zum Einpassen).

Wieder Achtung beim Anlöten: Hier ist die Anode durch Farbpunkt gekennzeichnet. Bild 240 zeigt den fertigen Lichtempfänger.

Wir telefonieren über einen Lichtstrahl

Dieser Versuch ist besonders eindrucksvoll – und dabei ohne besondere Schwierigkeiten durchzuführen. Der »Lichtfernsprecher« wird im Prinzip nach

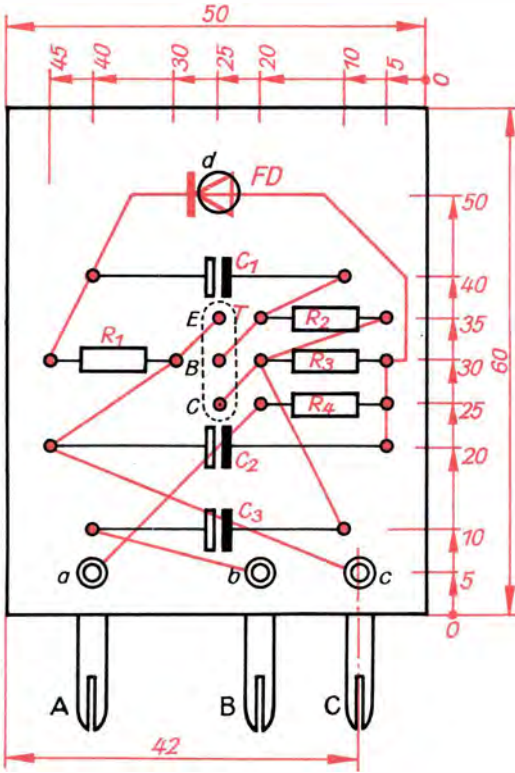


Bild 239. Aufbau des Lichtempfängers

Bild 241 aufgebaut. Zunächst ändern wir den Aufbau etwas ab, um einen Mikrofonbesprecher einzusparen. Statt des Mikrofonbrettes verwenden wir unseren Empfänger (Diodenempfänger mit oder ohne HF-Verstärker) mit dem NF-Verstärker I und dem Übertrager I. Die Lautstärke stellen wir nur

Bild 241. Schaltung zum Telefonieren über einen Lichtstrahl

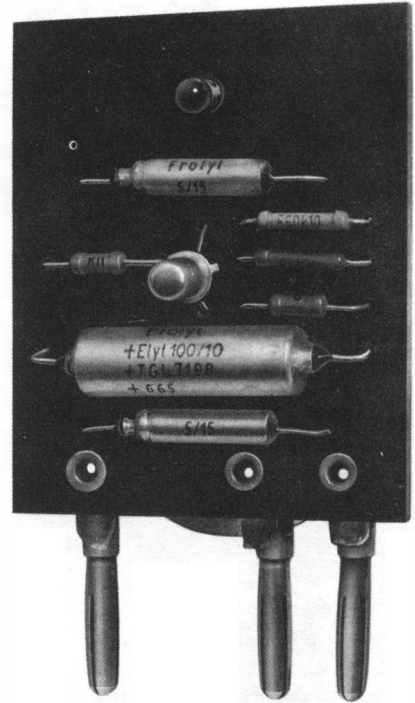
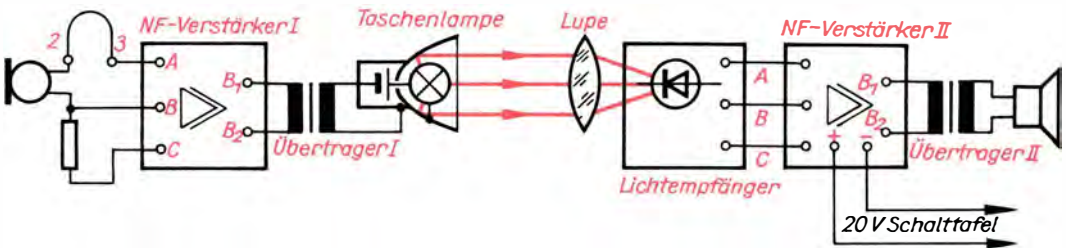


Bild 240. Ansicht unseres Lichtempfängers

so weit ein, daß eine gute Tonqualität vorhanden ist. Dann schrauben wir von einer gewöhnlichen Stabtaschenlampe mit zwei oder drei Monozellen die untere Verschlusskappe ab, nehmen die letzte Batterie heraus und löten einen biegsamen (isolierten) Draht an ihren Boden. Nun bohren wir ein kleines Loch in die Verschlusskappe (zum Durchführen des Drahtes), isolieren Batterieboden und Lötstelle mit Heftpflaster, stecken biegsamen Draht durch die Kapfenbohrung und schrauben die Kappe wieder an. Beim Einschalten der Lampe

Bild 242. Unsere Lichttelefon-Anlage



leuchtet diese erst, wenn wir den herausgeführten isolierten Draht mit dem abisolierten Ende an eine blanke Gehäusestelle legen.

Danach entfernen wir von der Sekundärseite des Übertragers I den Lautsprecher und schalten an seine Stelle unsere vorbereitete Stablampe – das ist unsere »Sendeantenne«. Am besten befestigen wir die Lampe wackelsicher an einem Stativ, oder wir konstruieren einen Ständer, wie er im Bild 242 zu sehen ist. Die Lampe wird so ausgerichtet, daß ihr gebündelter scharfer Strahl (Glühlampe in den Brennpunkt des kleinen Hohlspiegels bringen) eine freie Strecke von 2...3 m durchlaufen kann. Wir richten ihn dorthin, wo unser Lichtempfänger mit Verstärker II und Übertrager II (Schalttafelanschluß 20 V) stehen soll. An einem dort angeordneten senkrechten Stück Pappe stellen wir zunächst den Lichtstrahl durch Verdrehen des Lampenkopfteilens (mit Hohlspiegel als Reflektor) scharf gebündelt ein.

Nun zum Empfänger: Wir stecken den Lichtempfänger auf den Verstärker II, schalten aber noch nicht ein. Der Lichtstrahl, obwohl gebündelt, ist noch nicht scharf und klein genug für die Glaslinse der Fotodiode; er muß noch einmal »gesammelt« werden. Das geschieht mit einer Sammellinse

(Lupe), also einem Vergrößerungsglas mit möglichst großem Durchmesser (mehr als 5 cm). Genau in den Brennpunkt dieser Linse kommt die Diode. Wir schalten die Anlage ein und – hören »Lichtradio«!

Zum Schluß einige Hinweise zum guten Arbeiten:

Lautsprecher in einiger Entfernung vom Lichtempfänger aufstellen; nach Möglichkeit auf getrenntem Tisch, oder wenigstens weichen Radiergummi unterlegen. Andernfalls kommt es leicht zur akustischen Rückkopplung und damit zum Pfeifen.

Der Verstärker I – wir hatten das schon erwähnt – darf nicht zu weit »aufgedreht« sein; Übersteuerungen sind sonst unvermeidlich. Am Glühlämpchen der Stablampe dürfen keine Helligkeitsunterschiede zu sehen sein. Andernfalls liegt *Übermodulation* vor – und damit schlechte Tonwiedergabe. Der Verstärker I muß dann etwas »zugehrt« werden.

Die Wiedergabequalität unserer Lichttonanlage ist bei richtiger Einstellung nahezu wie bei unmittelbarem Rundfunkempfang, nur die Höhen sind etwas abgeschwächt.

Nach den Einstellversuchen, bei denen wir auch überprüfen, wie weit die Versuchsstrecke vergrößert werden kann, ersetzen wir den Rundfunkempfänger durch das Mikrofon und sprechen selbst über den Lichtstrahl – mit dem »Lichtfernsprecher«.

6. Kapitel

Informationen werden verarbeitet

Steuern und Regeln

Ein Kennzeichen der industriellen Produktion und zugleich Ausdruck des wissenschaftlich-technischen Fortschritts ist die *Automatisierung*. Arbeitsprozesse werden nicht mehr vom Menschen *gesteuert* und *geregelt*, sondern von mechanischen, elektrischen oder optischen Einrichtungen. Diese messen die Betriebswerte und steuern die Maschinen. Der Mensch wird von körperlich schwerer und geistig eintöniger Tätigkeit befreit.

Die Steuerkette

Ein Beispiel einer *Steuerung* ist die Radioschaltuhr. Sie schaltet den Rundfunkempfänger zur vorgeschriebenen (»programmierten«) Zeit ein und aus. Die Stromstärke ist hierbei gering, der Kontakt an der Uhr als *Stellglied* schaltet den Empfänger. Beim Ein- und Ausschalten größerer Stromstärken (etwa im Stromkreis einer Straßenbeleuchtung, eines elek-

trischen Ofens oder eines elektrolytischen Bades) kommt noch ein *Relais* (Schaltschütz) hinzu. Der gesteuerte Teil (der Empfänger, die Straßenbeleuchtung und so weiter) ist die *Steuerstrecke*. Die Hauptbestandteile einer solchen Steuerkette lassen sich schematisch nach Bild 243 darstellen.

In Abhängigkeit von der Art der Eingabegröße und des *Eingabegliedes* können drei hauptsächliche Arten der Steuerung unterschieden werden. Im erwähnten Beispiel der Radiosteuerung handelt es sich um eine typische *Zeitplansteuerung*. Eine andere Art der Programmsteuerung ist die *Ablaufsteuerung*. Bei ihr wird der Arbeitsprozeß, beispielsweise die Bewegung eines Personenaufzuges, in einzelne Takte zerlegt. Beginn und Ende jedes Taktes werden durch Bedingungen im *Bedingungsspeicher* festgelegt, die sich aus dem Ablauf des Prozesses ergeben (Drücken der Knöpfe an der Steuertafel der Kabine). Eingabeglied ist hier der Bedingungsspeicher. Eine dritte Art ist die *Führungssteuerung*. Wenn ein Programm nicht fest vorgeschrieben werden kann, sondern die ganze Steuerung von Vor-



Bild 243. Steuerkette

aussetzungen (*Führungsgrößen*) abhängig ist, die sich – auch unvorhergesehen – ändern, so tritt an die Stelle des Programmspeichers ein *Meßglied* als »Führungseinrichtung«. Diese beeinflusst wiederum das Stellglied. Ein Beispiel dafür ist die selbsttätige Zentralheizung (mit Gas oder Öl betrieben). Ein Außenthermometer als Führungseinrichtung nimmt das Signal der Führungsgröße, den Wärmestand (Temperatur) »Zu wenig!« oder »Zu viel!« mit einem Kontakt des Meßstromkreises auf. Möglicherweise ist das Thermometer ein Thermoelement, das einen entsprechenden Thermostrom liefert. Ist ein Verstärker (als Teil des Steuergerätes) nötig, so ist das Ausgangssignal der Führungseinrichtung zugleich das Eingangssignal für den Verstärker. Dessen Ausgangssignal ist wiederum Eingangssignal für das Stellglied, das die Steuerstrecke steuert (in unserem Beispiel den Stellmotor für das Zufußventil) oder die Ölzufuhr schaltet.

Bei unserem Beispiel der Straßenbeleuchtung schaltet man heute im allgemeinen nicht mehr nach der Zeit, sondern nach der Stärke des Tageslichtes (Helligkeit). Unterschreitet die Lichtstärke als Führungsgröße einen Mindestwert, so spricht ein solcher *Dämmerungsschalter* als Führungseinrichtung darauf an und gibt – über einen Verstärker – ein Signal an das Stellglied, das Relais. Dieses schaltet die Steuerstrecke, nämlich die Straßenbeleuchtung, ein. Beim Morgenrauen folgt sinngemäß das Signal zum Ausschalten.

Der Regelkreis

Während bei der Steuerung die Eingabegröße unabhängig vom Zustand der Steuerstrecke ist, wird sie bei der *Regelung* der Steuerstrecke – jetzt Regelstrecke – selbst entnommen. Aus der Steuerkette entsteht ein *Regelkreis*.

Im Bild 244 ist die Entwicklung von der Handregelung zur selbsttätigen oder automatischen Regelung dargestellt. Bild 244a zeigt das Schema der *Handregelung*. Danach kann nahezu jeder Arbeitsprozeß als Regelvorgang aufgefaßt werden. Durch Prüfen wird festgestellt, ob bestimmte Eigenschaften des Arbeitsgegenstandes den Erwartungen entsprechen. Ist dies nicht der Fall, muß er weiter bearbeitet werden. Nicht alle Eigenschaften des Gegenstandes oder Vorganges sind den menschlichen Sinnesorganen zugänglich, für das Feststellen von Temperaturen, Strömen oder Spannungen sind

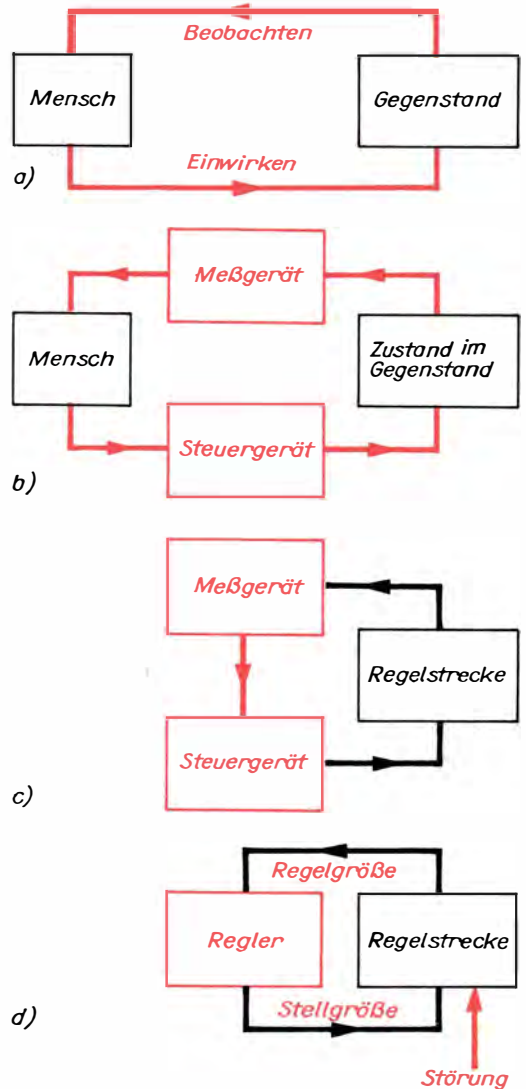


Bild 244. Von der Handregelung zur automatischen Regelung: a) Prinzip der Handregelung, b) für die Handregelung notwendige Zusatzgeräte, c) direkte Kopplung der Regelungsgeräte (automatische Regelung), d) Regelkreis

Meßgeräte notwendig. Analoges gilt für den Einwirkungsprozeß auf den Gegenstand; hier sind *Steuergeräte* erforderlich (Bild 244b). Ist beispielsweise die Temperatur in einem Aquarium – unabhängig von der schwankenden Umgebungstempera-

tur – ständig auf 20°C zu halten, muß das Wasser bei Umgebungstemperaturen unter 20°C geheizt werden. Dazu ist das Thermometer ständig zu beobachten, im Bedarfsfall die elektrische Heizung (das Steuergerät) einzuschalten, und zwar nur so lange, bis die Temperatur wieder 20°C erreicht hat. Die Aquarianer unter Ihnen, liebe Leser, werden jetzt bestimmt unruhig: Diese Tätigkeit ist unzumutbar! Aber es gibt auch eine einfache Lösung dieses Problems: Das Thermometer wird durch ein *Kontaktthermometer* ersetzt. Bei 20°C (oder einer anderen einzustellenden Temperatur) schließt es einen Kontakt – einen »Schalter«, der im Steuerkreis eines Relais liegt. In der Aquarien-Anlage ist das ein spezielles *Quecksilberrelais*; prinzipiell wäre aber auch unser Thermoschalter (vgl. Bild 88b) verwendbar: An 1 und 2 die Reihenschaltung von Kontaktthermometer und Spannungsquelle anschließen, an Stelle der Glühlampe die Heizung schalten (Anschlüsse 3 und 4). Solange der Thermometerkontakt geschlossen ist – und über das Relais ein Strom fließt – ist die Heizung ausgeschaltet. Sinkt jedoch die Wassertemperatur, öffnet der Schalter des Thermometers den Relaisstromkreis. Der Bimetallstreifen schließt jetzt den Ruhekontakt und schaltet damit die Heizung ein; die Temperatur steigt. Bei 20°C schließt sich der Relaiskreis wieder, und die Heizung wird abgeschaltet.

Durch die direkte Verbindung des Meßgerätes (Kontaktthermometers) mit dem Steuergerät (Heizung) über das Relais ist eine *automatische Regelung* entstanden (Bild 244c). Der Mensch tritt aus dem Regelkreis heraus. Im Produktionsprozeß spielen automatische Regelungen eine wichtige Rolle. In unserem Beispiel, das sich auch auf ein galvanisches Bad, einen Glühofen oder ein Gewächshaus übertragen läßt, handelt es sich um eine *Festwertregelung*. Störgrößen können beispielsweise die schwankenden Umgebungstemperaturen, schwankende Heizspannungen oder unterschiedliche Heizwerte flüssiger bzw. gasförmiger Brennstoffe sein. Soll dagegen der Druck in einem Dampfkessel konstant gehalten werden, obwohl ihm mehr Dampf als normal entnommen wird, ist folglich die Wasser-, Luft- und Brennstoffzufuhr zu erhöhen. In diesem Fall spricht man von einer *Folgerregelung*. Aus dieser wiederum entsteht eine *Zeitplanregelung*, wenn z. B. der Dampfdruck nach einem vorgegebenen Programm zu ganz bestimmten Zeiten um einen bestimmten Betrag zu verändern ist.

Ganz neu sind uns Steuerung und Regelung nicht. Wir haben unsere Motoren in der Drehrichtung umgesteuert, mit Licht den Strom durch eine Fotodiode gesteuert und auch bereits ein Beispiel für die Regelung kennengelernt, ohne besonders darauf hingewiesen zu haben. Der Basiswiderstand R_1 in der ersten Stufe unseres NF-Verstärkers II liegt nicht – wie beim Verstärker I (Bild 211) – an der Betriebsspannung, sondern am Kollektor. Steigt der Kollektorstrom von T_1 (Schaltung nach Bild 219) durch Erwärmung an, wird der Spannungsabfall über R_2 größer, und die Kollektorspannung sinkt. Da hier die Basisspannung aus der Kollektorspannung gewonnen wird, geht auch gleichzeitig der Basisstrom zurück, was wiederum ein Sinken des Kollektorstromes bewirkt. Die Schaltung arbeitet *temperaturstabil*, der Kollektorruhestrom bleibt nahezu konstant.

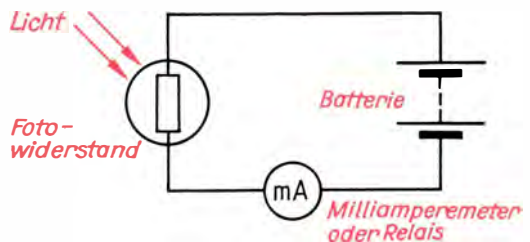
Wir haben jetzt in die Fragen der Steuerung und Regelung schon ein gutes System hineingebracht. Nicht ohne Grund – denn wir wollen nun einige schöne Anwendungsmodelle bauen: Lichtschranke für Alarmanlage und Dämmerungsschalter sowie eine Temperaturschranke als Feuermelder und Temperaturregler.

Wir steuern mit unseren Modellen

Mit Licht steuern

Wir haben bei unserer Lichttonanlage schon einmal mit Licht gesteuert. Dabei benutzten wir eine Fotodiode mit lichtempfindlichem pn-Übergang, jetzt wollen wir einen *Fotowiderstand* einsetzen. Dieser

Bild 245. Der Fotowiderstand beeinflusst den Stromfluß



besteht aus einer Halbleitersubstanz (Kadmiumsulfid oder Bleisulfid), die auf einen Isolator (Keramik oder Glas) aufgebracht und mit zwei Kontakten versehen ist. Schalten wir einen Fotowiderstand nach Bild 245 in einen Stromkreis und lassen Licht auf die Halbleiterschicht fallen, wird deren Widerstand kleiner, weil durch die Energiezufuhr zusätzlich Ladungsträger freigesetzt werden. Der Strom steigt an.

Fotowiderstände werden in der Steuer- und Regelungstechnik für *Lichtschranken* verwendet. Wenn man die Zahl der Gitter-Fehlstellen durch unterschiedliches Dotieren nur an einer Seite der Halbleiterschicht künstlich erhöht, so ist die Anzahl der lichtelektrisch freigesetzten Ladungsträger an beiden Seiten verschieden groß. Dieses »Dichtegefälle« der Elektronen (oder Löcher) läßt eine elektrische Spannung entstehen – die Schicht wirkt bei Lichteinstrahlung als Spannungsquelle. So arbeitet das *Fotoelement*, wie wir es in elektrischen Belichtungsmessern finden.

Wir bauen eine Lichtschranke mit Fotowiderstand

Dabei stoßen wir gleich zu Anfang auf eine grundsätzliche Schwierigkeit: Der Gleichstrom, den der Fotowiderstand selbst bei starkem Lichteinfall durchläßt, ist nicht stark genug, um beispielsweise eine Alarm-Klingel zu betreiben. Wir wissen aber, wie man Gleichstrom verstärkt: mit einem *Relais*, das einen neuen Stromkreis mit ausreichender Stromstärke schaltet! Wir werden ein so empfindliches Relais bauen, wie es mit unseren Mitteln

möglich ist: Es soll bei nur 3 mA ansprechen. (Unser erstes Relais brauchte 600 mA!) Da die Stromstärke im Stromkreis des Fotowiderstandes noch viel kleiner ist, bauen wir gleich einen kleinen zweistufigen Gleichstromverstärker mit ein.

Zwischendurch entsteht ein hochempfindliches Relais

Bild 246 zeigt das Relais und den zugehörigen Verstärker, der mit dem Relais auf einer Grundplatte aufgebaut wird. Die *Grundplatte* fertigen wir aus 4...5 mm dickem Hartpapier nach Bild 247.

Zuerst der Elektromagnet! Der Spulenkörper wird wie der des Summers und der Klingel (vgl. S. 88) hergestellt. Er erhält in der üblichen Art auf unserer Wickelvorrichtung 12000 Windungen CuL0,10; abdecken, lackieren, Drahtenden sichern. Der *Innenpol* wird diesmal 10...15 mm länger als bei Klingel und Summer; dafür wird der *Außenpol* nur 12 mm breit und nach Bild 248 zum Innenpol hin gebogen sowie an beiden Enden dessen Rundung angepaßt. Zwischen das Ende des Innenpoles und die beiden Enden des Außenpoles wird ein Stück Gummischlauch über das Innenpolende gezogen. Ein Streifen Isolierband hält die Polenden mit dem Gummischlauch zusammen. Der Befestigungswinkel (Haltewinkel) für den Kontaktblock wird nach unserer Werkstattnorm N₆ (Bild 8) aus 1 mm dickem Eisenblech mit folgenden Maßen in mm angefertigt: $a = 20$; $b = 15$; $c = 10$; $d = 1$; $e_1 = e_2 = 4$; $f_1 = f_2 = 8$; $g_1 = g_2 = 5$ (bei $h_1 = h_2 = 0$). Die Haltewinkel für den Anker und für den Magneten bauen wir wie bei Klingel und

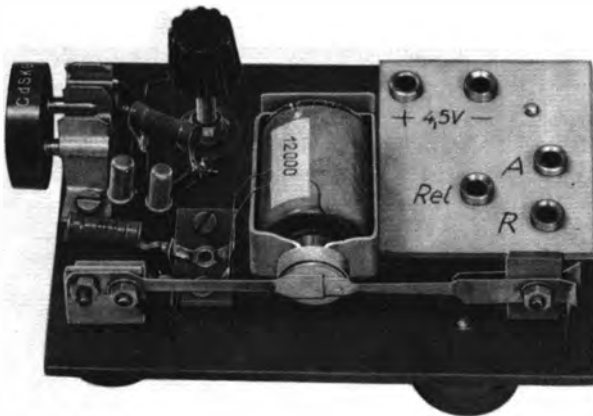


Bild 246. Unser hochempfindliches Relais mit Gleichstromverstärker

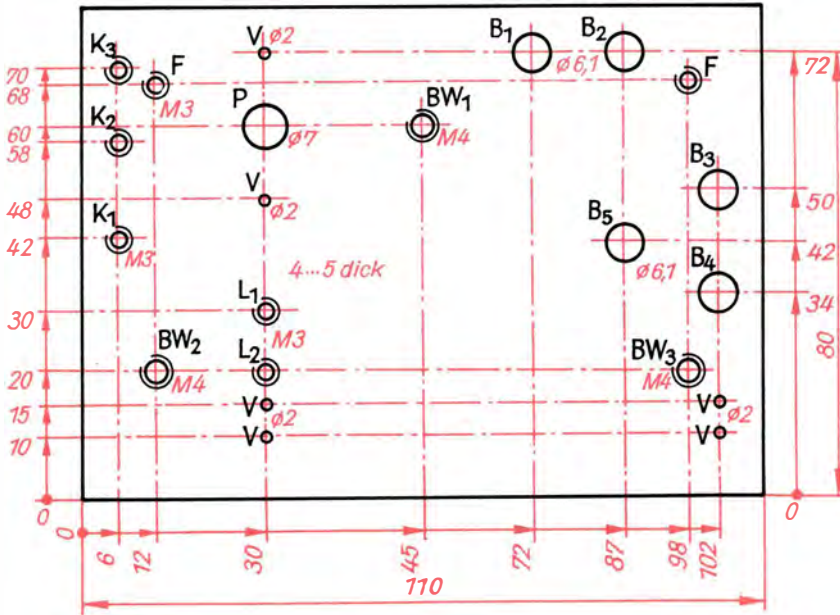


Bild 247. Grundplatte des Relaisverstärkers: V Leitungsdurchführungen, $K_1 \dots K_3$ Kontaktbleche, $B_1 \dots B_5$ Telefonbuchsen, P Potentiometer, BW_1 Befestigungswinkel zum Relaismagneten, BW_2 Befestigungswinkel zum Anker, BW_3 Befestigungswinkel zum Kontaktblech, L_1 und L_2 Lötösen, F Gummifuß (die anderen werden in K_3 , BW_2 und BW_3 verschraubt)

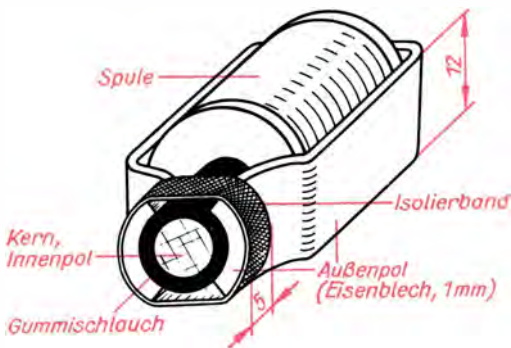


Bild 248. Elektromagnet des Relais

Summer, den Magnetwinkel nach N_6 (Maße wieder in mm): $a = 24$; $b = 15$; $c = 26$; $d = 1$; $e_1 = 6$; $e_2 = 4,2$; $f_1 = 12$; $f_2 = 8$; $g_1 = g_2 = 13$ (bei $h_1 = h_2 = 0$). Ankerwinkel nach Bild 91b.

Wir schrauben jetzt die fünf Telefonbuchsen bei B_1 bis B_5 in die Grundplatte und kennzeichnen sie (s. Bild 246): B_1 mit +, B_2 mit —, zwischen beiden: 4,5V; B_3 mit A (Arbeitskontakt), B_4 mit R (Ruhekontakt), B_5 mit Rel (Relaisankerkontakt). Wir befestigen den Elektromagneten mit seinem Befestigungswinkel bei BW_1 . Bei L_1 und L_2 werden (mit zwei M3-Schrauben) zwei Lötösen angebracht; an einer Seite der beiden Ösen werden die Spulen-

drahtenden angelötet. Den Gesamtaufbau einschließlich des Verstärkers und aller Leitungen (die roten verlaufen unterhalb der Platte) zeigt Bild 249. Dann wird der *Kontaktblock* nach Bild 250 wie beim Umschalter des Fernsprechers hergestellt. Die runden Enden der Kontaktzungen sind etwas nach innen zu biegen, um den Spielraum für den Ankerkontakt möglichst klein zu halten. Das Bild zeigt auch, wie der Haltewinkel angebracht wird. Mit diesem wird der Block – zusammen mit einem Fuß – auf der Grundplatte angeschraubt (die Kontaktzungen zu den Magnetpolen hin gerichtet). Bei F schrauben wir den zweiten Fuß fest.

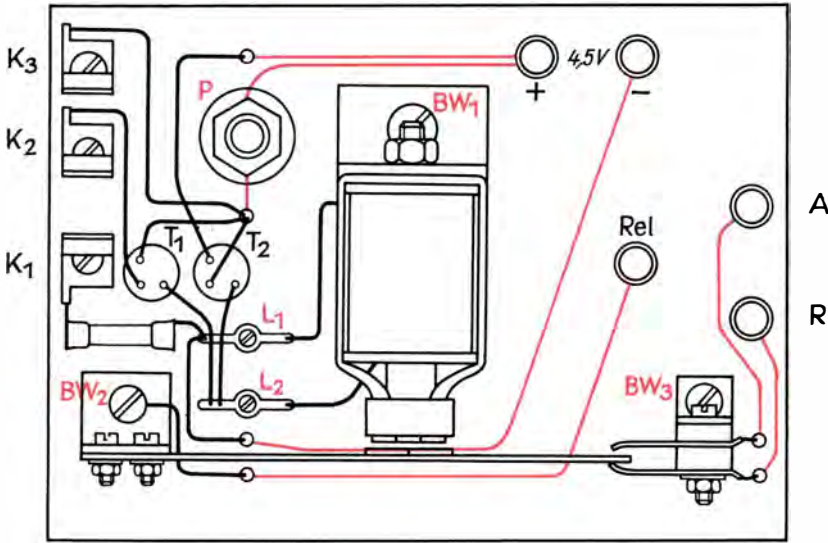


Bild 249. Aufbau des Relaisverstärkers

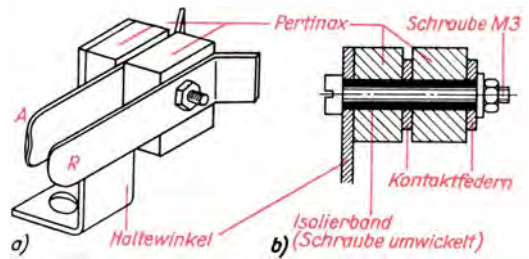


Bild 250. Kontaktblock: a) Ansicht, b) Schnitt durch die Verschraubung

Schwieriger ist der *Relaisanker* herzustellen. Er muß gut federn, also aus Federmessing (Flachbatterie-Kontakten) schmal geschnitten werden. Er soll vom Magneten angezogen werden und erhält daher in der Mitte eine Eisenblechscheibe. Deren Bewegungsmöglichkeit vor den Polen ist nur sehr klein (0,3...0,6 mm). Um diese Bewegung innerhalb der Kontaktzungen zu vergrößern, verlängern wir den Anker dorthin (als Hebelarm). Bild 251 zeigt alle Einzelheiten, auch die Bohrungen, mit denen der Anker durch zwei M3-Schrauben an seinem Haltewinkel (links im Bild 249) befestigt wird. Da die Batteriekontaktstreifen nicht 83 mm lang sind, müssen wir den Anker aus zwei Stücken zusammensetzen, die auf dem Eisenblech zusammengelötet werden. Die kreisrunde Eisenblechscheibe ist 1 mm dick. Damit sie nicht am Magneten haftenbleibt, wird sie mit dünnem Papier beklebt.

Dieser Anker wird – zugleich mit dem dritten Gummifuß – am Haltewinkel BW₂ so angeschraubt, daß das Eisenplättchen genau vor den Magnetpolen im genannten Abstand liegt und das Kontaktende ganz leicht an den R-Kontakt des Kontaktblockes drückt.

Um den *Fotowiderstand* (zwischen K₁ und K₂) und später eine *Thermosäule* (bei K₁, K₂ und K₃) leicht einfügen und auswechseln zu können, brauchen wir drei Kontaktwinkel aus federndem Messingblech (0,3...0,5 mm dick). Wir fertigen sie nach Bild 252a. Die halbkreisförmige Wölbung (Nut) wird einen Stecker aufnehmen, der hier guten Kontakt findet und federnd festgehalten wird. Die offenen Seiten von K₁ und K₂ stehen einander gegenüber; der dritte Kontaktwinkel wird nach Bild 252b wie K₂ gestellt. Wir schrauben nun die Winkel an, bei K₃ auch den vierten Gummifuß.

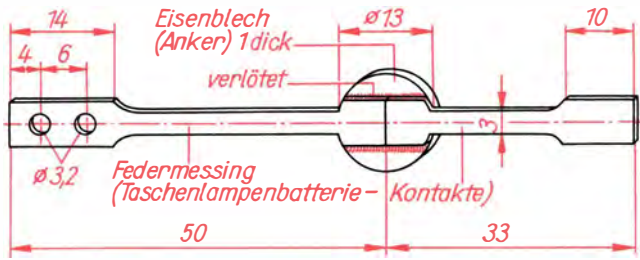


Bild 251. Relaisanker

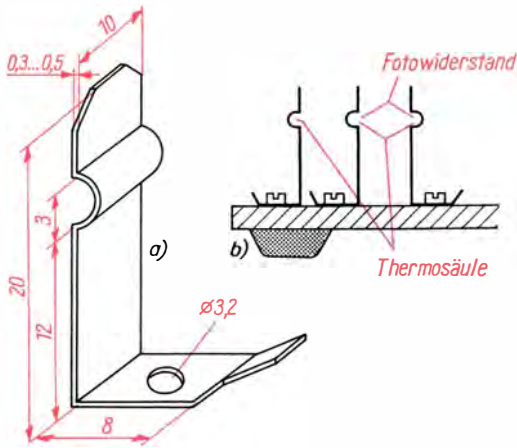


Bild 252. Kontaktwinkel (a) und ihre Anordnung (b)

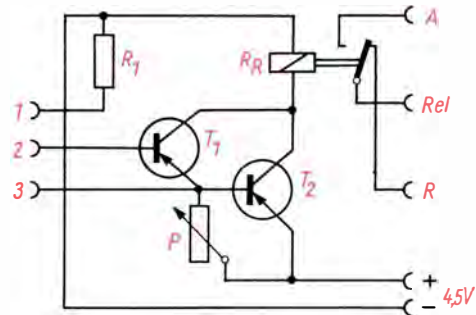


Bild 253. Schaltbild des Relaisverstärkers

auf der Grundplatte aufgebaut und verdrahtet. Der Widerstand R_R ($1 \dots 5 \text{ k}\Omega$) ist der des Relaismagneten. Das 3-mA-Relais ist damit vollständig.

Einstellen (Justieren) des Magnetsystems:

Wir legen 4,5 V Spannung (Flachbatterie) an die beiden Lötösen; der Anker muß angezogen werden.

Die Kontaktzungen im Block und den Anker biegen wir vorsichtig so, daß der Anker bei Spannung am Elektromagneten den Arbeitskontakt, bei Unterbrechen des Magnetstromes den Ruhekontakt berührt – beide mit einer leichten mechanischen Vorspannung.

Damit ist der schwierigere Teil des Relais fertig; wir haben nur noch den *zweistufigen Gleichstromverstärker* aufzubauen, der den steuernden Strom so verstärken soll, daß das Relais darauf reagiert. Die Schaltelemente und ihre Schaltung ergeben sich aus Bild 253: Zwei Transistoren T_1 und T_2 (s. Tabelle 2 im Anhang); der verstellbare Widerstand P (Potentiometer): $10 \text{ k}\Omega$; $R_1 = 27 \text{ k}\Omega$. Alles wird

Funktionsprüfung und Steuerungsversuche

Wir schließen (richtig gepolt) eine Flachbatterie (4,5 V) an und stecken den gekauften Fotowiderstand (s. Tabelle 2 im Anhang) zwischen die federnden Kontakte K_1 und K_2 . Die Stecker des Widerstandes sitzen in den Nuten der Kontaktbleche. Wir verdunkeln den Fotowiderstand, indem wir die Handfläche davorhalten. Am Potentiometer suchen wir nun durch Drehen des Knopfes die Stelle, bei der der Anker gerade abfällt; wir drehen dann noch ein kleines Stück in der »Abfallrichtung« weiter. Nehmen wir jetzt die Hand vom Fotowiderstand fort, muß der Anker angezogen werden. Wenn das nicht geschieht, stellen wir das Potentiometer nach oder sorgen für helleres Licht. An jedem

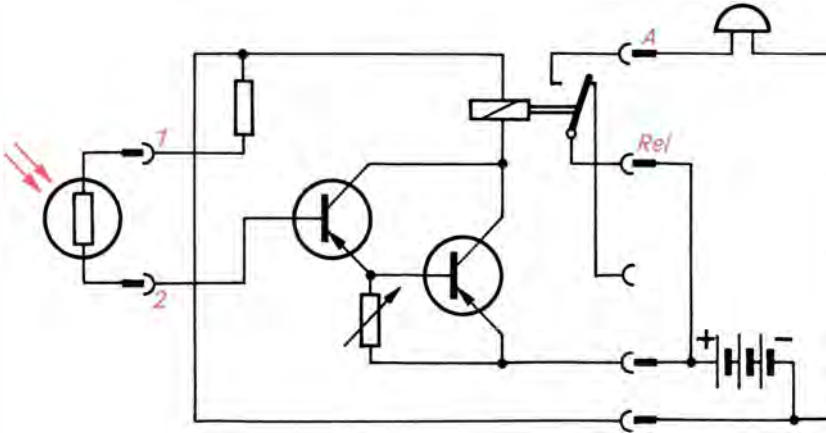


Bild 254. Schaltbild der Lichtschranke

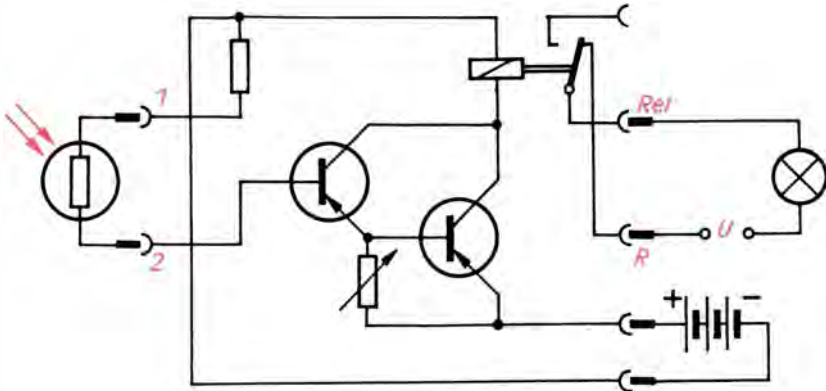


Bild 255. Schaltbild des Dämmerungsschalters

neuen Standort muß das Gerät neu eingestellt, das heißt, den dort herrschenden Lichtverhältnissen angepaßt werden!

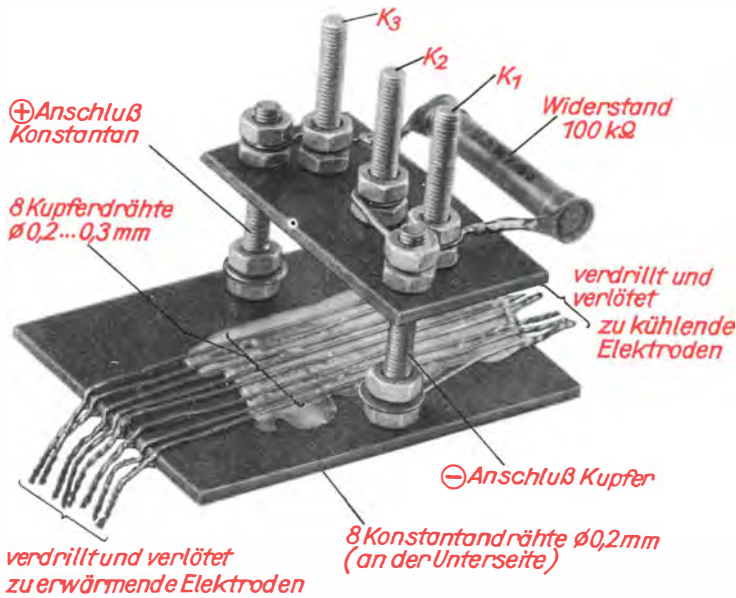
Haben wir die richtige Potentiometerstellung gefunden, so justieren wir die Relaiskontakte. Wir legen an Rel und A eine zweite Flachbatterie mit dazu passendem Glühlämpchen. Beim Erhellern und Verdunkeln des Fotowiderstandes muß das Glühlämpchen aufleuchten und wieder erlöschen. Der Versuch wird mit Rel und R wiederholt. Die Kontaktzungen müssen gegebenenfalls vorsichtig nachgebogen werden; beide Kontakte sollen sicher schalten.

Bild 254 zeigt die *Lichtschrankenschaltung*, in der unser Modell vielseitig zu verwenden ist, als Alarmanlage oder als Zählkontrolle. Wer wünscht, daß bei Dämmerung das Standlicht seines Kraftfahrzeuges selbsttätig aufleuchtet, der schaltet nach Bild 255 seinen *Dämmerungsschalter*!

Mit Wärme steuern

Eine *Temperaturschranke* ist der Lichtschranke ähnlich – nur daß das 3-mA-Relais jetzt auf Wärme anspricht! Im *Thermoelement* wird beim Erhitzen eine sehr geringe *Thermospannung* und bei geschlossenem Stromkreis ein Thermostrom erzeugt. Die Temperatur einer Streichholz- oder Kerzenflamme reicht aus für einen Thermostrom, der, im Verstärker vergrößert, den Relaisanker anzieht.

Bild 256. Ansicht der Thermosäule

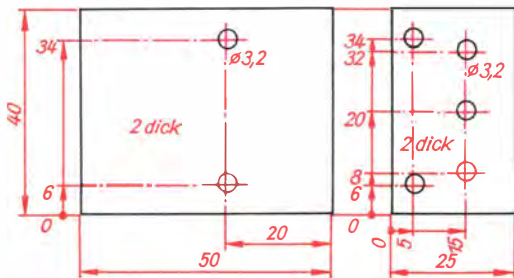


Verbindet man die Enden zweier Drähte aus verschiedenen Metallen miteinander (Verdrillen und Verlöten), so entsteht zwischen beiden Enden eine *Berührungsspannung*, weil die Leitungselektronen bei beiden Metallen an Zahl und Beweglichkeit verschieden sind. Die Größe des Thermostromes ist nicht einfach von der Temperatur an der Verbindungsstelle abhängig, sondern von der Differenz dieser Temperatur und derjenigen an der Stelle, wo die beiden anderen Enden der Drähte, beispielsweise über ein Meßgerät, verbunden sind (damit der Stromkreis geschlossen ist). Man taucht diese zweite Verbindungsstelle daher in möglichst kaltes Wasser. Die Stromstärke ist ferner von der Aus-

wahl der Metalle abhängig. Besonders günstig sind beispielsweise die Thermopaar-Zusammenstellungen Wismut-Antimon oder Eisen-Nickel. Wir werden dazu die ebenfalls wirksame (und leicht zu beschaffende) Kombination Kupfer-Konstantan verwenden.

Mit Halbleitern kann man diesen *Thermoeffekt* noch wesentlich verbessern. Erwähnt sei hier noch ein »umgekehrter« Effekt, der *Peltier-Effekt*, der eine große Bedeutung in der Technik hat: Man erhitzt nicht den Thermokreis, um Strom zu bekommen, sondern man schickt von außen einen Strom hindurch – und eine der Verbindungsstellen kühlt stark ab! Einfacher kann man sich die Kühleinrichtung im Kühlschrank nicht mehr vorstellen. Der Anfang ist bereits mit Halbleiter-Kühlelementen gemacht worden.

Bild 257. Montageplatten für die Thermosäule



Eine Thermosäule entsteht

Bild 256 zeigt den Aufbau der Säule, die bei unserem Modell aus acht hintereinandergeschalteten Thermo-elementen besteht. Zunächst werden nach Bild 257 zwei Hartpapierplatten (2 mm dick) angefertigt, die größere für die Elemente und die kleinere für drei Kontaktschrauben $K_1 \dots K_3$ sowie einen Widerstand von 100 k Ω . In die größere Platte setzen wir zwei längere M3-Schrauben ein und ziehen sie

mit je einer Mutter fest. Die Platte erhält in der Mitte ihrer Schmalseiten je 8 kleinere Kerben (alle 2 mm voneinander entfernt). Wir legen je 8 Stücke Konstantandraht (0,20 mm Durchmesser) und Kupferdraht (0,20...0,30 mm Durchmesser), sämtlich 75...80 mm lang, zurecht, desgleichen je ein Drahtende beider Sorten von etwa 40 mm Länge (für den Anschluß an den Schrauben bestimmt).

Nun wird die größere Platte stückweise und abwechselnd mit Kupferdraht und mit Konstantandraht »bewickelt«; Kupfer nur auf der einen und Konstantan nur auf der anderen Seite. An den Kerben werden jeweils zwei (verschiedenartige) Enden miteinander fest verdreht und zum Schluß einzeln verlötet, oben acht und unten neun Verdrehungen. Wir beginnen mit einem kurzen Ende Kupferdraht, schrauben es mit Unterlegscheibe und einer zweiten Mutter an einer der beiden Schrauben fest (Bild 256). Dann wird es an die erste der unteren Kerben geführt und hier mit dem ersten Konstantandraht verdreht. Dieser wird auf der anderen Seite zur gegenüberliegenden Kerbe geleitet und hier mit dem ersten langen Kupferdraht verdreht. Der läuft auf der »Kupferseite« über die Platte zur zweiten Kerbe und wird hier mit dem nächsten Konstantandraht verdreht – und so weiter, bis der letzte Kupferdraht mit dem kurzen Konstantandraht verdreht und dieser zur zweiten Schraube geführt wird. Hier schrauben wir ihn in bekannter Weise mit einer zweiten Mutter und Unterlegscheibe fest.

Alle verdrehten Enden werden einzeln verlötet. Die Drähte sind mit Zweikomponentenkleber an der Platte anzukleben; das obere Ende des (von den Schrauben aus gerechnet) längeren Plattenteiles bleibt frei von Klebstoff. An dieser Seite werden die Drahtenden gleichmäßig um etwa 90° von der Platte abgebogen, damit man eine Flamme darunterhalten kann. Die unteren Drahtenden bleiben geradeaus gerichtet, weil sie in ein Gefäß mit kaltem Wasser gesteckt werden sollen.

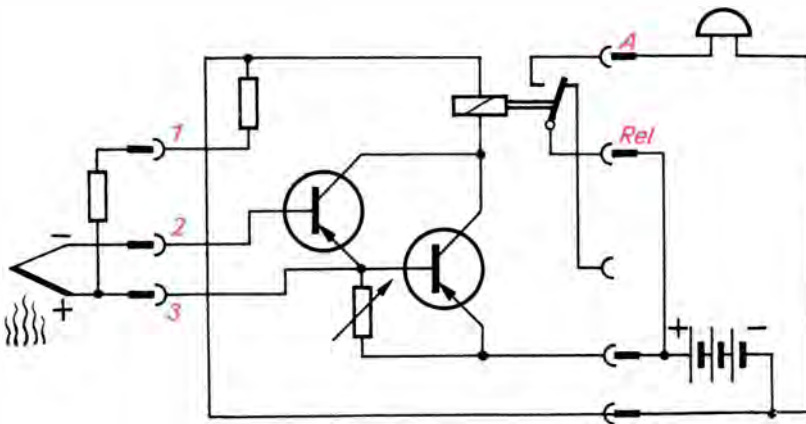
In die kleinere Platte werden die drei M3-Kontaktschrauben eingesetzt; zwischen die beiden äußeren löten wir den Widerstand 100 kΩ ein. Die kleine Platte wird auf die Schrauben der größeren aufgesetzt und in möglichst großem Abstand mit zwei mal zwei Muttern festgeschraubt. Damit sind die Drahtanschlüsse auf die kleinere Platte geführt worden, und wir verdrahten hier nach Bild 256: Kupferdrahtanschluß an die mittlere Kontaktschraube K₂, Konstantandrahtanschluß an die Kontaktschraube K₃, neben der entsprechenden Verbindungsschraube.

Zur Funktionsprüfung setzen wir die Thermosäule so in den Verstärker des Relais ein, daß die nicht umgebogenen Drahtenden in eine Schale mit kaltem Wasser tauchen.

4,5 V anlegen; Potentiometer so einstellen, daß der Anker gerade abfällt.

Jetzt die umgebogenen Enden der Drähte mit einer Streichholz- oder Kerzenflamme erhitzen – der Anker wird angezogen.

Bild 258. Schaltbild der Temperaturschranke



Die Temperaturschranke als Feuermelder

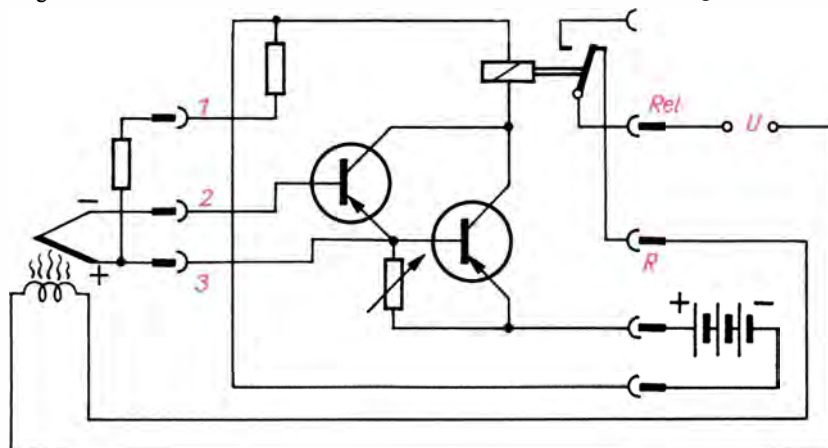
Wir schalten nach Bild 258. Nach diesem Prinzip arbeitende »Temperaturfühler« verwendet man (in °C geeicht) als Meßgerät vorzugsweise für höhere Temperaturen, beispielsweise in der Metallurgie. Bis 800°C nimmt man die Kombination Eisen-Konstantan, bis 1100°C Nickelchrom-Nickel, bis 1600°C Platinrhodium-Platin.

Modellversuch zur Temperatur- regelung

Die Festwertregelung hat die Aufgabe, Zustandsgrößen, in unserem Beispiel eine Temperatur, auf einem bestimmten Wert – dem *Sollwert* – zu halten. Bild 259 gibt die Schaltung zu einer *Temperaturregelung* wieder. Die Thermosäule ist so eingestellt, daß sie bei Übertemperatur über Verstärker und Relais die Heizspannung U abschaltet. Ist die Temperatur wieder genügend gesunken, schaltet die Anlage die Heizung wieder ein.

Wir wickeln eine kleine *Heizwendel* (nicht Spirale)

Bild 259. Schaltbild des Modells zur Temperaturregelung

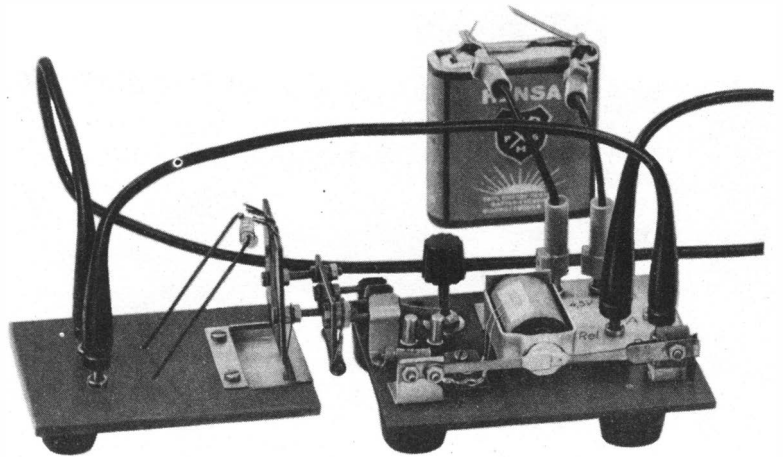


mit etwa 4 mm Durchmesser und 10 mm Länge aus Widerstandsdraht (beispielsweise Nickelin) von 0,1 mm Durchmesser. Die richtige Drahtlänge erhalten wir, indem wir 12 V ~ an etwa 300 mm des Drahtes legen und ihn so lange verkürzen, bis er gerade dunkelrot aufglüht; der fließende Strom darf 1 A nicht übersteigen. Die eng gewickelte Wendel wird heißer als der gestreckte Draht, weil die Luft dann nicht mehr so gut kühlen kann. Die *Grundplatte* für den Mini-Heizkörper aus Hartpapier ist 4 mm dick und 90 mm × 70 mm groß, hat vier Gummifüße und an einer Schmalseite zwei Telefonbuchsen. Die Heizwendel selbst löten wir an zwei 1 mm dicke Kupferdrähte, die an der Plattenunterseite mit den Telefonbuchsen verschraubt sind und durch zwei Bohrungen (etwa in Plattenmitte) schräg nach oben geführt werden. Ihre Höhe, rund 65 mm von der Tischfläche aus gerechnet, ergibt sich aus der Lage der abgebogenen Enden der Thermosäule, unter denen die Heizwendel in geringem Abstand liegen soll.

Als Heizspannung U entnehmen wir unserer Schalttafel 12 V ~, bei größerer Wendel entsprechend mehr. Die Heizwendel muß hell glühen, um die nötige Temperatur für die Thermosäule zu haben. Auf die Grundplatte stellen wir eine kleine Schale mit kaltem Wasser, in das die unteren Enden der Thermosäule eintauchen. Wer will, kann sich auch einen metallischen Behälter zusammenlöten, ihn in die Grundplatte versenken und mit ihr verschrauben. Im Bild 260 ist auch die Heizung zu sehen.

Nach dem Einschalten der Anlage dauert es eine Weile, bis die gewünschte Temperatur (Zustands-

Bild 260. Versuchsaufbau zur Temperaturregelung



größe) an der Thermosäule erreicht ist; wird sie überschritten, so schaltet die Temperaturschranke ab. Die Temperatur kommt nicht über die »Schranke« hinweg! Nach ausreichender Abkühlung wird die Temperatur zu niedrig sein; der Heizstrom wird wieder eingeschaltet. Auf diese Weise erhalten wir eine ähnliche Wirkung wie beim Blinklicht mit Theroschalter.

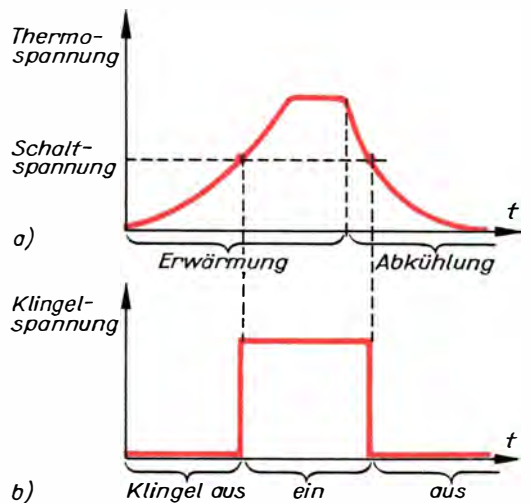
Analoge und digitale Signale

Die Thermosäule unserer Temperaturschranke gibt Spannungen ab, die der Temperaturdifferenz zwischen erwärmter und gekühlter Elektrodengruppe verhältnismäßig sind: Steigt die Temperatur, dann wird auch die erzeugte Spannung größer und umgekehrt. Die zeitlichen Spannungsänderungen verlaufen *analog* (entsprechend) den Temperaturänderungen. Die aus Bild 261a ersichtliche Spannungs-

Rechnen und Zählen

Den großen Vorteil des Zählwerkes unserer Spulenwickelvorrichtung konnten wir oft selbst erleben, wie hätten wir anders ordentlich wickeln und noch mitzählen sollen! Für viele Zwecke ist ein mechanisches Zählwerk jedoch ungeeignet. Die Zählräder nutzen sich bei Dauerbetrieb stark ab, und schnell aufeinanderfolgende Impulse, z. B. elektrische Schwingungen hoher Frequenz, vermag die »träge« Mechanik nicht zu zählen. Trägheit und Verschleiß auszuscheiden, fordert den Übergang zu vollständig neuen Wirkungsprinzipien, wie sie beispielsweise die moderne *Halbleiterelektronik* bereithält. Weil Rechnen und Zählen nur mit Zahlen oder Ziffern möglich ist, wenden wir uns nun der »Ziffern-Elektronik« oder *Digital-Elektronik* zu (engl. digit: Ziffer).

Bild 261. Signalformen: a) analoges Signal (Thermospannung), b) digitales Signal (Klingelspannung)



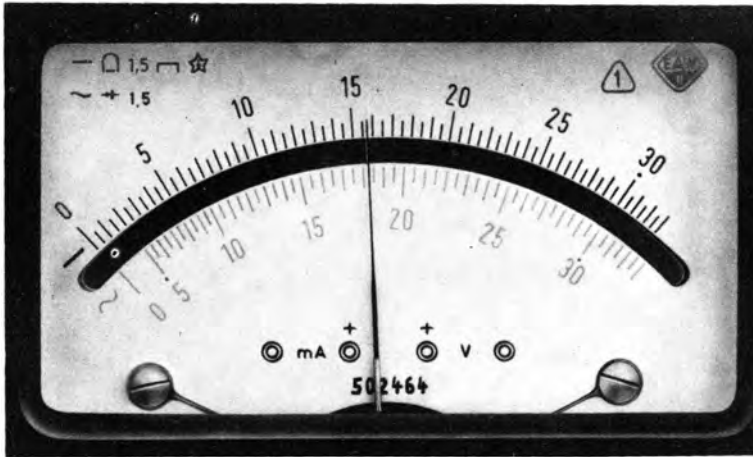
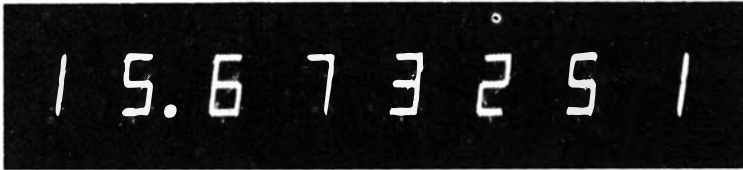


Bild 262. Analoge (a) und digitale Anzeige (b) von Meßgeräten

a)



b)

kurve könnte an der Thermosäule aufgenommen worden sein. Die Augenblickswerte schwanken zwischen einem kleinsten und einem größten Wert, ohne daß »Sprünge« im Kurvenverlauf auftreten. Die Thermospannung ist ein typisches *analoges Signal*.

Ganz anders verhält sich dagegen die Spannung an der Klingel der Temperaturschranke: Zieht der Relaisanker an, liegt die volle Spannung an der Klingel, und sie ertönt. Bei Ankerabfall ist die Spannung wieder Null, und damit ist Ruhe. Die sprungförmigen Spannungsänderungen zu den Schaltzeitpunkten (Bild 261b) sind kennzeichnend für ein *digitales Signal*. Mit solchen Signalen arbeitende elektronische Geräte erfordern *digitale Schaltungen* und ermöglichen eine *digitale Informationsausgabe*. Während wir auf der Skale des herkömmlichen (Analog-)Meßgerätes nach Bild 262 eine Spannung von 15,7 (Volt) ablesen können, gestattet das Digital-Meßgerät eine weitaus höhere Genauigkeit, z. B. 15,673251. An diesem Beispiel wird der große Vorteil digitaler Schaltungen wohl recht deutlich; verborgen bleibt jedoch der technische

Aufwand. Erst die moderne *Mikroelektronik* mit ihren *integrierten Schaltkreisen* ermöglicht eine wirtschaftliche Fertigung solcher Digitalgeräte.

Digitale Schaltungen, wie sie u. a. für das erwähnte Meßgerät benötigt werden, setzen sich aus *logischen Elementarschaltungen* zusammen. Ehe wir selbst Logik-Schaltungen aufbauen, müssen wir uns etwas näher mit der *Logik* beschäftigen.

Über die Logik der Sprache und der Technik

Aussagen, wie »Es regnet« oder »Draußen scheint die Sonne«, scheinen eigentlich nicht das Geringste mit der Elektronik gemein zu haben. Und dennoch existiert dieses Verbindende:

Eine Aussage ist entweder wahr oder falsch.

Neben diesen beiden *Wahrheitswerten* kann es logischerweise keinen dritten geben. Gerade diese *Zweiwertigkeit* ohne *Zwischenwerte* ist aber auch das Kennzeichen der anfangs erwähnten Klingel-

spannung als Beispiel für ein (zweiwertiges) digitales Signal:

Die Klingel ist entweder eingeschaltet oder ausgeschaltet.

Für unsere Betrachtungen interessieren jeweils nur die Wahrheitswerte von Aussagen, nicht aber deren konkreter Inhalt. Verbinden wir mehrere Aussagen miteinander, so entstehen *Aussagenverbindungen*. Auch diese haben wieder die Eigenschaft, entweder wahr oder falsch zu sein, und zwar in Abhängigkeit von den Wahrheitswerten der Aussagen.

»L ißt B und trinkt C« – eine Aussagenverbindung

L bedeutet »Lars«, B »Bockwurst« und C schließlich »Cola«. Neben den beiden Aussagen »Lars ißt Bockwurst« und »(Lars) trinkt Cola« ist das verbindende *und* von großer Wichtigkeit. Überlegen wir, unter welchen Bedingungen diese Aussagenverbindung wahr ist! Ißt Lars weder Bockwurst noch trinkt er Cola (beide Aussagen sind *falsch*), dann ist ebenfalls die Aussagenverbindung *falsch*. Auch wenn Lars zwar Cola trinkt, aber keine Bockwurst ißt, bleibt sie *falsch*. Gleiches gilt für den Fall, daß Lars zwar Bockwurst ißt, aber keine Cola trinkt. Erst wenn er *sowohl* Bockwurst ißt *als auch* Cola trinkt (jetzt sind beide Aussagen *wahr*), wird auch die Aussagenverbindung *wahr*.

Der Übersichtlichkeit willen führen wir nun für die Aussagen Variablen (veränderliche Größen) ein: *a* soll »Lars ißt Bockwurst« und *b* »Lars trinkt Cola« bedeuten. Mit den Abkürzungen *f* (für falsch) und *w* (für wahr) erhalten wir folgende *Wahrheitstabelle*:

Aussagen		Aussagenverbindung <i>a und b</i>
<i>a</i>	<i>b</i>	
f	f	f
f	w	f
w	f	f
w	w	w

Die Aussagenverbindung mit »und« wird als *Konjunktion* bezeichnet. Sie ist nur dann wahr, wenn *alle* Teilaussagen wahr sind.

Ein weiteres wichtiges Bindewort ist »oder«. Die entsprechende Verbindung heißt *Disjunktion*: »Lars ißt Bockwurst, *oder* er trinkt Cola«. Wir müssen dieses »oder« streng von »entweder – oder« unterscheiden. Auch für die Disjunktion gibt es wieder vier Kombinationen:

- L ißt B: f, L trinkt C: f, Disjunktion: f,
- L ißt B: f, L trinkt C: w, Disjunktion: w,
- L ißt B: w, L trinkt C: f, Disjunktion: w,
- L ißt B: w, L trinkt C: w, Disjunktion: w.

Bei »entweder – oder« wäre die letzte Kombination falsch; das ist der Unterschied. Wir prägen uns ein: Eine Disjunktion ist nur dann *falsch*, wenn *alle* Teilaussagen *falsch* sind. Hier noch die Wahrheitstabelle der Disjunktion:

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a oder b</i>
f	f	f
f	w	w
w	f	w
w	w	w

Die letzte für uns wesentliche Aussagenverbindung ist die Verneinung oder *Negation*. Eigentlich ist der Begriff »Verbindung« hier irreführend, denn es wird nur mit *einer* Aussage logisch operiert. Die Verneinung der Aussage »Lars ißt Bockwurst« lautet entweder »Lars ißt keine Bockwurst« oder »Es ist *nicht* wahr, daß Lars Bockwurst ißt.« Hier gibt es nur zwei Möglichkeiten. Ist die Aussage »L ißt B« falsch, dann muß die Verneinung wahr sein und umgekehrt:

<i>a</i>	<i>nicht a</i>
f	w
w	f

Noch einmal: Schaltung von Schaltern (»Schalterlogik«)

Zur technischen Nachbildung des Wahrheitsverhaltens der drei genannten Aussagenverbindungen können wir unsere selbstgebauten Mehrzweckschalter (vgl. S. 76) verwenden. Aus Bild 263 ist ersichtlich, wie sie als Signalgeber für »wahr« und

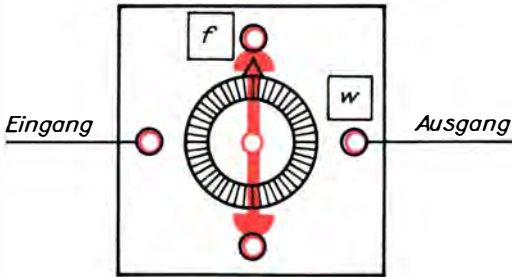


Bild 263. Schalter als Signalgeber für »wahr« und »falsch«

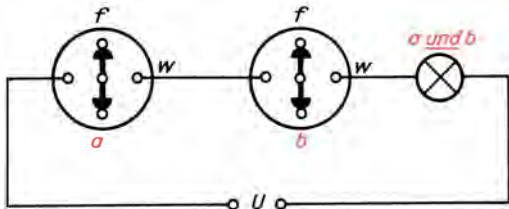


Bild 264. Konjunktion durch Reihenschaltung

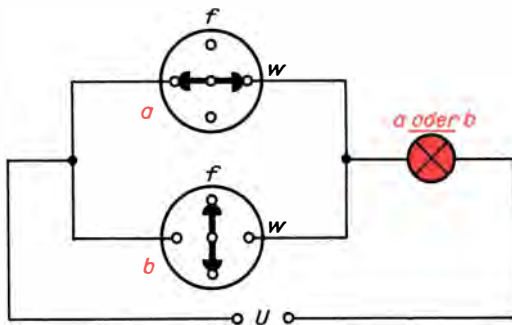
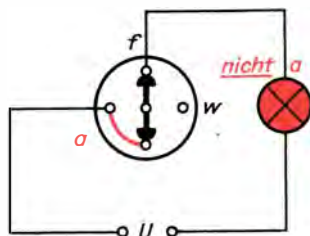


Bild 265. Disjunktion durch Parallelschaltung

Bild 266. Negation mit Umschalter



»falsch« herzurichten sind: Die »Nase« des Dreh-
schalters stellen wir genau in Richtung des unten
liegenden Kontaktarmes, und auf die Schalterplatte
kleben wir zwei Schildchen mit den Symbolen für
»wahr« und »falsch«. Bild 264 zeigt, wie die »Schalter-
Konjunktion« aussieht. Jeder Schalter vertritt
eine Aussage, die Aussagenverbindung wird durch
die Lampe gekennzeichnet. Es bedeuten:

- Schalter geöffnet: Aussage falsch,
- Schalter geschlossen: Aussage wahr,
- Lampe dunkel: Aussagenverbindung falsch,
- Lampe hell: Aussagenverbindung wahr.

Wir schalten nacheinander die in der Wahrheits-
tabelle enthaltenen Kombinationen von *a* und *b*
und stellen fest: Die Lampe leuchtet nur dann,
wenn Schalter *a* und Schalter *b* geschlossen sind.

Da wir mitten in der Logik sind: Wie ist es mit
unserem logischen Denken bestellt? Wir wollen
eine »Schalter-Disjunktion« aufbauen! *Wir lesen
nicht weiter, sondern blättern zurück*: Aus der Wahr-
heitstabelle der Disjunktion entnehmen wir, daß
die Lampe nur dann dunkel sein darf, wenn beide
Schalter auf *f* stehen – also geöffnet sind. Ist nur
ein Schalter oder sind *beide* geschlossen, muß die
Lampe leuchten. Wie sind Schalter und Lampe zu
schalten? Aber natürlich – genau wie die Klingel-
anlage in unserer Wohnung! Die Klingel soll ja
auch nur dann *stumm* sein, wenn keiner der beiden
Klingelknöpfe an Wohnungs- bzw. Haustür ge-
drückt wird. So einfach ist das also (Bild 265).

Für die Negation verwandeln wir einen der beiden
Ausschalter durch Stecken einer Verbindungslei-
tung in einen Umschalter. Die »Schalter-Negation«
zeigt Bild 266: In Stellung *f* leuchtet die Lampe
(wahr) und bei Stellung *w* geht sie aus (falsch).

Das Rechnen im Zweiersystem ist besonders einfach

Als der Mensch zu zählen begann, nahm er seine
Finger zu Hilfe. So entstand das *Zehner-* oder *De-
zimalsystem*, an das wir uns gewöhnt haben und in
dem wir denken. 374 Mark sind beispielsweise:
3 Hundertmarkscheine, 7 Zehnmarkscheine und
4 Markstücke, also

$$374 = 3 \cdot 100 + 7 \cdot 10 + 4 \cdot 1.$$

Die zehn Ziffern von 0 bis 9 erhalten eine um
so höhere Wertigkeit, je weiter links sie stehen;
jede Stelle hat einen bestimmten Wert, den *Stellen-*

wert. Er ist grundsätzlich eine Potenz, hier mit der Basis (Grundzahl) 10; der Exponent (Hochzahl) ist immer um eins kleiner als die Stellennummer. Am Beispiel der 374 sieht das so aus:

Dezimalzahl	3	7	4
Stellen-Nr.	3	2	1
Stellenwert	10^2	10^1	10^0
Zahlenwert	$3 \cdot 10^2$	$+ 7 \cdot 10^1$	$+ 4 \cdot 10^0$
	= 300	+ 70	+ 4
	= 374		

Neben dem Dezimalsystem sind aber auch andere Zahlensysteme denkbar. Uns interessiert hier besonders das Zweiersystem, auch *Dualsystem* genannt. Es hat nur zwei Ziffern, nämlich 0 und 1, und die Stellenwertbasis 2. Damit die Ziffern des Dualsystems nicht mit den Dezimalziffern verwechselt werden, stellen wir die duale Eins auf den Kopf: I. Dieses Zeichen ist aber auf keiner Schreibmaschine vorhanden; deshalb verwenden wir dafür das Zeichen L. Eine Dualzahl sieht dann beispielsweise so aus: 0LL0. Aber aufgepaßt: Wir meinen nicht unseren Langhaardackel »Ollo«, sondern die Zahl »null-eins-eins-null«; ihren *dezimalen* Wert ermitteln wir über das Stellenwertsystem.

Dualzahl	0	L	L	0
Stellen-Nr.	4	3	2	1
Stellenwert	2^3	2^2	2^1	2^0
Zahlenwert	$0 \cdot 2^3$	$+ 1 \cdot 2^2$	$+ 1 \cdot 2^1$	$+ 0 \cdot 2^0$
	= 0 · 8	+ 1 · 4	+ 1 · 2	+ 0 · 1
	= 0	+ 4	+ 2	+ 0
	= 6			

Bild 267 enthält die duale Darstellung der Dezimalziffern von 0 bis 7. Wir sehen, daß im Stellenwert 2^0 von Zahl zu Zahl ein Wechsel von 0 auf L erfolgt, beim Wert 2^1 nach jeder zweiten Zahl und beim Wert 2^2 nach jeder vierten.

Das *Rechnen im Dualsystem* ist sehr einfach; wir beginnen mit der *Addition*:

$$\begin{aligned}
 0 + 0 &= 0 \\
 0 + L &= L \\
 L + 0 &= L \\
 L + L &= L0
 \end{aligned}$$

dual			dezimal
2^2	2^1	2^0	
0	0	0	0
0	0	L	1
0	L	0	2
0	L	L	3
L	0	0	4
L	0	L	5
L	L	0	6
L	L	L	7

Bild 267. Kleines »Wörterbuch« dual – dezimal

Bei »eins plus eins gleich zwei« in der letzten Zeile tritt bereits ein Übertrag in die nächsthöhere Stelle auf, so wie das auch im Dezimalsystem bei $9 + 1 = 10$ der Fall ist.

Es folgt die *Multiplikation* oder »Das kleine Einmaleins« der Dualzahlen:

$$\begin{aligned}
 0 \cdot 0 &= 0 \\
 0 \cdot L &= 0 \\
 L \cdot 0 &= 0 \\
 L \cdot L &= L
 \end{aligned}$$

Mathematik der Logik

Die Logik kennt *zwei* Wahrheitswerte, das Dualsystem *zwei* Ziffern. Wir treffen folgende Zuordnung:

$$\begin{aligned}
 f &\rightarrow 0 \\
 w &\rightarrow L
 \end{aligned}$$

Für die Aussagen hatten wir bereits *Variablen* (*a, b*) eingeführt. Die Aussagenverbindungen werden jetzt zu *logischen Funktionen*, und aus den Wahrheitstabellen entstehen *Wertetabellen*. Für die logischen Bindewörter »und«, »oder« und »nicht« müssen nun nur noch *sinnvolle Zeichen* vereinbart werden. Beim Vergleich der Multiplikation von Dualzahlen mit der Wahrheitstabelle der Konjunktion ist ersichtlich, daß beide nach obiger Zuordnung vollkommen übereinstimmen. Deshalb führen wir für die Konjunktion das Operationszeichen » · «

ein, *lesen es aber als »und«*. Aus diesem Grund wird die Konjunktion mitunter auch als *logisches Produkt* bezeichnet. Das ist nun die Wertetabelle der Konjunktion:

a	b	$a \cdot b$
0	0	0
0	L	0
L	0	0
L	L	L

Die Addition von Dualzahlen stimmt – bis auf die letzte Zeile – mit der Wahrheitstabelle der Disjunktion überein; wir verwenden deshalb für die Disjunktion oder *logische Summe* das Operationssymbol » + «, *lesen es aber stets als »oder«*. Die Wertetabelle der Disjunktion lautet:

a	b	$a + b$
0	0	0
0	L	L
L	0	L
L	L	L

Für die Negation gibt es keinen mathematischen Vergleich. Wir kennzeichnen sie durch einen waagerechten Strich über der Variablen:

a	\bar{a}
0	L
L	0

Die Verwendung der aus der Mathematik bekannten *Operationszeichen* für Konjunktion und Disjunktion ist für uns sehr vorteilhaft. Alle Gesetze der *mathematischen Algebra* können wir rein formal auch auf logische Funktionen übertragen. Das logische Rechnen wird dadurch beträchtlich erleichtert:

Kommutativgesetz:

$$a + b = b + a, \quad a \cdot b = b \cdot a$$

Assoziativgesetz:

$$(a + b) + c = a + (b + c) = a + b + c$$

$$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c) = a \cdot b \cdot c$$

Distributivgesetz:

$$a \cdot b + a \cdot c = a \cdot (b + c)$$

Darüber hinaus gibt es jedoch eine Reihe spezieller Gesetze und Rechenregeln der logischen Algebra, von denen wir uns einige ansehen wollen, und zwar $a \cdot a, a \cdot \bar{a}, a + a$ und $a + \bar{a}$. Die Variable a kann dabei immer nur entweder mit 0 oder mit L belegt sein. Mittels Wertetabelle ermitteln wir die Lösungen, zunächst für $a \cdot a$ und $a + a$:

a	a	$a \cdot a$	$a + a$
0	0	0	0
L	L	L	L

Beide Funktionen haben denselben Werteverlauf wie die Variable selbst, also gilt in der logischen Algebra:

$$a \cdot a = a \text{ (»}a \text{ und } a \text{ gleich } a\text{«)},$$

$$a + a = a \text{ (»}a \text{ oder } a \text{ gleich } a\text{«)}.$$

Für die Verknüpfung negierter und nichtnegierter gleicher Variablen ergibt sich nach der Wertetabelle:

a	\bar{a}	$a \cdot \bar{a}$	$a + \bar{a}$
0	L	0	L
L	0	0	L

$$a \cdot \bar{a} = 0 \text{ (»}a \text{ und } \bar{a} \text{ gleich null«)},$$

$$a + \bar{a} = L \text{ (»}a \text{ oder } \bar{a} \text{ gleich eins«)}.$$

Im folgenden Beispiel wird der Unterschied zwischen *mathematischer* und *logischer* Algebra recht deutlich:

$$\begin{aligned} (a + \bar{b}) \cdot (\bar{a} + b) &= \underbrace{a \cdot \bar{a}} + a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{b} + \underbrace{b \cdot \bar{b}} \\ &= 0 \qquad \qquad \qquad = 0 \\ &= a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{b}. \end{aligned}$$

Halbleiter-Bauelemente in Logikschaltungen

Nach der Theorie nun wieder zurück zur Praxis! Bild 268 zeigt vier einfache digitale Grundschaltungen, die wir auf kleinen Brettchen nach Bild 269 aufbauen. Die Durchmesser der Bohrungen hängen von den dort einzunietenden Lötösen ab. E_1, A_1 und

Bild 268. Unsere logischen Elementarschaltungen mit Halbleiterbauelementen

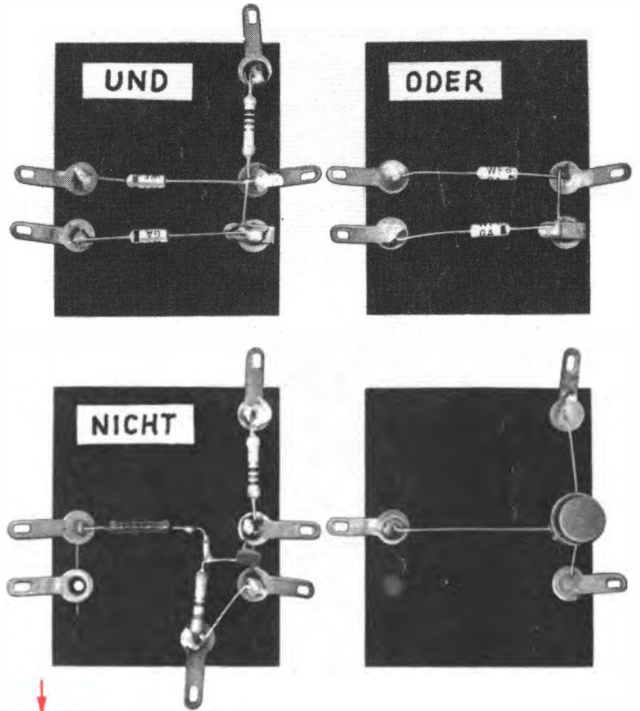
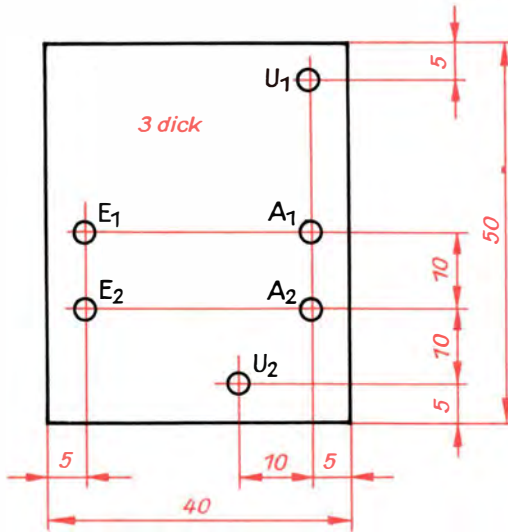


Bild 269. Grundbrettchen für logische Elementarschaltungen



A₂ bohren wir gleich gemeinsam in alle Brettchen, die übrigen je nach Bedarf. Bild 270 zeigt die Schaltung der Konjunktion. Zwischen den Ösen in E₁ und A₁ sowie E₂ und A₂ ist je eine Diode (s. Tabelle 2) einzulöten, zwischen A₁ und U₁ ein Schichtwiderstand von 1 kΩ. Seine Belastbarkeit beträgt –

wie die aller noch folgenden Widerstände – 0,1 W. E₁ und E₂ sind die Eingänge der Konjunktion, A₁ und A₂ – mit einer Drahtbrücke verbunden – bilden den Ausgang A.

Nun ist eine weitere Zuordnung in der Reihenfolge Aussagenlogik – mathematische Logik – technische Logik notwendig: die Ziffern 0 und L sind durch *Spannungswerte* darzustellen. In Anlehnung an Bild 261 b (digitales Signal) legen wir fest:

- 0 → niedrigste Spannung ($U_0 = 0\text{ V}$),
- L → höchste Spannung ($U_L = 4,5\text{ V}$).

Zu diesem Zweck löten wir an die Flachbatterie zwei bewegliche isolierte Drähte mit Steckern und Krokodilklemmen. Der mit dem Minuspol (der Masse) verbundene wird mit »0« gekennzeichnet, der am Pluspol liegende mit »L«. Nun überprüfen wir die Wertetabelle der Konjunktion.

Versuch 1:

- a) S ist geöffnet. E₁ und E₂ werden untereinander und mit der »0«-Leitung verbunden, S schließen. Ergebnis: Der Spannungsmesser zeigt $U = 0,4\text{ V}$ an. S wieder öffnen. Laut Wertetabelle muß die gemessene Spannung noch als »0« aufgefaßt werden.

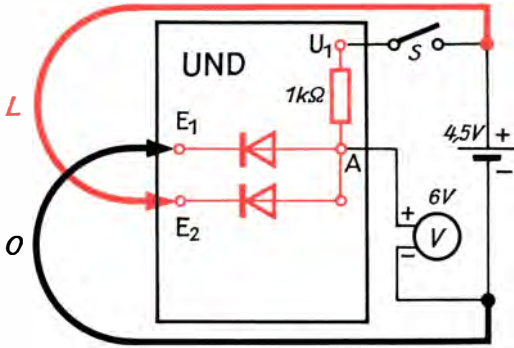


Bild 270. Schaltung der Konjunktion (UND-Schaltung)

b) An E_1 »0« und an E_2 »L« anlegen (genau wie im Bild 270). S schließen, Spannung ablesen, S öffnen.

Ergebnis: Die Ausgangsspannung beträgt $U = 0,6\text{V}$.

c) Belegungen an E_1 und E_2 vertauschen, b) wiederholen.

Ergebnis: wie bei b).

d) E_1 und E_2 verbinden, »L« anlegen, S schließen.

Ergebnis: Wir messen $U_L = 4,5\text{V}$ am Ausgang.

In einer Tabelle stellen wir das Versuchsergebnis zusammen:

E_1	E_2	U_A in V	Wert
0	0	0,4	0
0	L	0,6	0
L	0	0,6	0
L	L	4,5	L

Wie der Versuch zeigt, muß die Zuordnung der logischen Werte zu den Spannungen präzisiert werden. Für den Wert »0« ist ein Spannungsbereich notwendig. Aus Sicherheitsgründen einigen wir uns auf den Bereich $U_0 = 0 \dots 1\text{V}$.

Versuch 2:

Wir schalten an Stelle des Spannungsmessers ein Glühlämpchen $3,8\text{V}/0,07\text{A}$ (im Lampenbrett) an den Ausgang der UND-Schaltung und wiederholen Versuch 1.

Ergebnis: In allen vier Fällen bleibt das Lämpchen dunkel.

Überlegen wir: Der Lampenwiderstand beträgt

$$R = \frac{3,8\text{V}}{0,07\text{A}} = 54,3\Omega.$$

Waren im Versuch 1 beide Eingänge mit »L« belegt, lagen am Ausgang $4,5\text{V}$. Jetzt bilden der $1\text{-k}\Omega$ -Widerstand und der Lampenwiderstand eine Reihenschaltung, an der $4,5\text{V}$ anliegen. Der Gesamtwiderstand beträgt $\approx 1050\Omega$;

$$\text{es fließt ein Strom von } I = \frac{4,5\text{V}}{1050\Omega} = 4,29\text{mA}.$$

Am $1\text{-k}\Omega$ -Widerstand fallen $U_1 = 1\text{k}\Omega \cdot 4,29\text{mA} = 4,29\text{V}$ ab; die restlichen $0,21\text{V}$ reichen nicht zum Betrieb der Glühlampe. Wir benötigen deshalb eine Zusatzschaltung, an deren Ausgang die Glühlampe betrieben wird und deren Eingangswiderstand beträchtlich größer als der Lampenwiderstand ist. Dazu eignet sich die Kollektorschaltung (vgl. auch Bild 207b):

Angenommen, Transistor T (Bild 271) hat eine Gleichstromverstärkung $B = 100$, dann reicht ein

$$\text{Basisstrom } I_B = \frac{I_C}{B} = \frac{0,07\text{A}}{100} = 0,7\text{mA} \text{ zum Be-}$$

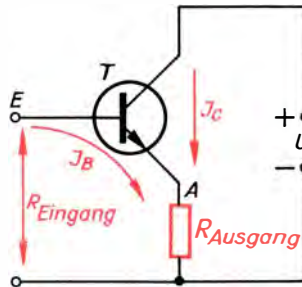
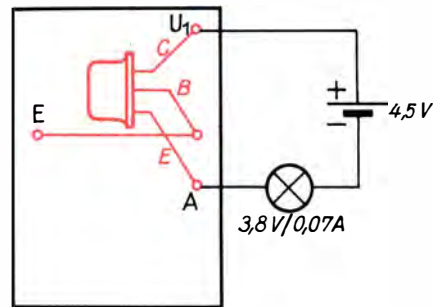


Bild 271. Kollektorschaltung als Widerstandswandler

Bild 272. Schaltung des Lampenstromverstärkers



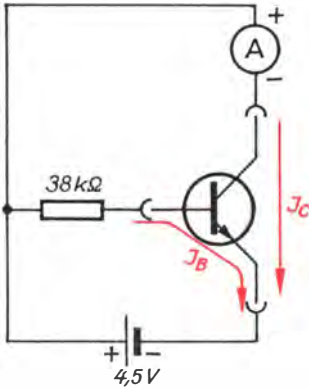


Bild 273. Messen der Gleichstromverstärkung von Transistoren

trieb der Lampe am Emitter aus. Über dem 1-kΩ-Widerstand fallen nur noch $U_1 = 1\text{ k}\Omega \cdot 0,7\text{ mA} = 0,7\text{ V}$ ab, am Eingang der Kollektorschaltung liegen $4,5\text{ V} - 0,7\text{ V} = 3,8\text{ V}$. Mit dem Basisstrom von $0,7\text{ mA}$ entspricht das einem Eingangswiderstand von $R = \frac{3,8\text{ V}}{0,7\text{ mA}} = 5,43\text{ k}\Omega$.

Wir halten fest: *Der Eingangswiderstand einer Kollektorschaltung ist B-mal größer als der Lastwiderstand am Ausgang.*

Bild 272 zeigt den Aufbau des *Lampenstromverstärkers*. Der Si-Transistor T (s. Tabelle 2) muß mindestens für 100 mA Kollektorstrom und 200 mW Verlustleistung ausgelegt sein und sollte eine Stromverstärkung von etwa 100 haben.

Da wir für die folgenden Experimente eine ganze Reihe von Dioden und Transistoren benötigen, kaufen wir gleich alle in Tabelle 2, Spalte »Logische Schaltungen«, genannten Typen gemeinsam ein.

Die Kenntnis der Stromverstärkung der Transistoren ist nicht nur für den Lampenstromverstärker wichtig; wir messen deshalb alle Transistoren aus. Dazu dient die Schaltung im Bild 273. Für das Anklebmen der Miniplasttransistoren kaufen wir einige Transistorfassungen, an deren Fahnen kurze Drahtstücke angelötet werden. Damit wir nur den *Kollektorstrom* und nicht auch noch den Basisstrom zu messen brauchen, muß ein – uns bekannter – Basisstrom fließen, z. B. $0,1\text{ mA}$. Von der Aufnahme der Kennlinien wissen wir, daß bei Silizium-Transistoren die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} etwa

$0,7\text{ V}$ betragen muß, wenn ein Kollektorstrom zwischen 1 mA und 10 mA fließen soll. Wir gewinnen U_{BE} – wie bei unseren NF-Verstärkern – aus der Betriebsspannung $4,5\text{ V}$ (Flachbatterie); der Vorwiderstand muß daher $4,5\text{ V} - 0,7\text{ V} = 3,8\text{ V}$ »schlucken« und für $I_B = 0,1\text{ mA}$ $R = \frac{3,8\text{ V}}{0,1\text{ mA}} = 38\text{ k}\Omega$ betragen. Zeigt der Strommesser beispielsweise $I_C = 7,5\text{ mA}$ an, so ist die Stromverstärkung $B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{7,5\text{ mA}}{0,1\text{ mA}} = 75$. Es genügt also,

den Kollektorstrom (in mA) mit 100 zu multiplizieren, um B zu ermitteln. Wir bereiten sechs Tütchen mit Aufschriften nach folgendem Muster vor

- Tüte 1: $B < 50$
- Tüte 2: $50 < B < 75$
- Tüte 3: $75 < B < 100$
- Tüte 4: $100 < B < 150$
- Tüte 5: $150 < B < 200$
- Tüte 6: $B > 200$

und stecken die ausgemessenen Transistoren in die zugehörige Tüte. Dann geht es später schneller.

Versuch 3:

Wir schalten nach Bild 274 den Lampenstrom-

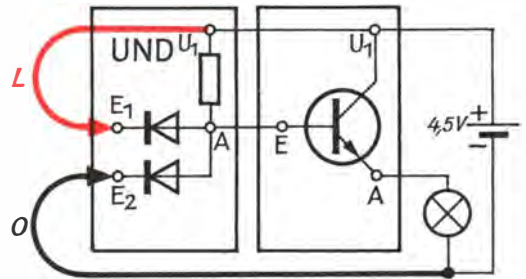
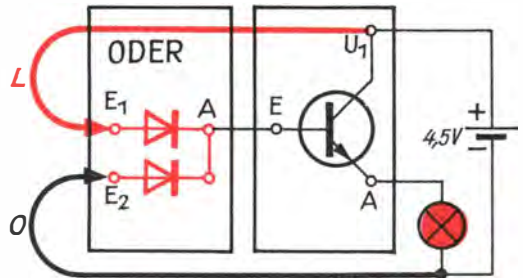


Bild 274. UND-Schaltung mit Lampenstromverstärker

Bild 275. ODER-Schaltung mit Lampenstromverstärker



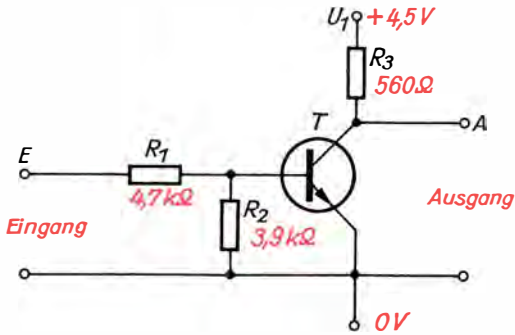


Bild 276. Schaltbild des Negators

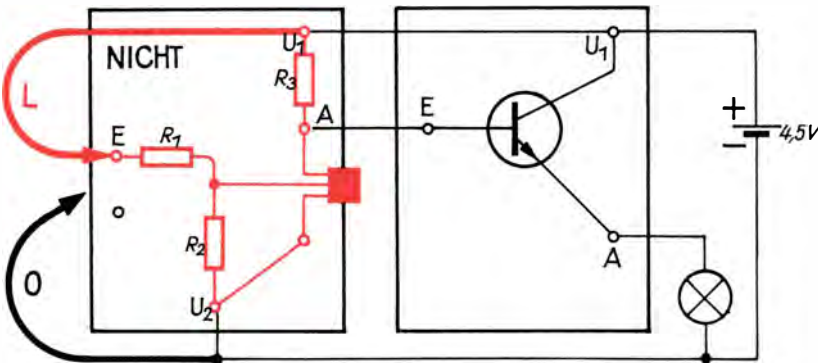
verstärker zwischen UND-Schaltung und Lampe und wiederholen Versuch 2.

Ergebnis: Die Lampe leuchtet nur dann, wenn beide Eingänge mit »L« belegt sind.

Die Disjunktion (ODER-Schaltung) bauen wir nach Bild 275 auf und schließen zur Kontrolle der Wertetabelle gleich den Lampenstromverstärker an. Das Ergebnis lautet in Tabellenform:

E_1	E_2	A Lampe	Wert
0	0	dunkel	0
0	L	hell	L
L	0	hell	L
L	L	hell	L

Bild 277. Negator mit Lampenstromverstärker



Während für Konjunktion und Disjunktion allein schon Dioden (und Widerstände) reichen, wird für die Negation ein Transistor gebraucht. Wir bauen die NICHT-Schaltung (Negator) nach Bild 276 auf einem Brettchen entsprechend Bild 277 auf; für T verwenden wir einen Miniplasttransistor aus unserer Tüte 2 ($B = 50 \dots 75$).

Das Versuchsergebnis wird wieder in einer Tabelle zusammengefaßt:

E	A Lampe	Wert
0	hell	L
L	dunkel	0

Eine logische Elementarschaltung muß auch fähig sein, weitere Schaltungen »anzutreiben«. Wir ersetzen diese zunächst durch einen 2-kΩ-Widerstand am Negatorausgang (zwischen A und U_2 , also parallel zum Eingang des Lampenstromverstärkers); den Negatoreingang belegen wir mit »0«. Sofort nimmt die Helligkeit der Lampe ab. Wir messen die Ausgangsspannung und lesen nur noch etwa 3 V ab. Diese Spannung muß aber von den nachfolgenden Schaltungen noch eindeutig als »L« erkannt werden. Deshalb ist eine zweite, letzte Präzisierung der Zuordnung zwischen logischen Werten und Spannungen erforderlich:

$$U_0 = 0 \dots 1 \text{ V,}$$

$$U_L = 2,5 \dots 4,5 \text{ V.}$$

Im Bild 278 sind diese beiden Spannungsbereiche dargestellt. Spannungen zwischen 1 V und 2,5 V sind verboten; unsere logische Schaltung kann sie

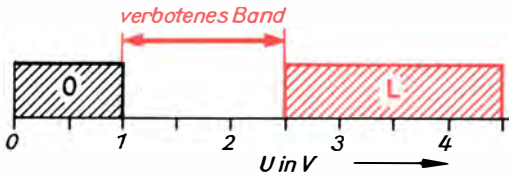


Bild 278. Spannungsbereiche für 0 und L

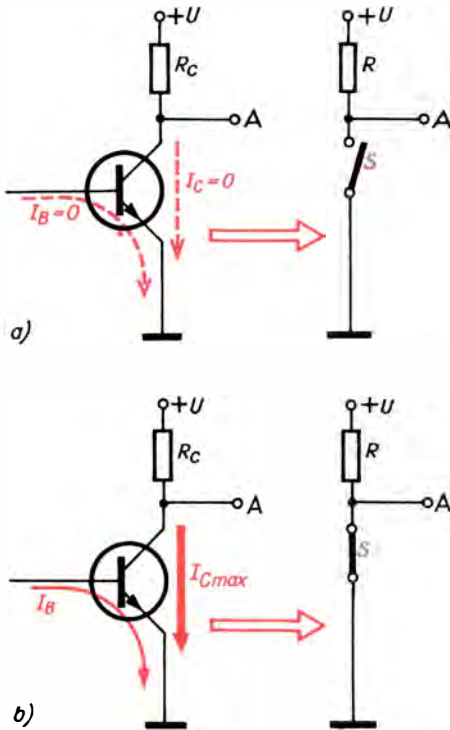


Bild 279. Negator-Transistor als elektronischer Schalter

nicht erkennen und deshalb auch keine eindeutige Ausgangsspannung liefern.

Im Unterschied zur »Schalterlogik« werden die Dioden und Transistoren der *Dioden-Transistor-Logik* (DTL) mit Spannungen bzw. Strömen gesteuert. Sie üben aber ebenfalls Schalterfunktionen aus. Eine in Durchlaßrichtung betriebene Diode wirkt wie ein geschlossener Schalter, in Sperrichtung gepolt wie ein geöffneter. Auch der (Negator-) Transistor arbeitet nach dem Schalterprinzip. Liegt

am Eingang der Schaltung nach Bild 276 eine Spannung im »0«-Bereich, sorgt die Widerstandskombination R_1/R_2 dafür, daß noch kein Basisstrom und damit auch kein Kollektorstrom fließt. Der Transistor wirkt wie ein geöffneter Schalter (Bild 279a). Am Ausgang A liegt die volle Betriebsspannung.

Mit der niedrigsten Spannung des »L«-Bereiches am Eingang, also mit 2,5 V, muß ein Kollektorstrom erzeugt werden, der nur noch vom Kollektorwiderstand begrenzt wird. Er beträgt in unserem Fall $I_{Cmax} = \frac{4,5\text{ V}}{560\ \Omega} \approx 8\text{ mA}$. Gleichzeitig müssen R_1 und R_2 verhindern, daß bei 4,5 V am Eingang der Basisstrom unzulässig groß wird. In diesem Zustand entspricht der Transistor einem geschlossenen Schalter (Bild 279b). Am Ausgang A liegt die geringe Kollektorrestspannung von etwa 0,2 V.

Kombinationen der Elementarschaltungen

Wir schalten nach Bild 280 an den Ausgang der UND-Schaltung den Negator und daran Lampenstromverstärker und Lampe. Langsam gewöhnen wir uns auch an die neuen Symbole der logischen Schaltungen; später entfällt zusätzlich noch die Angabe der Betriebsspannung. Wir belegen jeweils bei geöffnetem Schalter S die Eingänge mit den vier Möglichkeiten und erhalten folgende Werte:

E_1	E_2	A
0	0	L
0	L	L
L	0	L
L	L	0

Der Werteverlauf dieser UND-NICHT-Kombination ist die genaue Umkehrung der Konjunktion. Sie wird als NAND-Schaltung bezeichnet (aus *not and* entstanden; engl. not: nicht, and: und), und ist eine technisch sehr wichtige Grundschaltung. Ihre Funktion lautet $A = \overline{E_1 \cdot E_2}$, bzw. mit den Variablen a und b , $A = \overline{a \cdot b}$ (»A gleich a und b, beide nicht«). Auch in dieser Schreibweise kommt die negierte Konjunktion zum Ausdruck.

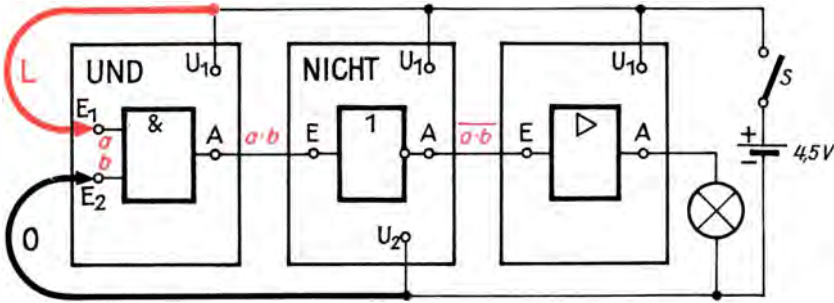


Bild 280. Versuchsaufbau zur NAND-Schaltung

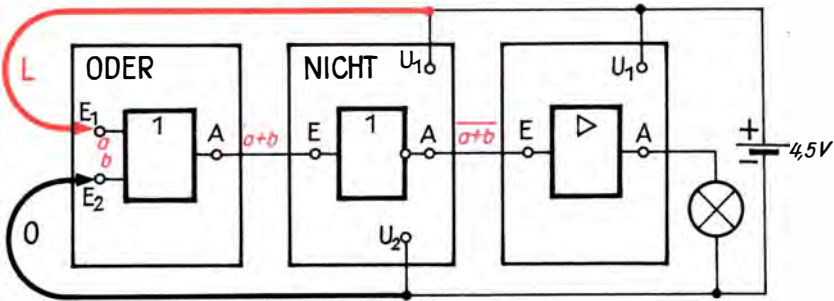


Bild 281. Versuchsaufbau zur NOR-Schaltung

Ähnliches gilt für die ODER-NICHT-Kombination nach Bild 281, deren Werte gerade umgekehrt zur Disjunktion verlaufen:

E_1	E_2	A
0	0	L
0	L	0
L	0	0
L	L	0

Sie heißt NOR-Schaltung (aus *not or* entstanden; engl. or: oder). Wir werden auf sie zurückkommen. Die Funktion lautet $A = E_1 + E_2$ bzw. $A = a + b$.

Ebenso wie die Ausgangssignale negiert werden können, ist dies auch bei den Eingangssignalen möglich. Dazu schalten wir den Negator nach Bild 282 vor den Eingang E_1 der UND-Schaltung. Die neuen Eingänge dieser Kombination sind nun der

Negatoreingang E und der Eingang E_2 der UND-Schaltung. Mit diesem Versuch und dem folgenden lernen wir ein weiteres, sehr wichtiges Gesetz der logischen Algebra kennen. Wir ermitteln in der bereits bekannten Art den Werteverlauf der Funktion $\bar{a} \cdot b$. Dann vertauschen wir entsprechend Bild 283 die UND-Schaltung mit der ODER-Schaltung, legen den Negator an E_2 der ODER-Schaltung und halten den Werteverlauf für $a + b$ fest. Für beide Werteverläufe reicht eine Tabelle:

a	b	$\bar{a} \cdot b$	$a + \bar{b}$
0	0	0	L
0	L	L	0
L	0	0	L
L	L	0	L

Beim zeilenweisen Vergleich beider Ausgangswerte stellen wir fest, daß die eine Funktion die Umkehrung (Negation) der anderen sein muß; es gilt also:

$$\bar{\bar{a} \cdot b} = a + \bar{b}$$

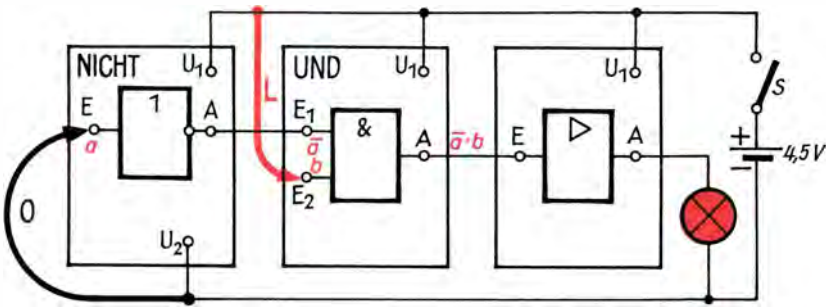


Bild 282. UND-Schaltung mit einem Eingangsnegator

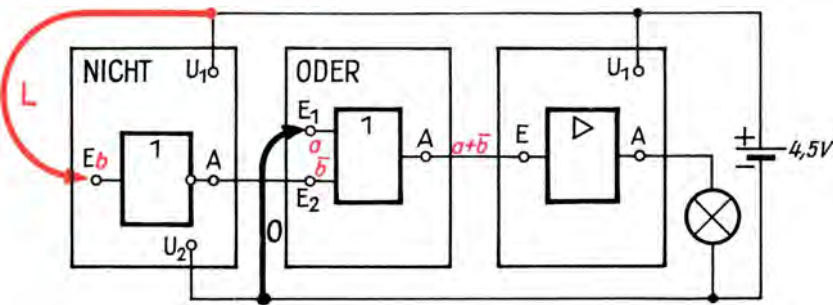


Bild 283. ODER-Schaltung mit einem Eingangsnegator

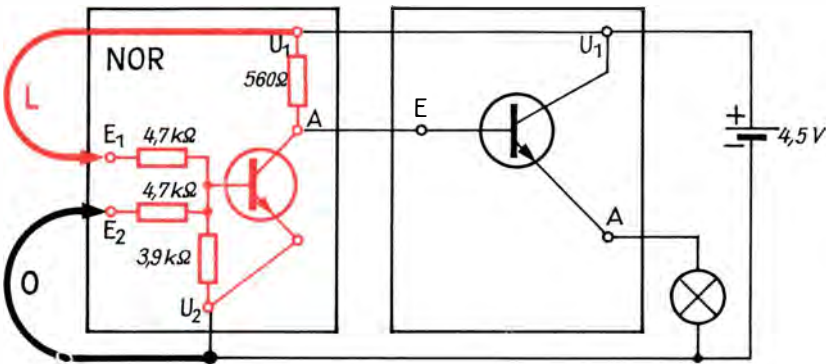


Bild 284. Erweiterung des Negators zur NOR-Schaltung

dann genau mit dem von $a + \bar{b}$ nach Bild 283 überein.

Diese Behauptung läßt sich sehr schnell beweisen, indem zwischen UND-Schaltung und Lampenstromverstärker nach Bild 282 noch ein Negator eingebaut wird. Der Werteverlauf von $\bar{a} \cdot \bar{b}$ stimmt

Daraus kann die Vorschrift für das *Invertieren* (Umkehren, Negieren) einer Funktion abgeleitet werden. Wir sehen, daß aus der Konjunktion eine Disjunktion entsteht und daß die Variablen negiert werden. Bei bereits negierten Variablen führt die

zweite Negation zur Beseitigung der Negation. Das ist ganz logisch, denn es muß

$\overline{\overline{a}} = a$
sein.

Allgemein lautet der *Inversionssatz*:

Eine Funktion wird invertiert, indem alle Konjunktionen durch Disjunktionen, alle Disjunktionen durch Konjunktionen ersetzt und alle Variablen negiert werden (bei bereits negierten wird die Negation aufgehoben).

Dieser Satz führt, auf die NAND- und die NOR-Funktion übertragen, zu den Lösungen

$$\overline{a \cdot b} = \overline{a} + \overline{b} \text{ bzw.}$$

$$\overline{\overline{a} + \overline{b}} = \overline{\overline{a}} \cdot \overline{\overline{b}}.$$

Die Dioden-Transistor-Logik (DTL) hat einen Nachteil: Bei der Kombination der einzelnen Elementarschaltungen muß die Reihenfolge UND-ODER-NICHT eingehalten werden. Nach zwei Diodenschaltungen ist unbedingt ein *Signalverstärker* in Form eines Negators erforderlich. Deshalb ist es vorteilhafter, alle Elementarschaltungen von vornherein mit »aktiven« Bauelementen, also Transistoren, zu bestücken. Die geeigneten Grundschaltungen kennen wir bereits: NAND- oder NOR-Schaltungen. Während die Technik den Weg der NAND-Schaltungen in Form der *Transistor-Transistor-Logik* (TTL) geht, wenden wir uns den NOR-Schaltungen in Form der *Widerstands-Transistor-Logik* (RTL) zu.

Wir löten nach Bild 284 auf ein Negatorbrettchen zwischen den noch freien Eingang E_2 und die Verbindungsstelle von R_1 und R_2 an der Transistorbasis einen vierten Widerstand $R_4 = R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$. Bei Aufnahme der Wertetabelle stellen wir fest, daß die erweiterte Negatorschaltung den gleichen Werteverlauf wie die ODER-NICHT-Schaltung (Bild 281) hat. Mit solchen RTL-NOR-Schaltungen wollen wir nun ein Logik-Experimentiergerät aufbauen. Wir werden feststellen, daß sich allein mit diesen Grundschaltungen auch die Konjunktion und die Disjunktion verwirklichen lassen. Soll ein NOR-Glied als Negator dienen, bleibt einfach ein Eingang frei.

Im Bild 285 sind die für uns wichtigen Schaltzeichen der logischen Elementarschaltungen zusammengestellt; prägen wir sie uns gut ein!

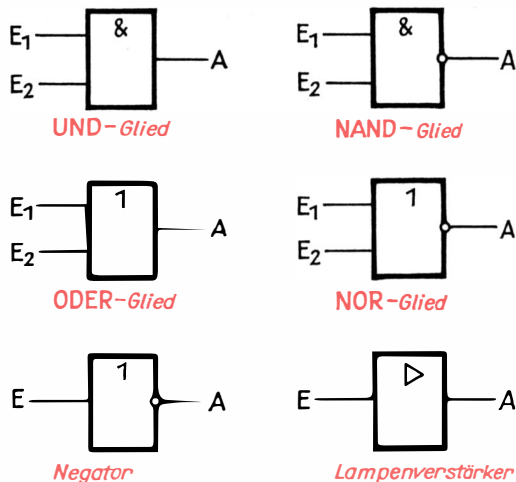


Bild 285. Symbole von logischen Elementarschaltungen

Wir bauen ein Logik-Experimentiergerät

Bild 286 zeigt die Draufsicht, wir erkennen die Schaltzeichen von sechs NOR-Schaltungen, von denen je zwei untereinander angeordnet sind. Jedes NOR-Glied entspricht der Schaltung im Bild 284. An den Ausgängen der oberen drei Schaltungen sind Glühlampen sichtbar. Sie zeigen an, ob »0« oder »L« am jeweiligen Ausgang liegt. Neu ist bei jedem NOR-Glied ein dritter Eingang, der direkt zur Basis des Transistors führt. *An diesen darf kein übliches 0-L-Signal gelegt werden!*

Die Maße für das *Grundbrett* aus Hartpapier entnehmen wir Bild 287. Vor dem Bohren sind die Schaltungssymbole aufzutragen. Am einfachsten ist es, weißen Zeichenkarton mit Alleskleber aufzuleimen und dann mit schwarzer Tusche die Symbole zu zeichnen. Vor dem Kleben muß jedoch die Hartpapierplatte einseitig aufgeraut werden; wir schleifen sie am besten mit Sandpapier ab. Zum gleichmäßigen Andrücken des Kartons eignet sich gut ein Rollenquetscher. Wenn nach etwa einer Stunde der Kleber getrocknet ist, bohren wir die acht im Bild 287 gekennzeichneten 6-mm-Löcher. Für alle übrigen Bohrungen verwenden wir eine Schablone

Bild 286. Unser Logik-Experimentiergerät

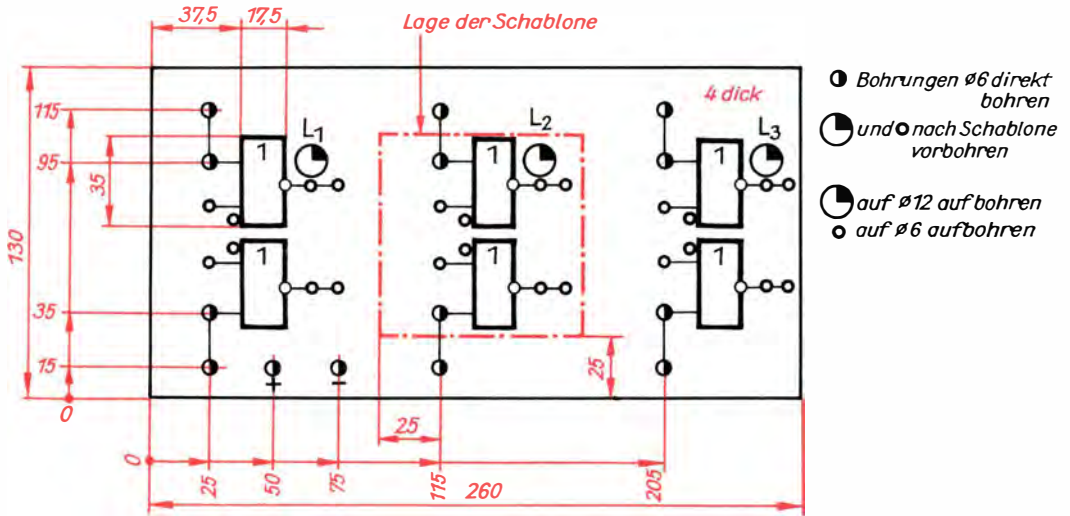
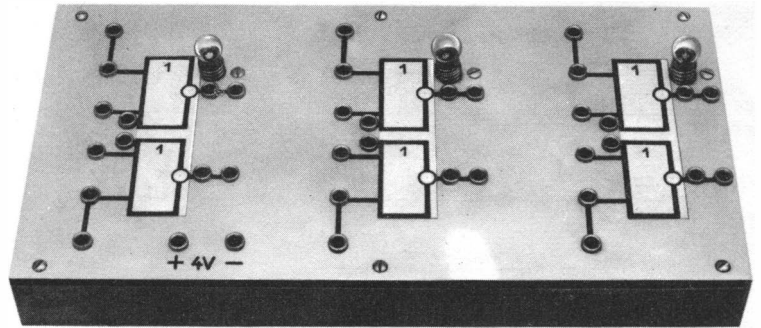


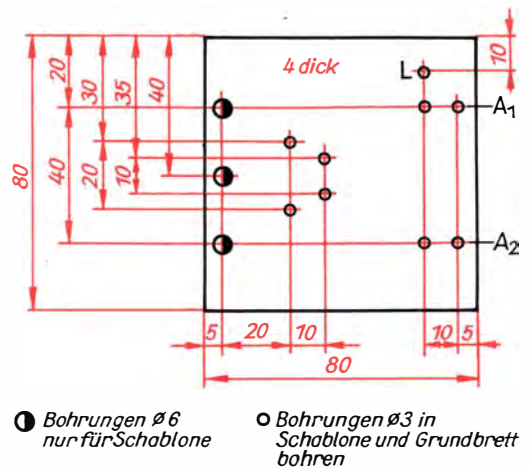
Bild 287. Grundbrett des Logik-Experimentiergerätes

Bild 288. Bohrschablone

nach Bild 288 aus Hartpapier. Aus Bild 287 geht auch hervor, wie die Schablone auf dem Grundbrett auszurichten ist. Zum Festklemmen verwenden wir zwei Spannzwingen. Nach dem Bohren der dreimal neun 3-mm-Löcher in das Grundbrett sind diese auf folgende Durchmesser aufzubohren: L₁, L₂ und L₃ auf 12 mm, alle übrigen 24 auf 6 mm.

Anschließend fertigen wir noch zwei Kopien der Bohrschablone an, die wir ebenfalls nach ihr bohren. Damit ist gesichert, daß die drei Schablonenplatten später als Steckbretter genau auf das Grundbrett passen. Wir legen sie zunächst beiseite.

In die 6-mm-Bohrungen des Grundbrettes schrauben wir Telefonbuchsen ein; 38 Stück sind notwendig. Die drei 12-mm-Bohrungen sind zum



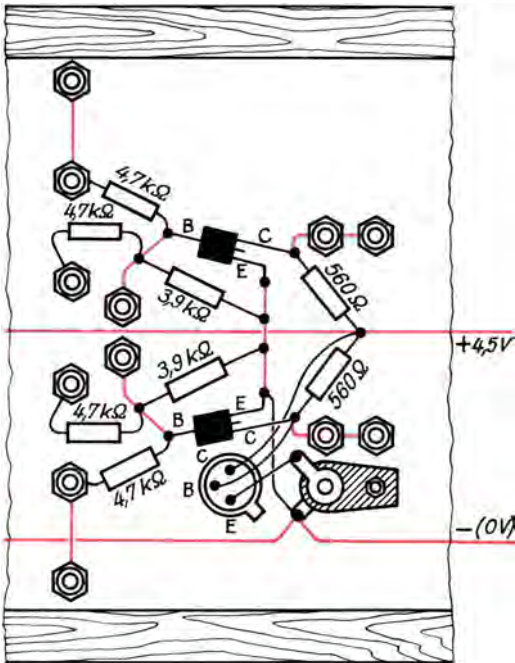


Bild 289. Verdrahtung zweier NOR-Glieder

Durchstecken von je einer Glühlampenfassung gedacht, die rückseitig mit dem Grundbrett verschraubt wird. Nun folgt die Verdrahtung. Wir brauchen:

- 6 Si-Miniplasttransistoren aus unserer Tüte 2 ($50 < B < 75$),
- 3 Si-Transistoren im Metallgehäuse aus unserer Tüte 4 ($100 < B < 150$),

- 12 Widerstände $4,7\text{ k}\Omega$,
- 6 Widerstände $3,9\text{ k}\Omega$,
- 6 Widerstände $560\ \Omega$,
- 1 Elektrolytkondensator $100\ \mu\text{F}/10\text{ V}$,
- 3 Glühlampen $3,8\text{ V}/0,07\text{ A}$.

Den Teilverdrahtungsplan für zwei benachbarte NOR-Glieder auf der Brettunterseite enthält Bild 289. Bild 290 zeigt eine Ansicht der Gesamtverdrahtung. Am linken NOR-Paar erkennen wir den Elektrolytkondensator. Er hat die Aufgabe, mögliche Verkopplungen über die Speiseleitungen der Betriebsspannung zu unterdrücken. Sein Pluspol liegt an der Verbindungsstelle der beiden $560\text{-}\Omega$ -Widerstände, der Minuspol an der Lampenfassung in L_1 . Von diesen beiden Punkten geht je eine kurze Leitung zu den auf der Brettobenseite mit + und – gekennzeichneten Buchsen. Hier schließen wir für die Funktionsprüfung eine Flachbatterie ($4,5\text{ V}$) an. Bei freien Eingängen müssen alle drei Lampen leuchten. An den unteren drei NOR-Gliedern messen wir die Ausgangsspannungen; dabei liegt der Pluspol des Spannungsmessers an einer Ausgangsbuchse, der Minuspol am Minuspol der Batterie. Die Spannungen müssen bei $U_L \approx 4,5\text{ V}$ liegen. Dann verbinden wir der Reihe nach jeden Eingang – *ausgenommen davon sind die direkten Basiseingänge!* – einzeln mit dem Batteriepluspol, das entspricht dem Anlegen eines »L«-Signals. Dabei muß die betreffende Lampe verlöschen bzw. die Spannung auf $U_0 \approx 0,2\text{ V}$ zurückgehen.

Nach erfolgreicher Funktionskontrolle folgen die ersten Experimente: Wir schließen an den Ausgang eines NOR-Gliedes ein zweites an (Bild 291); die Glühlampen L_1 und L_3 drehen wir lose, damit uns

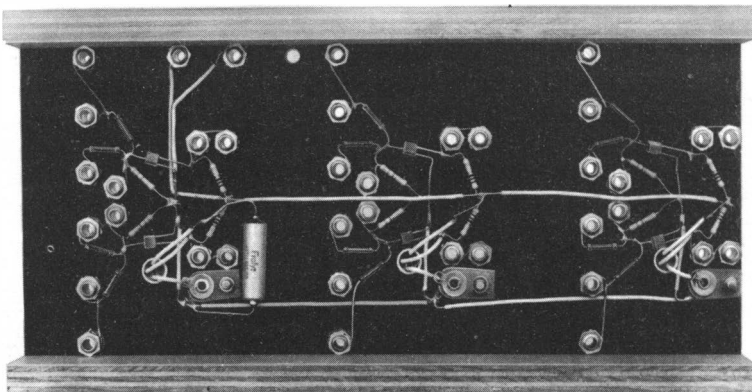


Bild 290. Blick in die Verdrahtung des Experimentiergerätes

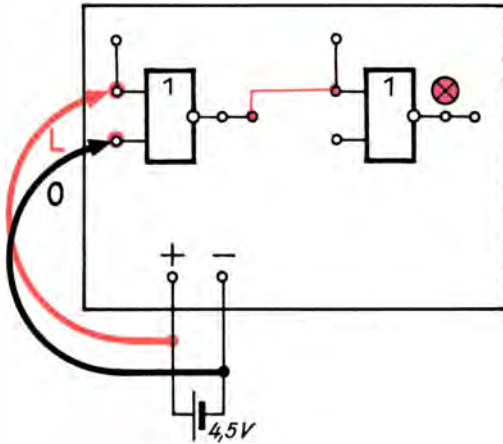


Bild 291. Verwirklichung der ODER-Funktion durch NOR-Glieder

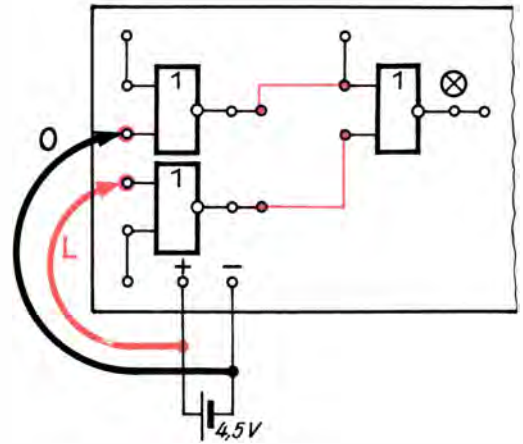


Bild 292. Verwirklichung der UND-Funktion durch NOR-Glieder

ihre Anzeige nicht stört. In der bekannten Art belegen wir die Eingänge des ersten NOR-Gliedes mit den vier 0-L-Kombinationen, halten den Werteverlauf fest und ermitteln – falls wir die Wertetabellen nicht mittlerweile auswendig wissen –, welcher uns bekannten Funktion der Werteverlauf entspricht. Es handelt sich um die Disjunktion, d. h., mit zwei NOR-Gliedern läßt sich die ODER-Funktion verwirklichen.

Anschließend schalten wir nach Bild 292 zwei NOR-Glieder vor ein drittes, wiederholen den Versuch und erhalten den Werteverlauf der Konjunktion. Für die UND-Funktion werden also drei NOR-Glieder gebraucht.

Damit haben wir nachgewiesen, daß sich allein mit NOR-Schaltungen die grundlegenden logischen Funktionen verwirklichen lassen. (Für die Standardisierung ist das sehr wichtig.) Nun noch zwei Beispiele für die Steuerung – diesmal mit logischen Schaltungen.

Modell einer Alarmanlage

Wir wollen einen Raum mit einer Tür und einem Fenster gegen unbefugtes Betreten absichern. Sobald Fenster *oder* Tür – oder auch beide gleichzeitig – bei eingeschalteter Alarmanlage geöffnet werden, soll Alarm ausgelöst werden. Wir

begnügen uns hier mit dem Aufleuchten einer Signallampe und vereinbaren:

Die Tür ist geschlossen: a .

Das Fenster ist geschlossen: b .

Alarm: A .

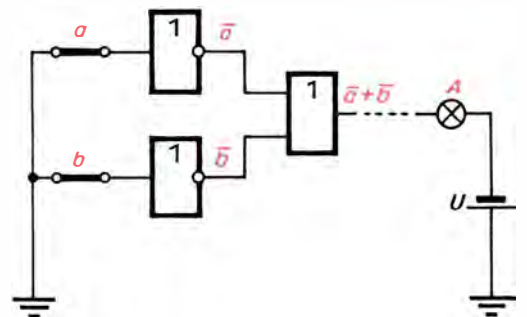
Die logische Funktion lautet dann

$$A = a + \bar{b}$$

(»Alarm bei Tür nicht geschlossen *oder* Fenster nicht geschlossen«).

Fenster und Tür versehen wir mit Schaltern, die sich beim Öffnen ebenfalls öffnen. Das Prinzip der Schaltung zeigt Bild 293. Da unser Experimentiergerät nur NOR-Schaltungen enthält, muß das ODER-Glied durch zwei NOR-Glieder verwirklicht

Bild 293. Prinzip der Alarmanlage



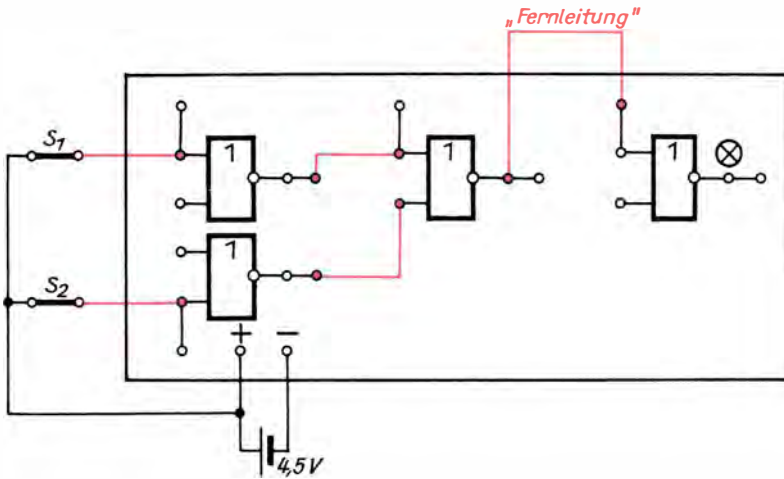


Bild 294. Modellschaltung der Alarmanlage

werden (Bild 291). Das hat übrigens noch einen wesentlichen Vorteil: Wenn in der Schaltung die Leitung vom ODER-Glied zur Signallampe unterbrochen wird, fällt die Anlage aus. Ordnen wir jedoch nach Bild 294 das zweite für die ODER-Funktion notwendige NOR-Glied direkt bei der Signallampe an, wird auch die Unterbrechung der Fernleitung signalisiert.

Modell einer Zugsteuerung

Für Modelleisenbahner ist folgendes Problem nicht neu: Zwei Züge auf den Gleisen A und B sollen beide – *aber niemals gleichzeitig!* – auf das gemeinsame Gleis C fahren können. Mit einem Schalter a wird der Zug auf Gleis A , mit dem Schalter b der auf Gleis B in Gang gesetzt. Werden irrtümlicherweise *beide* Schalter betätigt, müssen *beide* Züge *stehenbleiben*.

Zum Entwickeln der entsprechenden Steuerschaltung stellen wir zunächst eine Wertetabelle auf. Es gilt:

- Schalter geschlossen: L,
- Schalter geöffnet: 0,
- Spannung am Gleis: L,
- spannungslos: 0.

Aus der Tabelle sind nun die logischen Funktionen für A , B und C abzulesen. Wir betrachten

zu diesem Zweck jeweils *die* Zeilen, in denen für A , B oder C »L« steht; bei A also die 3. Zeile. Hier lautet die Funktion $A = a \cdot \bar{b}$, weil a mit L und b mit 0 belegt ist. Entsprechend gilt $B = \bar{a} \cdot b$. Steht in mehreren Zeilen »L« (bei C in der 2. und 3. Zeile), sind die Zeilenkonjunktionen *disjunktiv* zu verknüpfen:

$$C = a \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot b.$$

Wir entwickeln die Schaltung »von hinten nach vorn«; der erste Schritt ist aus Bild 295a ersichtlich. Für $a \cdot \bar{b}$ sowie $\bar{a} \cdot b$ sind zwei UND-Glieder erforderlich (zweiter Schritt, siehe Bild 295b). Zum Schluß bauen wir noch je einen Negator für \bar{a} und \bar{b} (Bild 295c) ein. Die Schaltung ist nun zwar fertig, paßt aber noch nicht für unser Logik-Experimentiergerät. Deshalb sind die beiden UND-Glieder (nach Bild 292) und das ODER-Glied (nach Bild 291) durch NOR-Glieder zu ersetzen. So entsteht die Schaltung nach Bild 295d. Hier sind nun an zwei Stellen zwei Negatoren hintereinander geschaltet (mit gestrichelter Linie umrandet). Sie können entfallen, da die jeweils zweite Negation die erste

Schalter		Gleise		
a	b	A	B	C
0	0	0	0	0
0	L	0	L	L
L	0	L	0	L
L	L	0	0	0

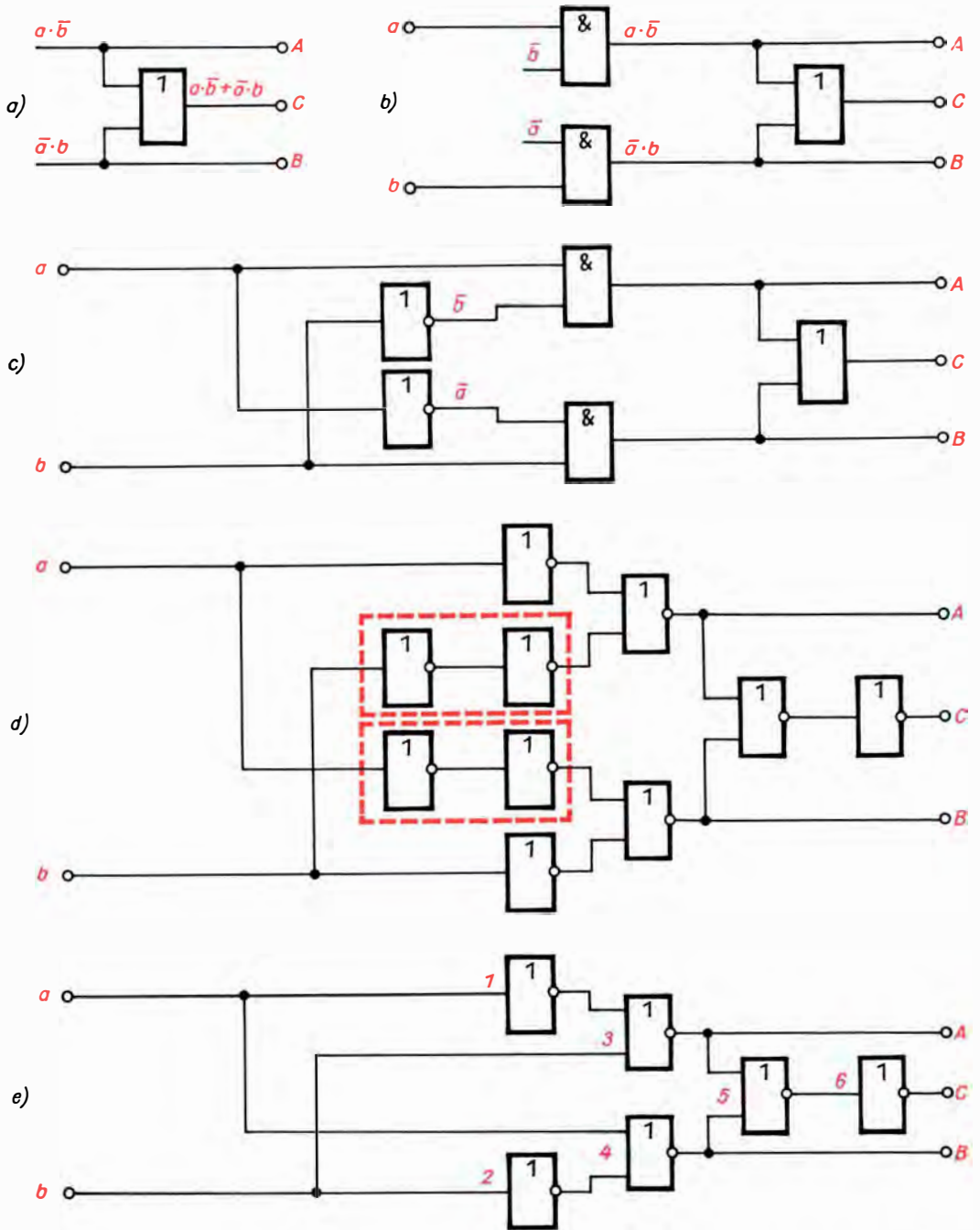
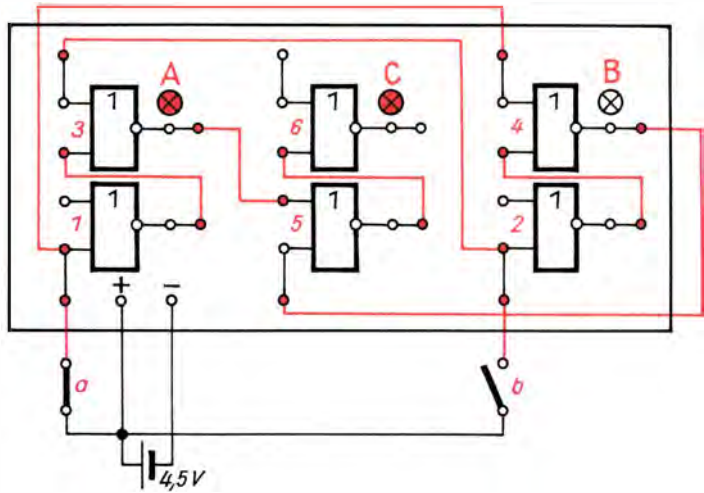


Bild 295. Entwicklung der Schaltung für die Zugsteuerung

Bild 296. Modellschaltung der Zugsteuerung



aufhebt ($\bar{a} = a$). Bild 295e zeigt die fertige Schaltung mit NOR-Gliedern. Die Schaltung auf unserem Experimentiergerät ist aus Bild 296 ersichtlich.

Solange die Schalter *a* und *b* geöffnet sind, brennen die drei Signallampen (für die drei Gleise) nicht. Schließen wir Schalter *a*, leuchten *A* und *C*. Wird auch noch *b* geschlossen, gehen alle Lampen aus. Öffnen wir jetzt *a*, leuchten *B* und *C*. Natürlich ist es nicht möglich, unseren NOR-Gliedern den Fahrstrom für die Triebfahrzeuge zu entnehmen; dazu sind Transistor-Leistungs- oder Relais-Verstärker erforderlich.

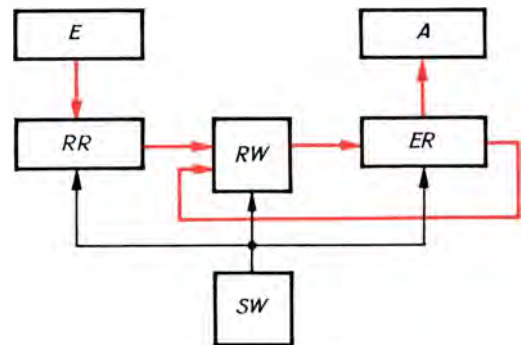
Nach diesem Abstecher in die »Steuerlogik« wenden wir uns wieder dem Hauptthema *Rechnen und Zählen* zu.

tenden Zahlen), am Ausgang das *Ergebnisregister* (ER) angeschlossen. Es nimmt vor Eingabe des zweiten Operanden den ersten aus dem Rechenregister auf. Register sind *Speicher*, wobei jeder Speicherplatz entweder mit »0« oder mit »L« belegt werden kann. Operanden und Ergebnis sind deshalb als Dualzahlen gespeichert. Damit die Arbeit mit der Rechenmaschine jedoch möglichst einfach wird, müssen die Operanden *dezimal* eingegeben werden können, das Ergebnis muß auch wieder dezimal ausgegeben werden. Im *Eingabekanal* (E) liegt deshalb die Funktionsgruppe zur *Verschlüsselung* von Dezimalzahlen in Dualzahlen, im *Ausgabekanal* (A) die zur *Entschlüsselung* der Dualzahlen in Dezimalzahlen. Das *Steuerwerk* (SW) sorgt für die richtige

Bild 297. Funktionsgruppen einer elektronischen Rechenmaschine

Die Grundbausteine eines Computers

Computer heißt nichts anderes als *Rechenmaschine* (engl. compute: berechnen); Bild 297 zeigt das Prinzip. In den einzelnen *Funktionsgruppen* sind viele digitale Schaltungen zusammengefaßt. Eine davon ist das eigentliche *Rechenwerk* (RW), in dem Dualzahlen miteinander verknüpft werden. Am Eingang des Rechenwerkes ist das *Rechenregister* (RR) für die zu verknüpfenden Operanden (die zu verarbei-



Operationsfolge. Es enthält unter anderem einen *Taktgenerator* für die zeitliche Operationssteuerung sowie einen *Taktzähler*, der bei einem bestimmten Stand die Rechnung beendet. Schauen wir uns die Funktionsgruppen etwas genauer an!

Ein Rechenwerk addiert Dualzahlen

Wir begnügen uns mit der Additionsschaltung für $a + b = c$. Es wurde bereits erwähnt, daß die Operanden (hier die zwei Summanden a und b) Dualzahlen sind; c sei das Ergebnis. Wir wissen bereits, daß im Fall $a = L$ und $b = L$ das Ergebnis zweistellig wird; es tritt ein Übertrag \dot{U} mit dem Stellenwert 2^1 auf. Den Stellenwert 2^0 bezeichnen wir als Summe S . Zum Ermitteln der Funktionsgleichungen für S und \dot{U} ist – analog der Additionstabelle – eine Wertetabelle aufzustellen:

Summanden		Ergebnis	
a	b	\dot{U}	S
0	0	0	0
0	L	0	L
L	0	0	L
L	L	L	0

Summengleichung:

$$S = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$$

(entsprechend Zugsteuerung).

Übertragungsgleichung:

$$\dot{U} = a \cdot b.$$

Wir könnten nun die Schaltung für die Summe so wie die Steuerschaltung für Gleis C im Bild 295e aufbauen. Es gibt jedoch noch eine einfachere Möglichkeit. Nach $\bar{\bar{a}} = a$ gilt auch $\bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b} = \bar{\bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}}$. Auf den rechts vom Gleichheitszeichen stehenden Ausdruck wenden wir den Inversionssatz an und erhalten

$$\begin{aligned} \overline{\bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}} &= \overline{(a + \bar{b}) \cdot (\bar{a} + b)} \\ &= \overline{a \cdot \bar{a} + a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{b} + b \cdot \bar{b}} \\ &= \overline{a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{b}}. \end{aligned}$$

Hier ergibt sich so ganz nebenbei auch die Gleichung für den Übertrag.

Bild 298a zeigt den Schaltungsausgang. Für $a \cdot b$ wird eine UND-Schaltung gebraucht (Bild 298b), wir realisieren sie mit drei NOR-Gliedern (Bild

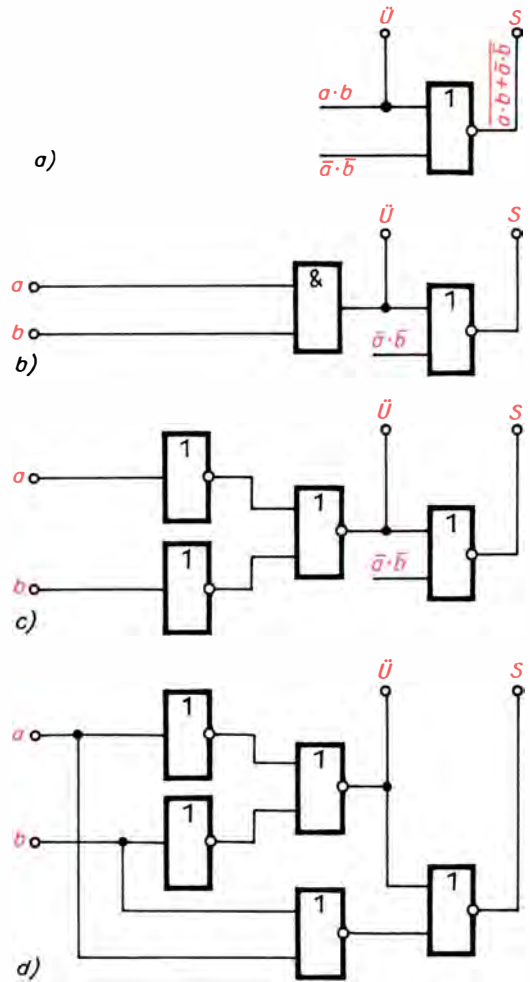
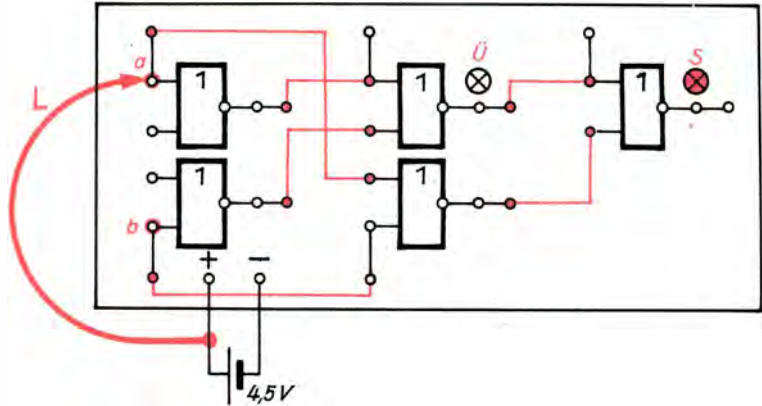


Bild 298. Entwicklung der Additionsschaltung

298c). Die andere Konjunktion $\bar{a} \cdot \bar{b}$ kann ebenfalls mittels NOR-Glied verwirklicht werden, denn es ist $a + b = \bar{\bar{a} \cdot \bar{b}}$. Die vollständige Additionsschaltung zeigt Bild 298d; aus Bild 299 ist die Verdrahtung auf unserem Experimentiergerät ersichtlich.

Überprüfen wir die Rechenfertigkeit! Solange beide Eingänge frei sind – das entspricht der Belegung mit 0 bei NOR-Gliedern – sind beide Lampen dunkel: $0 + 0 = 0$ (»null plus null gleich null«). Wird jeweils ein Eingang mit L belegt, leuchtet die Summenlampe, also $L + 0 = L$ (»eins plus null

Bild 299. Schaltung zur Addition zweier Dualzahlen



gleich eins») und $0 + L = L$ («null plus eins gleich eins»). Werden beide Eingänge mit L belegt, erlischt die Summenlampe, und die Übertragslampe brennt; unsere Schaltung rechnet $L + L = L0$ («eins plus eins gleich zwei»).

Für den Aufbau eines Rechenwerkes reicht diese einfache Schaltung jedoch noch nicht aus. Angenommen, es soll $3 + 3 = 6$ gerechnet werden. Dual sieht das so aus:

Summand *a* 0LL
 Summand *b* + 0LL
 Übertrag LL

Ergebnis LL0

Die einzelnen Stellenwerte werden – beim niedrigsten beginnend – nacheinander addiert.

Stellenwert 2^0 :

$L + L = L0$ ($1 + 1 = 2$). Der hier entstehende Übertrag ist bei der Addition im nächsten Stellenwert mit zu berücksichtigen.

Stellenwert 2^1 :

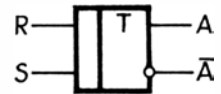
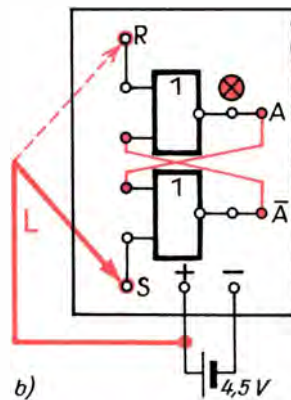
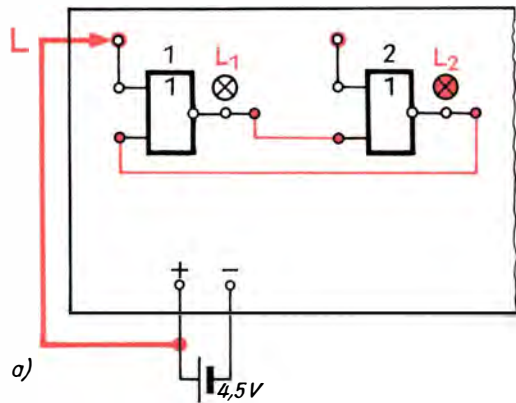
$L + L + L = LL$ ($1 + 1 + 1 = 3$),

Stellenwert 2^2 :

$0 + 0 + L = L$ ($0 + 0 + 1 = 1$).

Aus diesem Grund muß eine vollwertige Additionsschaltung drei Dualzahlen addieren können, nämlich die Stellenwerte der beiden Summanden *a* und *b* sowie den Übertrag aus der letzten Addition. Eine solche Schaltung läßt sich mit zwei Schaltungen unserer Art und einem zusätzlichen ODER-Glied aufbauen; wir verzichten jedoch darauf.

Bild 300. RS-Flip-Flop (Trigger): a) Reihenschaltung zweier NOR-Glieder mit Rückkopplung, b) übliche Darstellung der Zusammenschaltung, c) Schaltungskurzzeichen (T: Trigger)



c)

Wichtigste Eigenschaft eines Speichers: Gedächtniswirkung

Speicherzellen haben die Aufgabe, *Elementarinformationen* als »0« oder »L« aufzubewahren. Mehrere solche Zellen werden zum *Speicher* zusammengesaltet. Beginnen wir zunächst mit dem Aufbau einer Zelle. Nach Bild 300a ist jeweils der Ausgang eines NOR-Gliedes mit einem Eingang des anderen zu verbinden; dabei verlischt die Glühlampe. Nun legen wir ein L-Signal an den noch freien Eingang des zweiten NOR-Gliedes. War die Lampe L_1 vorher aus, geht sie jetzt an, und L_2 erlischt. Ist dieser Zustand schon vor der Verschaltung vorhanden gewesen, ändert sich jetzt nichts. Auch bei wiederholtem Anlegen von »L« an das zweite NOR-Glied tritt keine Änderung ein. Legen wir jedoch das L-Signal an den freien Eingang des ersten NOR-Gliedes, »kippt« die Schaltung: L_1 verlischt, und L_2 leuchtet jetzt.

Wir halten fest:

Liegt an dem einen Ausgang L, liegt am anderen stets 0.

Nun verändern wir den Versuchsaufbau – ohne die Schaltung selbst zu verändern –, indem wir nach Bild 300b zwei untereinander angeordnete NOR-Glieder verwenden. Sollte die Lampe dabei verlöschen, ist kurzzeitig »L« an den Eingang S zu legen. Jetzt leuchtet sie und signalisiert, daß am Ausgang A »L« liegt. Da der andere Ausgang immer entgegengesetzte Wertigkeit hat, bezeichnen wir ihn mit A. Wenn wir »L« an den Eingang R legen, verlischt die Lampe. Das ist der Ruhezustand unserer Speicherzelle; sie bewahrt dann die »0« auf.

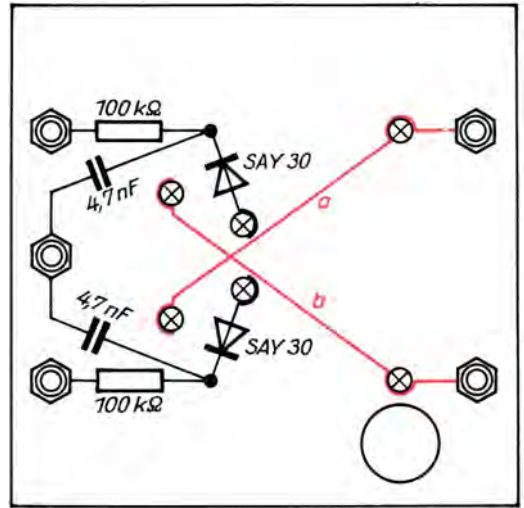


Bild 302. Verdrahtungsplan für die Steckbretter

Soll »L« in die Speicherzelle eingegeben werden, legen wir kurzzeitig »L« an den Eingang S. Dieser Vorgang wird auch als *Setzen* des Speichers bezeichnet (daher die Abkürzung S). *Löschen* oder *Rücksetzen* erfolgt mit L-Signal am Eingang R. Das eigenartige Verhalten dieser Schaltung führte zur Bezeichnung *Flip-Flop*. Bild 300c zeigt das Symbol. Der kleine Kreis am Ausgang \bar{A} soll andeuten, daß dort im Ruhezustand – z. B. nach dem Löschen – immer »L« anliegt.

Speziell für die Registerfunktion muß die Speicherzelle jedoch so beschaffen sein, daß die aufzunehmende Information erst mit einem »Schreibbefehl« gespeichert wird. Zu der dazu notwendi-

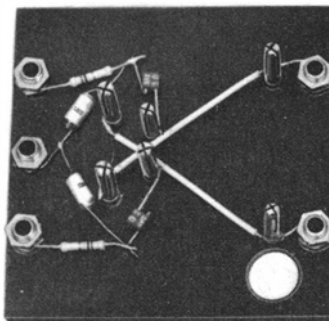
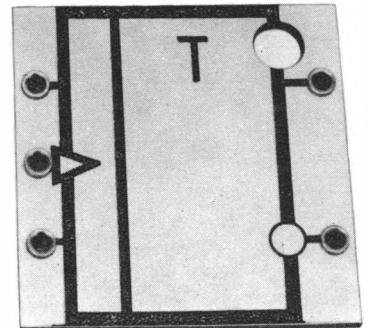


Bild 301. So sehen die Steckbretter mit den Impulstoren aus



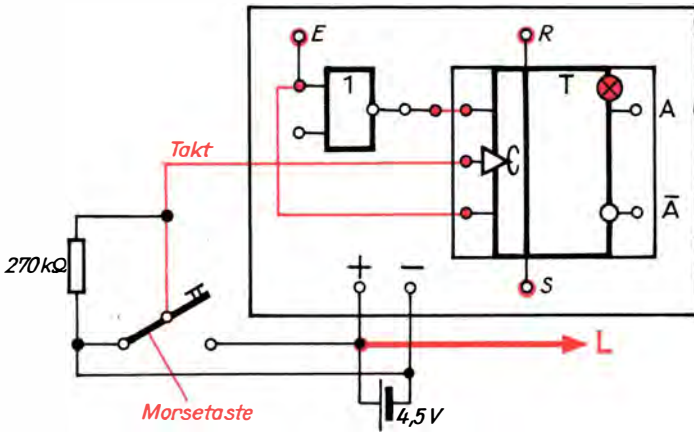


Bild 303. Aufbau einer Speicherzelle und Schaltung unserer Morsetaste

gen Schaltungserweiterung benötigen wir die zusätzlich angefertigten Bohrschablonen (Bild 288). A_1 und A_2 bohren wir für Telefonbuchsen auf 6 mm auf, L auf 15 mm, dort soll der Lampenkolben hindurchpassen. In die übrigen sechs 3-mm-Bohrungen ist Gewinde zu schneiden, da wir hier Bananenstecker von der Rückseite her einschrauben wollen. Danach richtet sich die Gewindegröße. Bei M4 ist vor dem Gewindeschneiden auf 3,2, bei M5 auf 4 mm aufzubohren. Bild 301 zeigt ein fertiges Steckbrett von beiden Seiten, Bild 302 den Verdrahtungsplan. Wir löten zunächst die beiden Koppelleitungen a und b an die vier äußeren Bananenstecker sowie die Anoden der zwei Dioden (vgl. Tabelle 2) an die mittleren. Dann bringen wir auf der Vorderseite die ebenfalls im Bild 301 sichtbare Zeichnung an (Zeichenkarton aufkleben, mit Tusche Zeichnung auftragen). Zum Schluß sind die Telefonbuchsen einzusetzen, zwei Widerstände (100 k Ω) und zwei Kondensatoren (4,7 nF) nach Bild 302 festzuschrauben bzw. anzulöten und die Enden der Koppelleitungen mit den Buchsen in A_1 und A_2 zu verschrauben.

Mittlerweile haben wir sicherlich herausgefunden, daß auf jedem Steckbrett zwei gleiche Schaltungsteile vorhanden sind. Es handelt sich um sogenannte *Impulstore* mit Steuereingang (am Widerstand), die über die Dioden direkt zur Transistorbasis führen. Wichtig ist, daß die beiden Steuereingänge immer mit entgegengesetzten (inversen) Werten belegt sein müssen. Deshalb ist auch in der Schaltung nach Bild 303 zwischen E und den oberen Steuereingang

ein Negator geschaltet, während der untere Steuereingang direkt mit E verbunden ist.

An den *Takteingang* T wird das erwähnte »Schreibsignal«, eine Rechteckspannung ähnlich der im Bild 261b, gelegt. Vorerst erzeugen wir sie mit unserer Morsetaste. Im Ruhezustand liegt ein 0-Signal an T, beim Niederdrücken der Taste ein L-Signal. Lassen wir die Taste los, geht die Taktspannung wieder von L auf 0.

Der 270-k Ω -Widerstand gewährleistet, daß unmittelbar nach dem Loslassen der Taste wieder 0-Signal an T liegt (und nicht erst nach erfolgter Umschaltung).

Versuch 1 (Bild 303):

1. Löschen des Flip-Flops durch kurzzeitiges Anlegen des L-Signals an R.
2. Anlegen der Elementarinformation L an den Negatoreingang E.
3. Einmaliges Drücken der Morsetaste: keine Änderung.
4. Loslassen der Taste: Die Lampe leuchtet auf. Durch den Rückgang der Taktspannung von L auf 0 wurde L eingeschrieben (an E liegend).
5. Anlegen der Information 0 an E (freier Eingang oder mit Batterie-Minuspol verbinden).
6. Einmaliges Drücken und Loslassen der Taste: Die Lampe erlischt. L wurde »ausgespeichert« und die an E liegende 0 aufgenommen.

Ergebnis:

Mit dem L-0-Übergang der Taktspannung wird die am Eingang der Speicherzelle liegende Elementarinformation eingeschrieben.

Bild 304. Schieberegister für zweistellige Dualzahlen

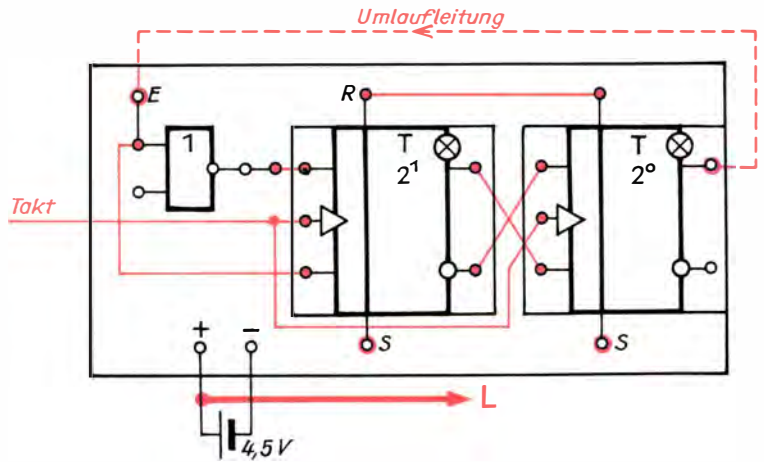
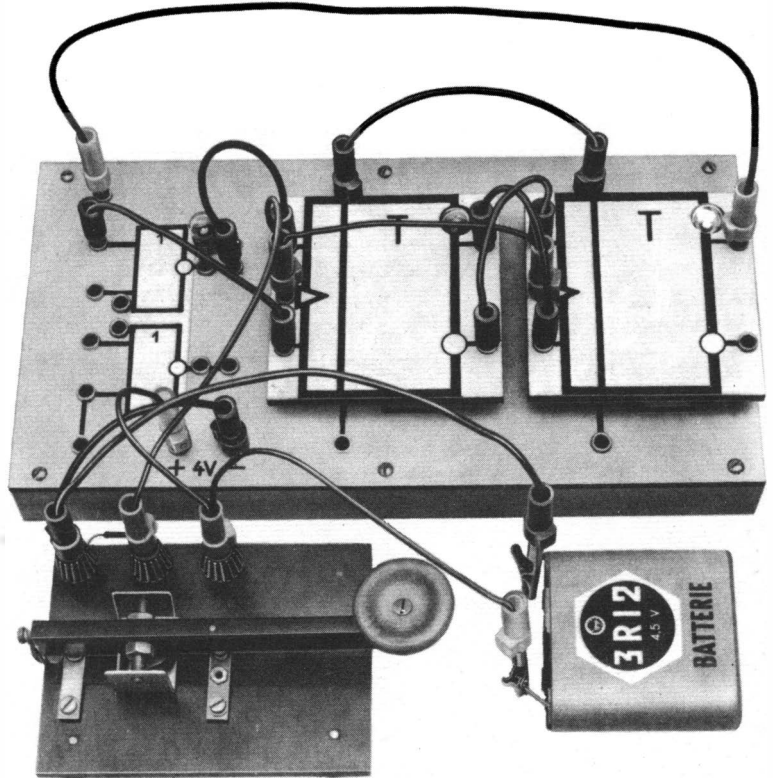


Bild 305. Versuchsaufbau zum Umlaufregister



Versuch 2 (Bild 304, ohne Umlaufleitung):

An die erste Speicherzelle schließen wir jetzt eine zweite an. Der Negator kann hier entfallen, da an den Flip-Flop-Ausgängen immer inverse Signale liegen. So wie in der ersten Stufe der Eingang E

direkt mit dem unteren Steuereingang verbunden ist, verläuft bei der zweiten Stufe eine Leitung vom Ausgang A der ersten Stufe zum unteren Steuereingang. A der ersten Stufe wird mit dem oberen Steuereingang der zweiten Stufe verbunden. Die

Taktspannung der Taste wird an beide Stufen gelegt.

1. Löschen des Registerinhaltes (L-Signal an R).
2. Anlegen von L an E.
3. Einmaliges Drücken und Loslassen der Taste: L wird in die erste Stufe eingespeichert.
4. Anlegen von 0 an E (freier Eingang).
5. Taste erneut drücken und loslassen: L der ersten Stufe wird von der zweiten übernommen, in die erste Stufe wird 0 eingespeichert.
6. Taste zum dritten Mal betätigen: L der zweiten Stufe wird ausgespeichert (und die 0 der ersten von der zweiten übernommen).

Ergebnis:

Mit jedem Taktsignal (L-0-Übergang) wird die im Register gespeicherte Information um eine Stelle verschoben, wir nennen es daher Schieberegister.

Es kann durchaus hin und wieder vorkommen, daß beim Betätigen der Taste eine Information nicht von der zweiten Stufe übernommen wird oder gar »verschwindet«. Das liegt nicht an Fehlern in unserer Registerschaltung, sondern an dem Verfahren der Taktspannungserzeugung. Wenn wir die Versuche mit dem noch zu bauenden Taktgenerator (vgl. S. 223) wiederholen, klappt alles einwandfrei.

Von der Additionsschaltung wissen wir, daß die Dualzahlen stellenweise miteinander verknüpft werden. Nun haben wir erfahren, wie das zu machen ist: Rechenregister und Ergebnisregister müssen Schieberegister sein; die Steuerung wird vom Taktsignal übernommen. Der bei der Addition entstehende Übertrag kommt vom Ausgang \dot{U} der Additionsschaltung in eine Speicherzelle, wird in ihr um eine Taktzeit verzögert und gelangt mit dem Folgetakt an den erwähnten dritten Eingang des Addiators. Oft ist es erforderlich, daß der Registerinhalt trotz Verschiebung nicht verlorengeht und für neue Operationen weiter zur Verfügung steht. Zu diesem Zweck muß aus dem Schieberegister ein *Umlaufregister* werden. Wir führen deshalb den Ausgang A der letzten Stufe zum Negatoreingang E zurück.

Versuch 3 (Bild 304 mit gesteckter Umlaufleitung und Bild 305):

1. Register löschen (L an R).
2. Eingeben der Zahl 2: L0 (L an S der ersten Stufe, Stellenwert 2^1).
3. Takt 1 anlegen: Registerinhalt 0L (Verschiebung um eine Stelle).
4. Takt 2 anlegen: Registerinhalt L0. Die L (eins!)

der Stufe 2^0 wird mit dem zweiten Takt jetzt nicht mehr ausgespeichert, sondern wieder von der Stufe 2^1 übernommen.

Ergebnis:

In einem zweistelligen Umlaufregister läuft der Inhalt mit zwei Schiebetakten einmal um. Bei n Stellen sind n Takte notwendig.

Lag ein Takt zuviel oder zuwenig an, steht eine falsche Zahl im Register (bei unserem Beispiel wäre es die 1: 0L). Daraus wird ersichtlich, daß die Rechenmaschine die einzelnen Takte genau registrieren und zählen muß; das ist eine der Aufgaben des Steuerwerkes.

Ein Zähler für Dualzahlen

Die Bausteine unseres Registers sind auch zum Zählen von Dualzahlen geeignet; wir bauen nach Bild 306 auf. Der Negator entfällt, die Ausgänge beider Stufen führen wir zu den Steuereingängen zurück, und den Ausgang A_1 der ersten Stufe verbinden wir mit dem Takteingang der zweiten. Für alle Zählschaltungen ersetzen wir den 270-k Ω -Widerstand an der Morsetaste durch ein RC-Glied. Und schon geht's los:

1. Zähler auf Null stellen (L an R).
2. Morsetaste einmal drücken und loslassen: die Lampe der ersten Stufe leuchtet (Zählerstand: L0).
3. Zweiten Takt anlegen: die Lampe der ersten Stufe erlischt, die der zweiten Stufe leuchtet (Zählerstand: 0L).
4. Dritten Takt anlegen: beide Lampen leuchten (Zählerstand: LL).
5. Vierten Takt anlegen: beide Lampen aus (Zählerstand: 00).

Beim Vergleich mit dem kleinen »Wörterbuch« dual – dezimal (Bild 267) stellen wir fest, daß unser Zähler 2 – 1 – 3 – 0 zählt, das gefällt uns nicht. Die Lösung dieses Problems ist nicht schwierig: Wir ordnen die Stellenwerte so zu, wie bereits im Bild 306 dargestellt. Und wem das Umdenken zu kompliziert erscheint, dreht das gesamte Grundbrett einfach um 180° , so daß die Lampen zum Betrachter hin liegen. Dann stimmt die Zählfolge: 0L – L0 – LL – 00, also 1 – 2 – 3 – 0.

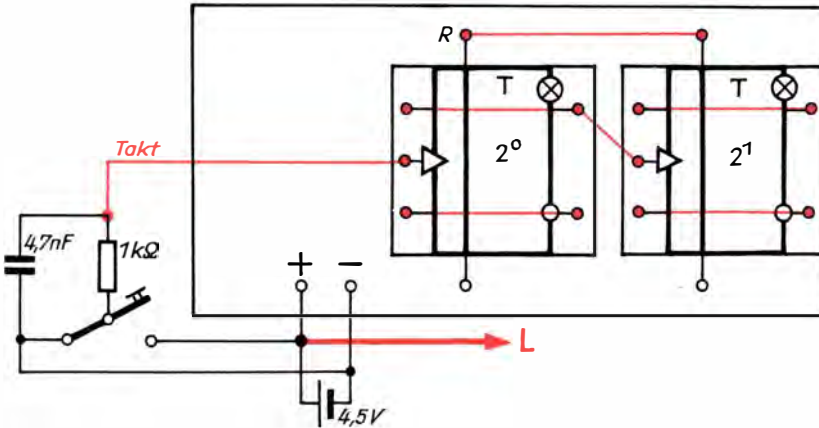


Bild 306. Zweistelliger Dualzähler

Wir bauen einen elektronischen »Würfel«

Die Anführungszeichen besagen, daß wir die Art des Würfelspiels *elektronisch nachahmen* wollen, und zwar mit einem Dualzähler als wichtigster Baugruppe. Ein üblicher Spielwürfel hat sechs verschiedene Augenzahlen von 1 bis 6; unser Dualzähler kann vier verschiedene Werte annehmen: 0, 1, 2 und 3. Fügen wir noch eine dritte Zählerstufe hinzu, sind (siehe kleines »Wörterbuch«) acht Werte möglich. Wir überzeugen uns davon, indem wir die Schaltung von Bild 306 weiterentwickeln und auch noch die ersten beiden NOR-Glieder mit dem dritten Steckbrett zu einer Zählerstufe schalten (Bild 307). Die rot gezeichnete Rückführungsleitung im Bild 307 stecken wir vorläufig noch nicht. Wir gewöhnen uns jetzt daran, daß die Stellenwerte entgegen der üblichen Norm angeordnet sind, und halten nach Nullstellung des Zählers in einer Tabelle die einzelnen Zählerstände fest (Lampe dunkel: 0, Lampe hell: L).

Acht verschiedene Werte sind für einen Würfel jedoch unerwünscht – es sei denn, wir erfinden neue Spielregeln! Zwei Zählerstände müssen also übersprungen werden. Dazu ist die im Bild 307 eingetragene rote *Rückführungsleitung* mit einem zusätzlichen Widerstand vom Ausgang A_3 zum Setzein-

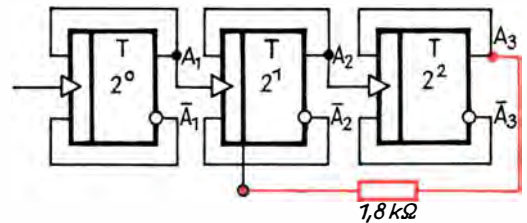


Bild 307. Dreistelliger Dualzähler

gang der Stufe 2^1 gedacht. Der 1,8-k Ω -Widerstand gewährleistet, daß der Zähler auch bei sinkender Batteriespannung (bis etwa 3,8 V) noch stabil arbeitet (er ist ebenfalls in den Rückführungsleitungen der Schaltungen nach Bild 313, 322, und 328 enthalten). Am besten bauen wir ihn direkt in einen

Takt	A_1	A_2	A_3
1	0	0	0
2	L	0	0
3	0	L	0
4	L	L	0
5	0	0	L
6	L	0	L
7	0	L	L
8	L	L	L
	0	0	0

Bananenstecker ein. Nun wiederholen wir die Zählung mit Rückführungsleitung:

Takt	A ₁	A ₂	A ₃	Zuordnung
1	0	0	0	6
2	L	0	0	1
3	0	L	0	2
4	L	L	0	3
5	0	L	L	4
6	L	L	L	5
	0	0	0	6

Nach Takt 4 würde der Zähler ohne Rückführung den Stand 00L annehmen. Da aber jetzt das an A₃ liegende L-Signal die Stufe 2¹ setzt, erscheint auch sofort L an A₂, und der neue Zählerstand lautet 0LL. Mit dieser Rückführung werden die Kombinationen 00L (4) und L0L (5) übersprungen. In der Tabelle ist eine mögliche Zuordnung der Ziffern 1...6 angegeben; man gewöhnt sich »spielend« daran.

Für das Würfeln ist der Zufall wichtig. Der endgültigen Ruhelage des Würfels entspricht der Stillstand unseres Zählers. Die Spieler dürfen die Anzeige vorher, also während des »Würfeln«, nicht erkennen. Deshalb muß das Zählen *automatisch* und *schnell* erfolgen.

Ein Taktgenerator erzeugt Rechteckspannungen

Wir schalten den folgenden Versuch nach Bild 308. Er entspricht in gewissem Sinne der Schaltung im Bild 299a. Dort erfolgte jedoch eine *galvanische* Kopplung der beiden NOR-Glieder (über die eingebauten Vorwiderstände), hier koppeln wir *kapazitiv* mit Elektrolytkondensatoren in den Leitungen zwischen Ausgang und direktem Basiseingang. Nach dem Anlegen der Spannung leuchten beide Lampen abwechselnd auf. Die Schaltung wirkt als *elektronischer Blinkgeber*, wobei ein Zyklus etwa 0,5 Sekunden dauert.

Während ein Flip-Flop zwei *stabile* Zustände hat und nur durch Impulse von außen zum Kippen gebracht wird, kippt diese Schaltung aus eigenem An-

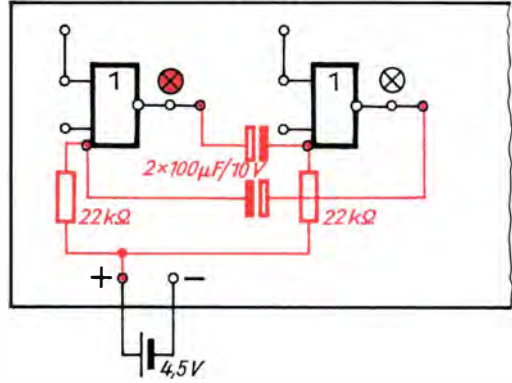
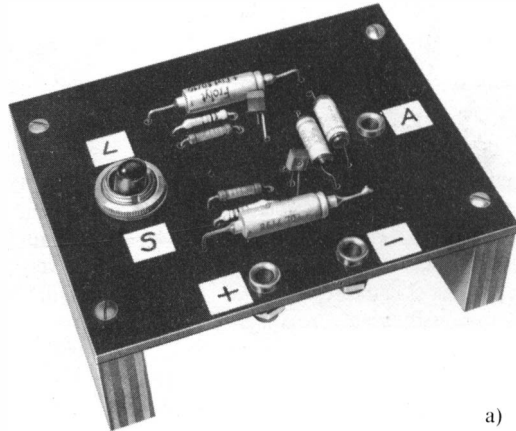
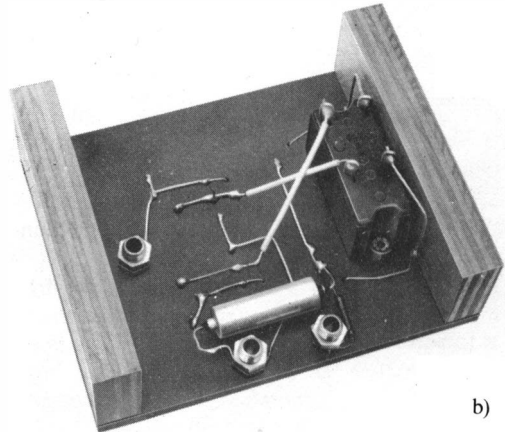


Bild 308. Elektronischer Blinkgeber

Bild 309. Ansicht unseres Taktgenerators: a) von oben, b) von unten



a)



b)

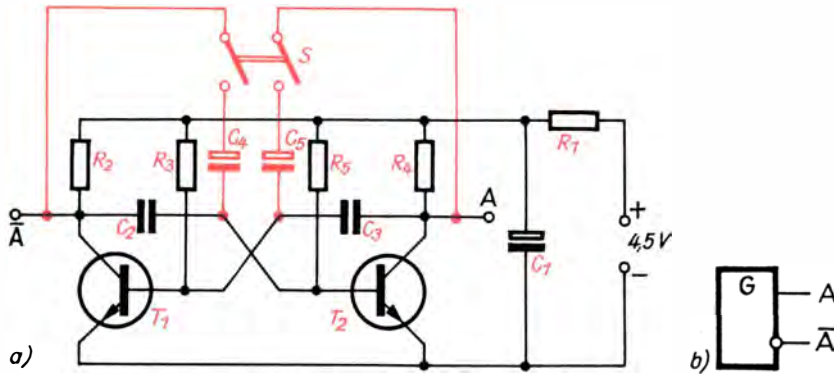
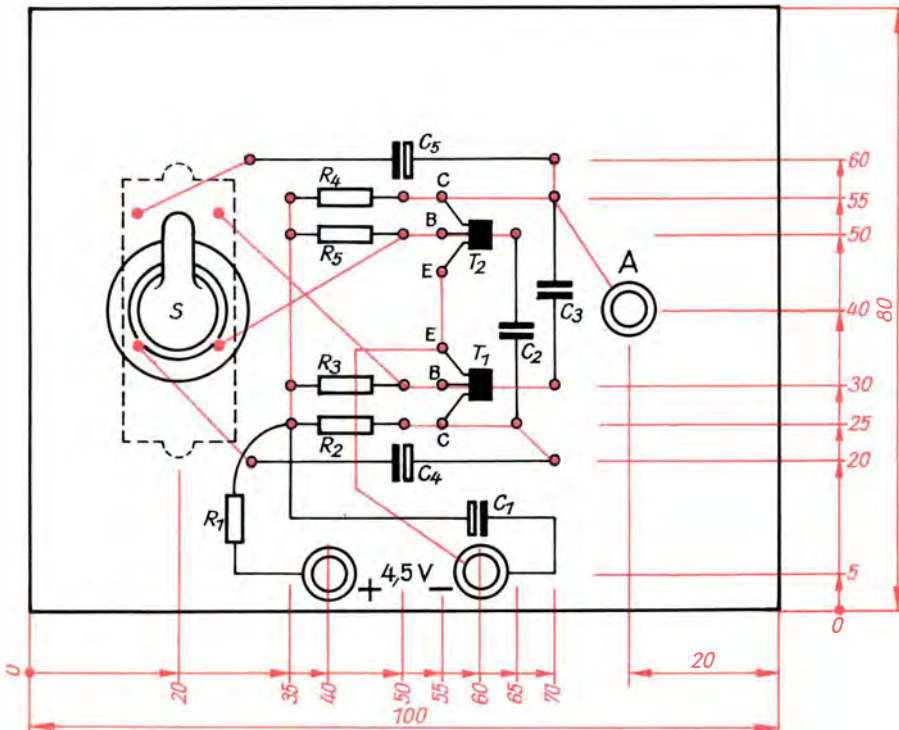


Bild 310. Multivibrator als Taktgenerator: a) Schaltung für zwei Frequenzen, b) Schaltungskurzzeichen

trieb. Sie hat zwei *nichtstabile* Zustände und wird deshalb als *astabiler Vibrator* oder als *Multivibrator* bezeichnet. Die Kippzeit hängt von der Größe der zusätzlichen Widerstände und Kondensatoren ab. Tauschen wir z. B. die 100- μ F-Kondensatoren gegen Kondensatoren mit 10 nF Kapazität aus, leuchten beide Lampen etwa gleichhell, aber dunkler als vorher je eine. Die einzelnen Hell- und Dunkelphasen können wir nun nicht mehr unterscheiden,

Bild 311. Aufbau des Taktgenerators



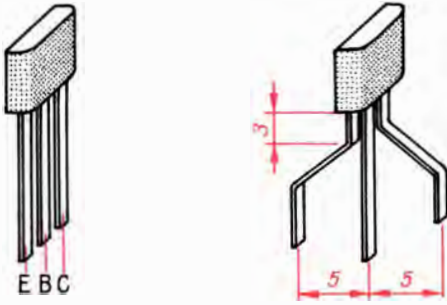
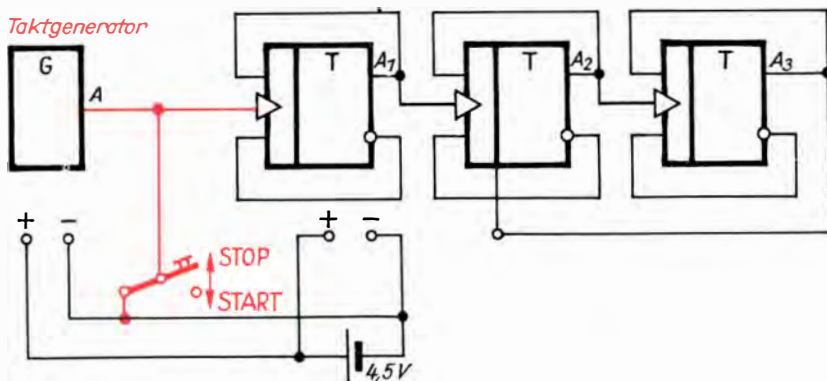


Bild 312. So biegen wir die Anschlußbeine der Miniplastransistoren

weil der Kippvorgang jetzt viel schneller verläuft. Diese Geschwindigkeit reicht für den »Antrieb« unseres Würfelzählers aus. Da wir aber alle NOR-Glieder unseres Experimentiergerätes für den dreistelligen Dualzähler brauchen, bauen wir den *Taktgenerator* getrennt auf; Bild 309 zeigt zwei Ansichten. Der Stromlaufplan geht aus Bild 310a hervor. Ein zweipoliger Kippschalter S gestattet das Parallelschalten je eines Kondensators C_4 bzw. C_5 zu den Kondensatoren C_2 und C_3 . Damit haben wir die Möglichkeit, dem Taktgenerator Rechteckspannungen unterschiedlicher Frequenzen zu entnehmen; wir nennen sie »Langsamtakt« und »Schnelltakt«. Von den beiden Ausgängen brauchen wir nur den Ausgang A. Das Siebglied R_1/C_1 kann bei Batteriebetrieb entfallen. Da wir aber später den »Würfel« mit unserer Schalttafel betreiben wollen, bauen wir es gleich mit ein.

Bild 313. Wir schalten den Taktgenerator an den Zähler



Die Werte der Bauelemente:

$R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_3 = R_5 = 33 \text{ k}\Omega$,
 $C_1 = 100 \mu\text{F}/10 \text{ V}$, $C_2 = C_3 = 10 \text{ nF}$, $C_4 = C_5 = 50 \mu\text{F}/10 \text{ V}$, T_1 und T_2 : Silizium-Miniplastransistoren aus unserer Tüte 2 ($50 < B < 75$).

Die Bauelemente ordnen wir – bis auf das Siebglied – auf der Oberseite einer $80 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ großen und 4 mm dicken Hartpapierplatte nach Bild 311 an. Während die Anschlußbeine der Widerstände und Kondensatoren einfach rechtwinklig abgebogen werden, verfahren wir bei den Miniplastransistoren so, wie im Bild 312 angegeben. Die im Bild 311 rot dargestellten Leitungen verlegen wir auf der Unterseite der Grundplatte; bei Leitungskreuzungen ist isolierter Schaltdraht zu verwenden. An die beiden Schmalseiten des Grundbrettes schrauben oder kleben wir Holzleisten als Füße an.

Funktionsprobe im Langsamtakt:

An den Ausgang des Taktgenerators schließen wir über den Lampenverstärker (Bild 272) eine Glühlampe $3,8 \text{ V}/0,07 \text{ A}$ an und messen mit einer Stoppuhr die Leuchtzeiten und die Dunkelzeiten. In beiden Fällen ermitteln wir etwa 2 Sekunden. Haben wir keine Stoppuhr, lesen wir die Zeit für 10 Hell-Dunkel-Perioden von der Armbanduhr (mit Sekundenzeiger) ab. Division durch 10 führt auf rund 4 Sekunden für eine Schwingung.

Den Schnelltakt können wir nicht ausmessen. Hier ist die Dauer einer Hell-Dunkel-Periode $T \approx 0,32 \text{ ms}$ (Millisekunden, $1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$). Das entspricht einer Frequenz f von $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,32 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = \frac{100}{32} \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \approx 3 \text{ kHz}$. In einer Sekunde »ver-

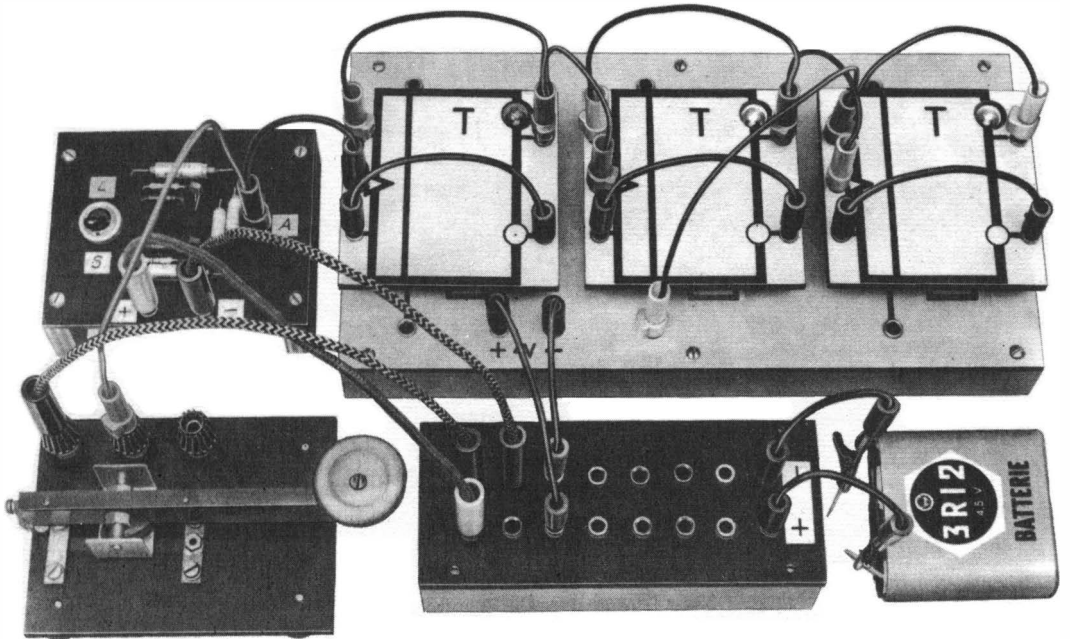


Bild 314. Variante 1 des elektronischen Würfels

lassen« rund dreitausend Taktsignale den Generators ausgang!

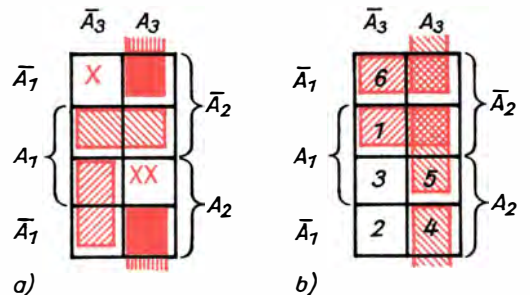
Die erste Variante unseres elektronischen Würfelspiels schalten wir nach Bild 313. Der Ausgang A des Taktgenerators wird mit dem Takteingang der ersten Zählerstufe verbunden; zwischen Takteitung und Batterie-Minuspol liegt die Morsetaste. Wir stellen den Zähler auf Null (L an R), schalten auf *Langsamtakt* und drücken die Taste. Der Zähler muß alle vier Sekunden auf die nächsthöhere Zahl – entsprechend der Tabelle auf S. 223 – umschalten. Dann stellen wir den Taktgenerator auf *Schnelltakt*. Drücken der Taste bedeutet: Der »Würfel rollt«; Loslassen der Taste heißt: Der Zähler zeigt die »gewürfelte Augenzahl« an. Den Versuchsaufbau der ersten Würfelvariante zeigt Bild 314.

Wir bauen einen Würfel mit dezimaler Anzeige

Auch wenn es uns nach einiger Übung keine Schwierigkeiten mehr bereitet, die sechs Lampenanzeigen den gewählten Dezimalzahlen zuzuord-

nen, so werden doch unsere Mitspieler anfangs skeptisch dreinschauen. Eine zusätzliche Schaltung soll in Zukunft die Übersetzung der Dualzahlen in Dezimalziffern automatisch erledigen. Diese Entschlüsselung wird auch als *Dekodieren* bezeichnet. Entsprechend den sechs Möglichkeiten sehen wir sechs Anzeigelampen vor: Jede Lampe symbolisiert eine der Ziffern von 1 bis 6. Es soll dabei immer nur *eine* Lampe leuchten. Nach unserer Zuordnungstabelle muß z. B. Lampe 1 dann leuchten, wenn A_1 mit L und A_2 mit 0 und A_3 mit 0 belegt sind. Die Funktionsgleichung lautet deshalb $1 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$.

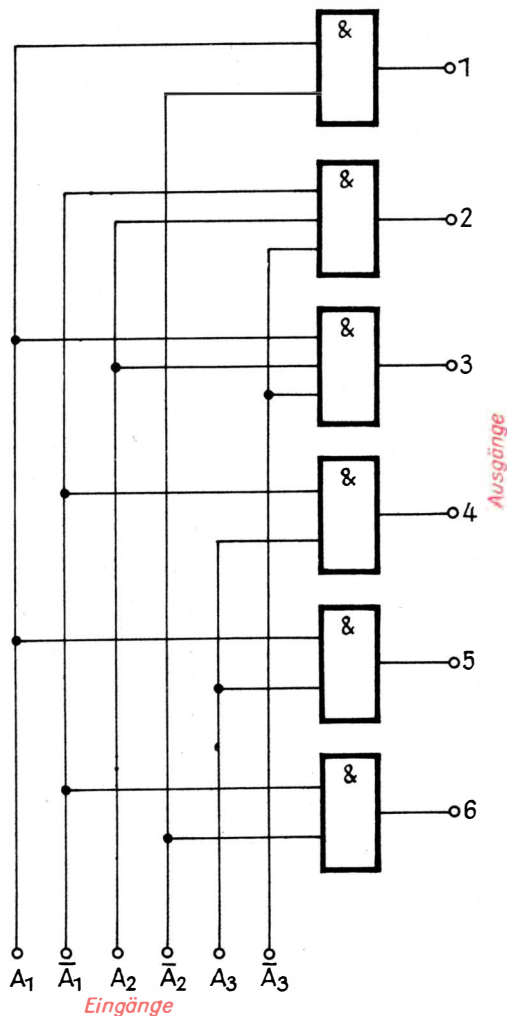
Bild 315. Tafelverfahren zur Reduzierung des Aufwandes



Für jede Dezimalziffer können wir eine solche Konjunktion aufstellen; die entsprechende UND-Schaltung (nach Bild 270 mit drei Eingängen) erfordert drei Dioden. Zusammen würden damit $3 \cdot 6 = 18$ Dioden benötigt. Da jedoch zwei der acht möglichen Dualzahlen übersprungen werden, ist eine *Schaltungsvereinfachung* möglich. Dazu schauen wir uns ein grafisches Verfahren an.

Ausgangspunkt dafür ist eine Tafel mit so vielen Feldern, wie es Kombinationen der Variablen gibt. Bei drei Variablen sind es acht Felder; wir ordnen

Bild 316. Dekodierschaltung dual-dezimal



sie nach Bild 315a an. Das mit X bezeichnete Feld entspricht der Konjunktion $\bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot A_3$ bzw. der Dualzahl 000. Nach unserer Vereinbarung ist das die 6 (vgl. Bild 315b). Zu dem mit XX gekennzeichneten Feld gehört die Konjunktion $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$ bzw. die Dualzahl LLL; das ist die 5. In der Tafel nach Bild 315b sind sämtliche dezimalen »Würfelziffern« eingetragen. Die beiden leeren Felder stammen von den für das Würfeln überflüssigen Kombinationen. Sie bilden die Grundlage für das Vereinfachen der Schaltung, indem sie mit belegten Nachbarfeldern zu *Blöcken* zusammengefaßt werden. Im Bild 315a sind drei mögliche Zweierblöcke eingetragen; Dreierblöcke sind nicht zulässig. Blöcke mit vier Feldern wären wieder erlaubt, sie sind in unserem Fall aber nicht möglich. Dem waagrecht liegenden, schraffierten *Zweierblock* entspricht die Konjunktion $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_3$. Die Variable, die sowohl negiert als auch nichtnegiert auftritt, darf in der Konjunktion weggelassen werden. Deshalb lautet die vereinfachte Konjunktion des betrachteten Zweierblocks nur noch $A_1 \cdot \bar{A}_2$. Für den senkrecht schraffierten Block gilt dementsprechend $A_2 \cdot A_3$. Bei der Blockbildung darf auch der Tafelrand überschritten werden; man denkt sich in diesem Fall die gegenüberliegenden Tafelkanten zusammenstoßend. Ein Beispiel dafür ist der rot ausgefüllte Zweierblock; seine Konjunktion lautet $\bar{A}_1 \cdot A_3$.

Im Bild 315b sind die für unseren Fall möglichen Blöcke eingetragen. Nur für die Dezimalziffern 2 und 3 gibt es keine Vereinfachungen, da alle vier angrenzenden Felder belegt sind. Die übrigen Zifferfelder können jeweils mit einem leeren Nachbarfeld zu Zweierblöcken zusammengefaßt werden. Als Funktionen der Dekodierschaltung lesen wir ab:

$$\begin{aligned} 1 &= \bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2, \\ 2 &= \bar{A}_1 \cdot A_2 \cdot \bar{A}_3, \\ 3 &= \bar{A}_1 \cdot A_2 \cdot A_3, \\ 4 &= A_1 \cdot A_3, \\ 5 &= A_1 \cdot A_3, \\ 6 &= \bar{A}_1 \cdot A_2. \end{aligned}$$

Bild 316 zeigt die entsprechende Dekodierschaltung. Die sechs UND-Glieder realisieren wir nach Bild 270, bei drei Eingängen ist eine dritte Diode notwendig. Wie der Taktgenerator wird auch die Dekodierschaltung auf einer kleinen Hartpapierplatte nach Bild 317 aufgebaut; im Bild 318 sind zwei Ansichten zu sehen. Alle Widerstände haben

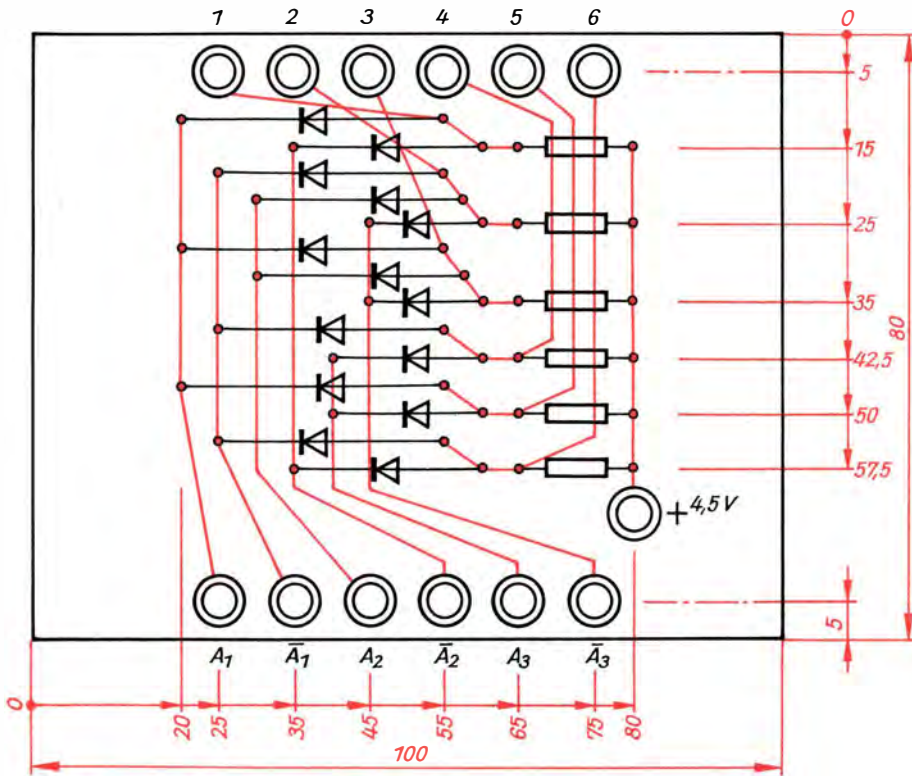


Bild 317. Aufbau der Dekodierschaltung DC

einen Wert von je 1 k Ω ; Dioden nach Tabelle 2. Aus Bild 318 ist ersichtlich, daß die Anschlußfahnen der Dioden zu einer eingängigen Wendel gebogen sind. Das hat mehrere Gründe:

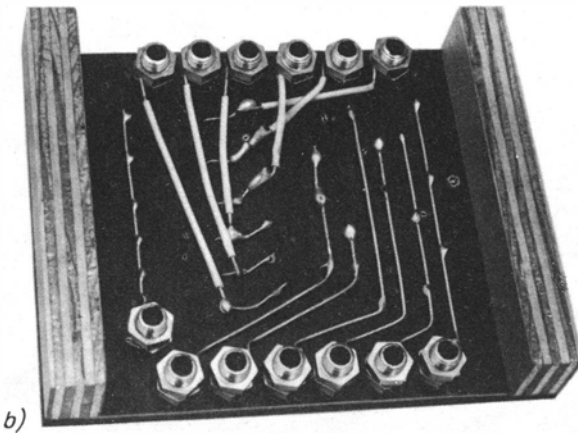
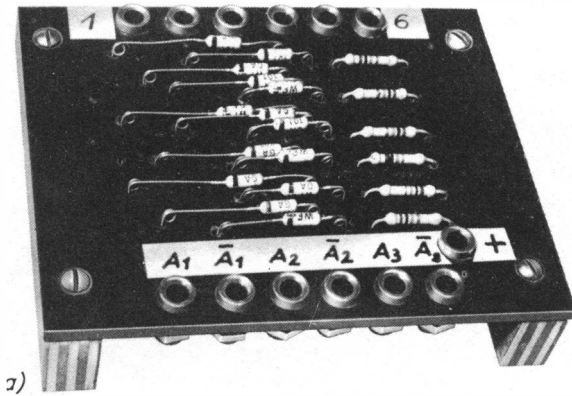
1. Die Diode wird beim Lötten durch die längere Anschlußfahne (im Vergleich zum einfachen Abwinkeln) nicht so warm.
2. Das Gehäuseglas bricht bei Stößen durch die Federwirkung nicht so schnell aus.
3. Es ist so ein gleichmäßiger Abstand der Diode vom Grundbrett möglich.

Wir biegen die Wendel über der Metallspitze einer Kugelschreibermine (1,5 mm Durchmesser). Die Mine spannen wir zu diesem Zweck in den Schraubstock ein.

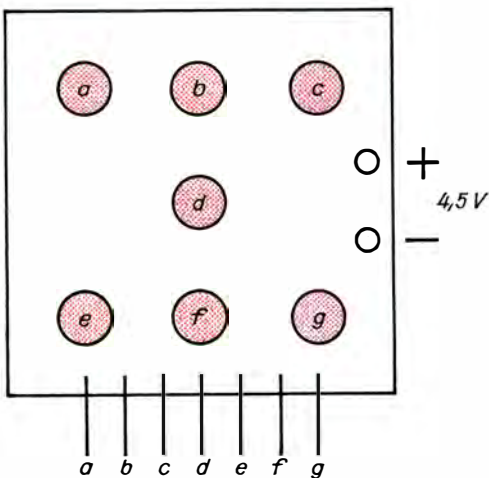
Nach Fertigstellung der Dekodierschaltung (DC) führen wir eine *Funktionsprüfung* durch. Zum Vergleich benutzen wir unsere Zuordnungstabelle. Die Eingänge A_1 bis A_3 von DC sind mit den zugehörigen

Ausgängen des dreistelligen Dualzählers zu verbinden. Dann schließen wir den Batterie-Pluspol an. Durch L-Signal an R wird der Zähler auf Null gestellt. Mit einem Spannungsmesser, dessen Minuspol am Batterie-Minuspol liegt, kontrollieren wir der Reihe nach die an den Ausgangsbuchsen 1...6 liegenden Spannungen. Sie müssen – bis auf Buchse 6 – alle unter 1 V liegen; an Buchse 6 muß der Spannungsmesser etwa 4 V anzeigen. Dann schließen wir an den Takteingang der ersten Stufe entweder die Morsetaste (Bild 303) oder den Taktgenerator (Bild 313) in der Stellung Langsamtakt an und messen erneut die Ausgangsspannungen. Nach dem ersten Takt muß an Buchse 1 die Spannung etwa 4 V betragen; an allen anderen Ausgängen darf jeweils höchstens 1 V liegen, jetzt auch an Buchse 6. Wir takten den Zähler in die nächste Stellung und messen erneut. Nun liegt nur an Buchse 2 eine Spannung von etwa 4 V. So geht es weiter, bis nach Takt 6 wieder alle Zählerlampen erloschen sind und 4 V an Buchse 6 liegen.

Bild 318. Ansicht unserer Dekodierschaltung:
a) von oben, b) von unten



Dezimalzahl	Lampe
1	a
2	b
3	c
4	e
5	f
6	g

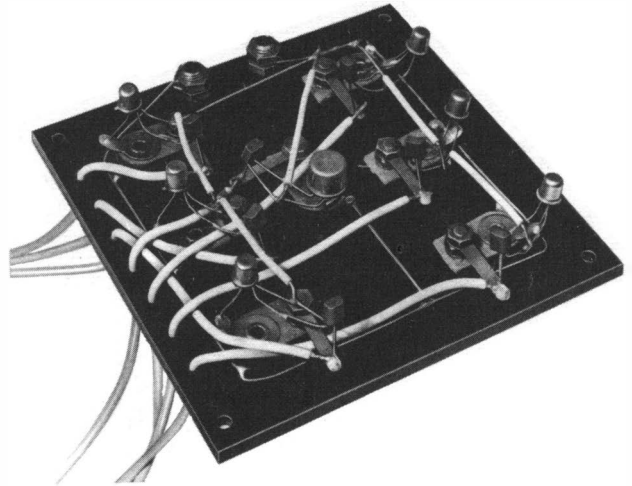


Nun benötigen wir ein *Anzegebrett* mit sechs Lampen. Da wir jedoch eine dem Würfel entsprechende Augenzahl-Anzeige nachbilden wollen, ordnen wir auf dem Brett gleich sieben Lampen nach Bild 319 an. Das Musterbrett aus Hartpapier (Bild 320) hat die Abmessungen 100 mm × 100 mm. Wir bezeichnen die Lampen mit a bis g und treffen die in obiger Tabelle enthaltene Zuordnung. Lampe d wird vorläufig nicht gebraucht, aber gleich mit eingebaut.

Um die Belastung der Dioden-UND-Schaltungen möglichst gering zu halten, bauen wir die *Lampenstromverstärker* zweistufig auf. Die Schaltung ist im Bild 321 dargestellt. Für T₁ verwenden wir einen

Bild 319. Anordnung der Lampen für unseren Würfel

Bild 320. Ansicht des Lampenbrettes von der Verdrahtungsseite



Miniplasttransistor, für T_2 einen Transistor im Metallgehäuse. Beide Transistoren können wir als einen einzigen auffassen, dessen Gesamtstromverstärkung B – und das ist der Sinn dieser Schaltung – gleich dem Produkt der Teilstromverstärkungen B_1 und B_2 ist. Betragen z. B. die Stromverstärkungen $B_1 = 20$ und $B_2 = 30$, so berechnen wir $B = B_1 \cdot B_2 = 20 \cdot 30 = 600!$ Hier setzen wir Transistoren aus unserer Tüte 1 ein ($B < 50$). Wir kombinieren die Paare so, daß $B \approx 500$ wird; ein nochmaliges Ausmessen mit der Schaltung nach Bild 273 wird dabei vorteilhaft sein. Die Basis von T_1 löten wir an eine mit der Lampenfassung angeschraubte Lötöse. Von hier verläuft eine flexible isolierte Leitung durch eine Bohrung des Lampenbrettes; an ihrem Ende wird ein Bananenstecker angeschraubt. Die Leitungslänge beträgt nach der Durchführung etwa 15 cm. Beim Durchfädeln der Leitungen beachten wir die richtige Reihenfolge entsprechend Bild 319.

Zur Funktionsprüfung legen wir die Spannung an das Lampenbrett und verbinden der Reihe nach die sieben Leitungen mit dem Batterie-Pluspol. Dabei müssen die einzelnen Lampen in der richtigen Reihenfolge aufleuchten.

Nun schalten wir Taktgenerator, Zähler, Taste, Dekodierschaltung, Lampenbrett und Batterie nach Bild 322 zur Variante 2 des elektronischen Würfels. Bild 323 zeigt den Versuchsaufbau. Am Taktgenerator wählen wir zunächst den Langsamtakt, stellen den Zähler auf Null (Lampe 6 leuchtet) und

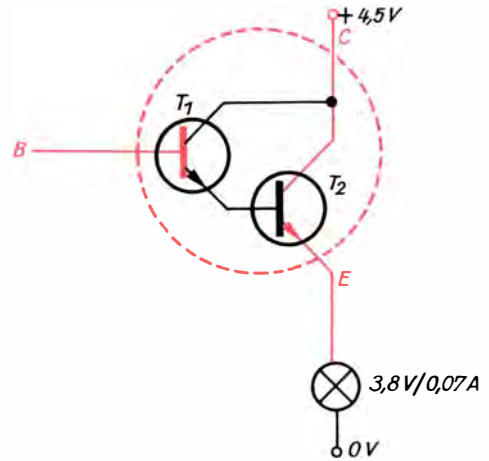


Bild 321. Schaltung eines Lampenstromverstärkers für das Würfelbrett

starten. Der Reihe nach müssen nun die Lampen 1, 2, 3, 4, 5 und schließlich wieder 6 für jeweils etwa vier Sekunden aufleuchten. Das »Würfel« selbst erfolgt im Schnelltakt genau wie bei Variante 1. Jetzt können auch unsere Mitspieler die gewürfelten Zahlen sofort ablesen.

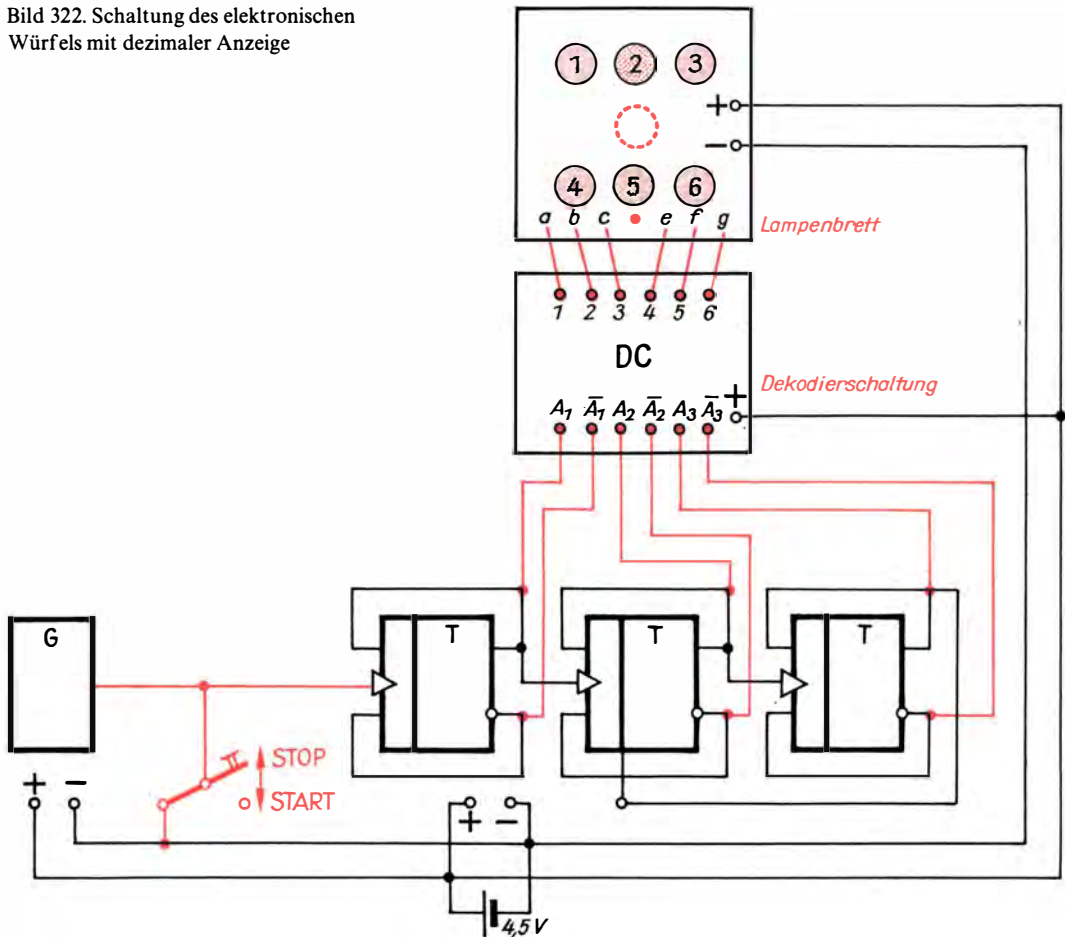
Während der Zählkontrolle im Langsamtakt ist uns sicherlich bewußt geworden, daß unsere Anlage auch für andere Zwecke geeignet ist, beispielsweise für die Zeitmessung. Wenn der Taktgenerator näm-

lich alle 10 Sekunden ein Signal abgibt, beträgt die Zeitspanne für das Aufleuchten der 6 Lampen 60 Sekunden, also eine Minute. Unsere Schaltung ist deshalb auch als *Baustein einer Digitaluhr* zu verwenden. Wir kennen die digitale Zeitangabe vom Fernsehen, bei der sechs Dezimalziffern gleichzeitig angezeigt werden. Für jede Ziffer ist ein Dualzähler mit Dekodierung und Ziffernanzeige notwendig. Den sehr großen Aufwand für eine derartige Digitaluhr können wir jetzt erahnen, eine ökonomisch vertretbare Fertigung ist nur mit *integrierten Schaltkreisen* in gedruckter Schaltungstechnik möglich.

Natürlich verlangen wir von einer Digitaluhr oder von einem elektronischen Rechner eine direkte *Ziffernanzeige*; diesem Problem wenden wir uns im

letzten Abschnitt zu. Vorher aber noch einige Bemerkungen zum *Steuerwerk* eines Rechners; die dazu notwendigen Bausteine haben wir bereits. Wir schalten nach Bild 324. Der Ausgang des Taktgenerators führt zu einem Eingang unseres Dioden-UND-Gliedes, am anderen Eingang liegt der Ausgang des ersten Flip-Flops auf dem Experimentierbrett. Es dient hier als *Start-Stop-Schalter*. Der Ausgang des UND-Gliedes geht zu einem zweistufigen Zähler. Außerdem sind über dem Lampenstromverstärker eine Glühlampe La (3,8 V/0,07 A) zur optischen Taktanzeige und ein Abblockkondensator (10 nF) angeschlossen. Dieser Kondensator unterdrückt Impulsspitzen der Taktspannung. Nach Löschung aller Flip-Flops drücken wir kurzzeitig

Bild 322. Schaltung des elektronischen Würfels mit dezimaler Anzeige



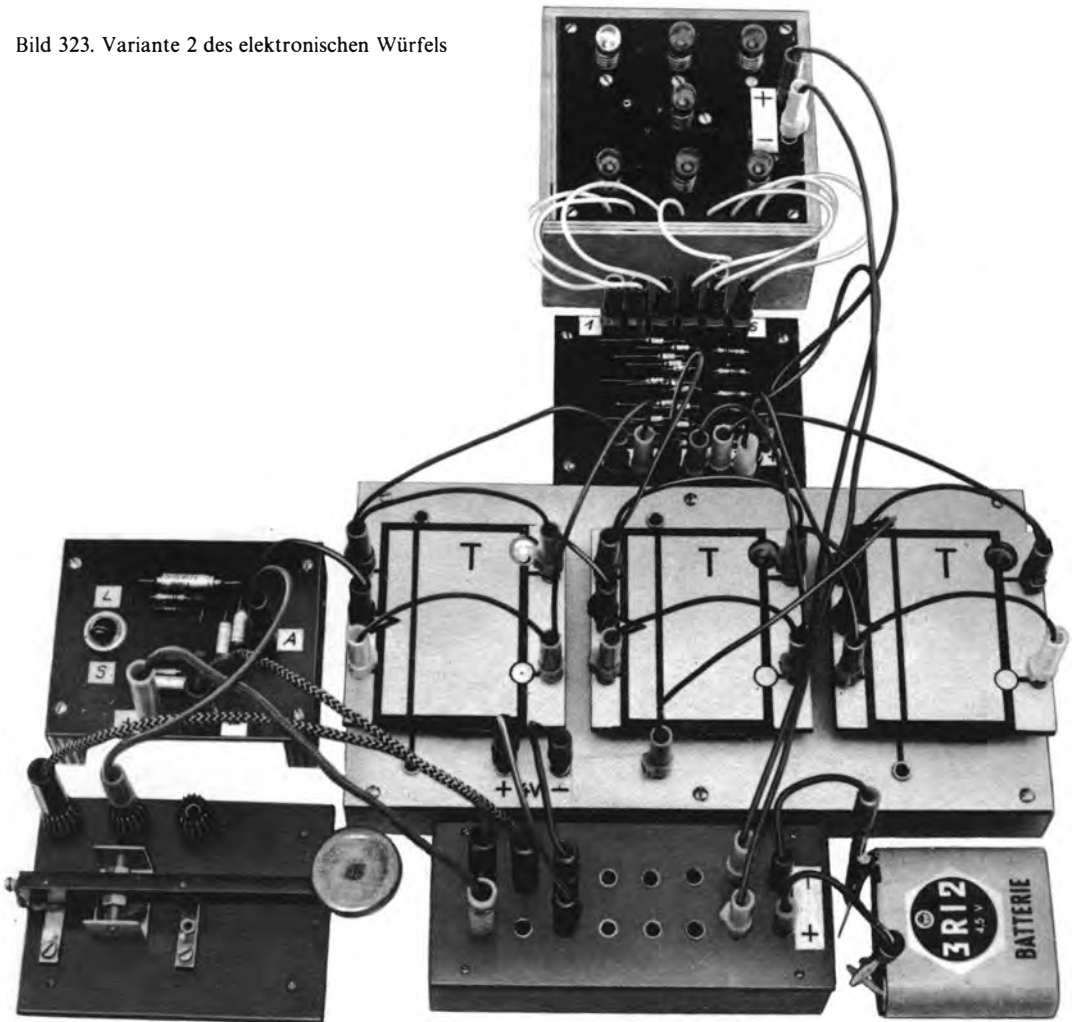
die *Start*-Taste. Das Start-Stop-Flip-Flop wird damit gesetzt, und am UND-Glied liegt L-Signal an. Gleichzeitig oder kurz danach leuchtet La zum ersten Mal. Der zweistellige *Taktzähler* registriert nun die Zahl der Takte. Wenn La nach Anzeige des vierten Taktes wieder erlischt, schaltet der Zähler in die Stellung 00. Mit dem L-0-Übergang am Ausgang der zweiten Zählerstufe wird das Start-Stop-Flip-Flop über den Takteingang rückgesetzt, das ist das automatische *Stop*-Signal. Obwohl der Taktgenerator nach wie vor arbeitet, kann der Takt das UND-Glied nicht mehr passieren, denn an sei-

nem anderen Eingang liegt somit ein 0-Signal an. Dieses Steuerwerk ist also für eine Rechenmaschine mit vierstelligen Schieberegistern geeignet.

Als letztes: Anzeige der Würfelaugen

Wie bereits beim Bau des Lampenbrettes angedeutet, wollen wir unsere Würfelanlage bis zur *direkten Augen-Anzeige* ausbauen. Zu diesem Zweck wird eine Verschlüsselungs- oder *Kodierschaltung*

Bild 323. Variante 2 des elektronischen Würfels



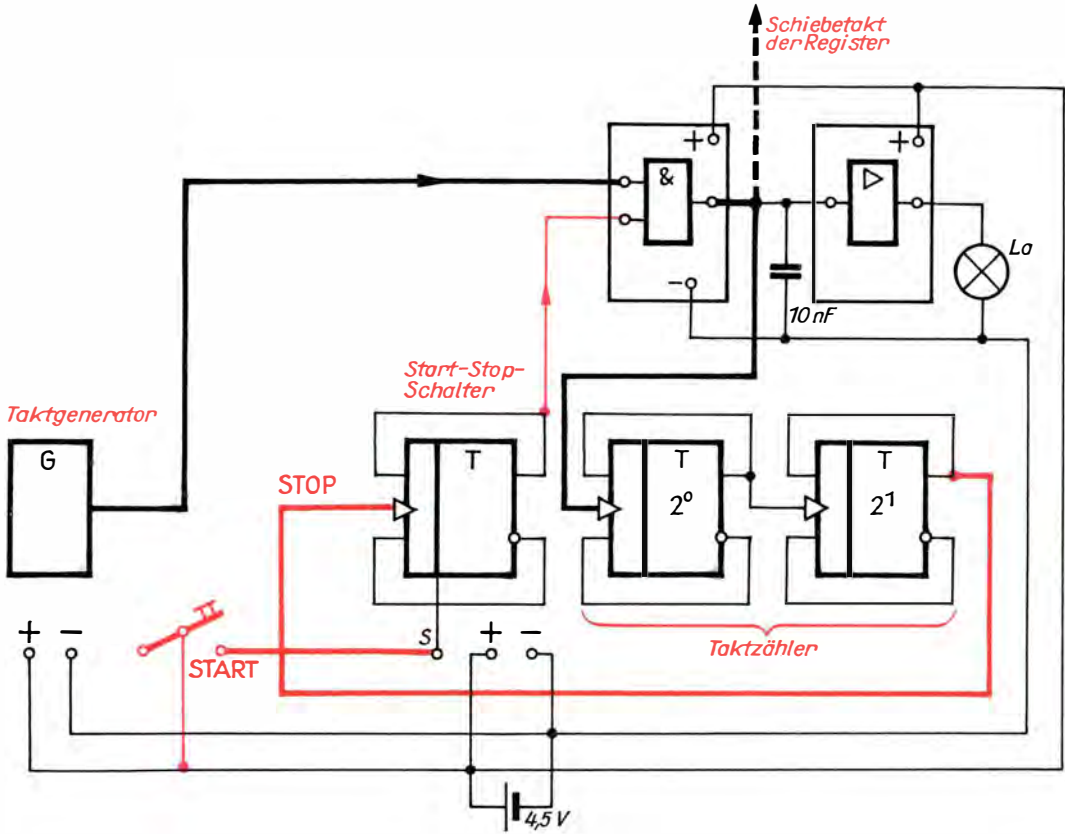


Bild 324. So funktioniert die Zählersteuerung eines elektronischen Rechners

(CD) benötigt, die – entsprechend den Dezimalziffern – die notwendigen Lampenkombinationen aufleuchten läßt. Aus der folgenden Tabelle ist ersichtlich, welche Lampen bei den einzelnen Dezimalziffern leuchten müssen. Die Bezeichnung der Lam-

Dezimalziffern	Lampen						
	a	b	c	d	e	f	g
1				L			
2	L						L
3	L			L			L
4	L		L		L		L
5	L		L	L	L		L
6	L	L	L		L	L	L

pen entspricht der im Bild 319 gewählten Anordnung.

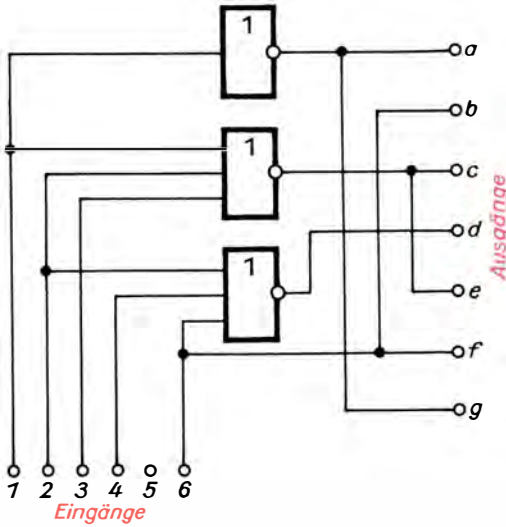
Lampe a muß bei 2 oder 3 oder 4 oder 5 oder 6 leuchten, also gilt $a = 2 + 3 + 4 + 5 + 6$. Für diese Funktion ist eine ODER-Schaltung (Bild 275) mit fünf Eingängen, d. h. mit fünf Dioden, erforderlich. Ebenso können wir jedoch auch sagen, daß Lampe a nur bei 1 nicht leuchtet: $a = 1$ bzw. $a = \bar{1}$. Diese Funktion läßt sich mit einem Negator (NOR-Glied mit einem Eingang) verwirklichen. Da die Kodierschaltung an die mit Dioden-UND-Gliedern bestückte Dekodierschaltung angeschlossen wird, ist es vorteilhafter, hier aktive Schaltungen einzusetzen.

Wir erkennen aus der Tabelle weiter, daß bestimmte Lampen immer gleichzeitig leuchten bzw. dunkel sind, und zwar

$$a = g = \bar{1}$$

$$c = e = \bar{1 + 2 + 3},$$

$$b = f = 6.$$



Für *b* und *f* sind keine logischen Schaltungen erforderlich. Diese Schaltungsausgänge verbinden wir direkt mit dem Eingang 6. Die Funktion für *d* lautet schließlich

$$d = 2 + 4 + 6.$$

Bild 325 zeigt die gesamte Kodierschaltung. Eingang 5 wird nicht benötigt. Sollten wir auf die Variante 2 verzichten, kann deshalb auch in der Dekodierschaltung das UND-Glied für die dezimale 5 eingespart werden.

Die Bauelemente der NOR-Schaltungen nach Bild 284 (s. auch Bild 277) haben folgende Werte: R_1 (ein- bzw. dreimal) = $10\text{ k}\Omega$, $R_2 = 5,6\text{ k}\Omega$, $R_3 = 4\text{ k}\Omega$, 3 Miniplasttransistoren aus unserer Tüte 2 ($50 < B < 75$).

Über den Aufbau der Kodierschaltung (CD) geben die Bilder 326 und 327 Auskunft. Die Funktionsprüfung nehmen wir im Vergleich mit der letzten

Bild 325. Kodierschaltung dezimal-Würfelaugen

Bild 326. Aufbau unserer Kodierschaltung CD

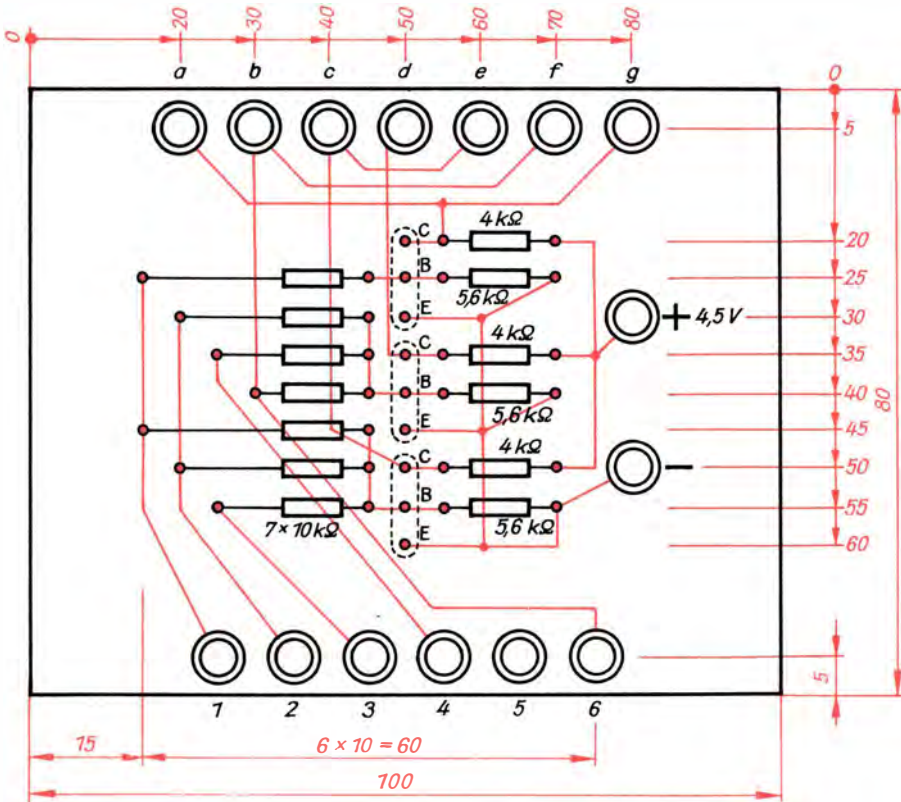


Bild 327. Ansicht der Kodierschaltung



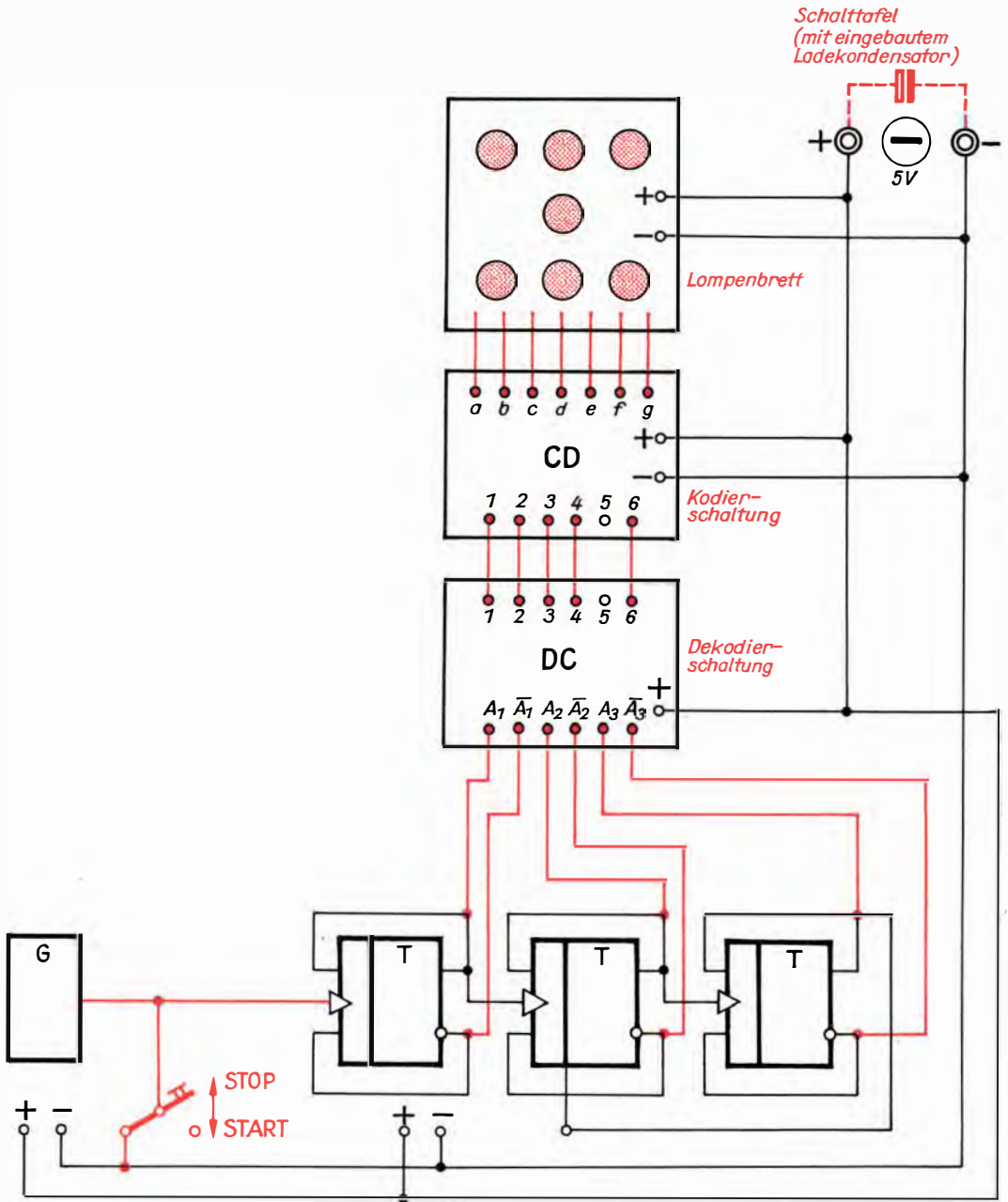
Tabelle vor. Wir schließen eine Flachbatterie an und legen ihren Pluspol (L-Signal) zusätzlich der Reihe nach an die Eingangsbuchsen 1 bis 6. Für jeden Fall kontrollieren wir die an den Ausgangsbuchsen a bis g liegenden Spannungen. Wir können dazu einen Spannungsmesser oder eine Glühlampe mit Lampenstromverstärker verwenden. Für die 1 darf nur an d L-Signal liegen, die Spannungen an den übrigen Ausgängen a bis c und e bis g dürfen höchstens 1 V betragen. Für die 6 muß die Prüflampe an allen Ausgängen, ausgenommen an d, leuchten.

Nun schalten wir nach Bild 328 die dritte Variante unseres elektronischen Würfels. Im Vergleich zu Bild 322 ist zwischen der Dekodierschaltung und dem Lampenbrett die Kodierschaltung angeordnet. Die Spannung entnehmen wir jetzt zwei parallelgeschalteten 4,5-V-Batterien oder am besten der Schalttafel. Schon allein die Anzeigelampen nehmen (z. B. beim Würfeln der 5) $8 \cdot 0,07 \text{ A} = 0,56 \text{ A}$ auf (5 »Augenlampen« und 3 Zählerlampen). Hier ist Batteriebetrieb auf die Dauer unwirtschaftlich. Den unbedingt erforderlichen Ladekondensator ($2000 \mu\text{F}/25 \text{ V}$) hatten wir schon bei den Versuchen zum NF-Verstärker II eingebaut. Am Spannungswähler der Schalttafel stellen wir 5 V ein.

Zur Kontrolle schalten wir den Taktgenerator auf Langsamtakt, löschen die Zählerstufen und starten. Der Reihe nach müssen nun die einzelnen Augenkombinationen 6 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 aufleuchten. Zum Spiel selber schalten wir wieder auf Schnelltakt. Die letzte Variante unseres elektronischen Würfels zeigt Bild 329.

So wie unser Lampenbrett die Augenzahl anzeigt, müssen im Ausgabefeld eines elektronischen Rechners *Dezimalziffern* erscheinen. Dazu werden 7 Glühlampen (oder andere elektronische Lichtquellen) entweder in Lichtkästen nach Bild 330a eingebaut und »Ziffernbalken« ausgeleuchtet, oder man ordnet 13 Lampen nach Bild 330b an. Die Ansteuerfunktionen für die einzelnen Ziffern werden aus Tabellen abgelesen. Mit Lampenfeldern entsprechend Bild 330b lassen sich auch die *Buchstaben* des Alphabets darstellen.

Bild 328. Vollständige Schaltung des elektronischen Würfels



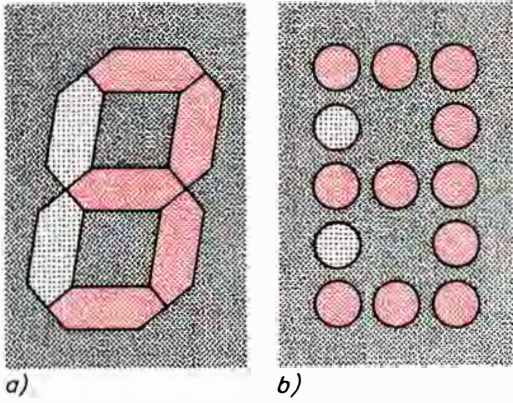
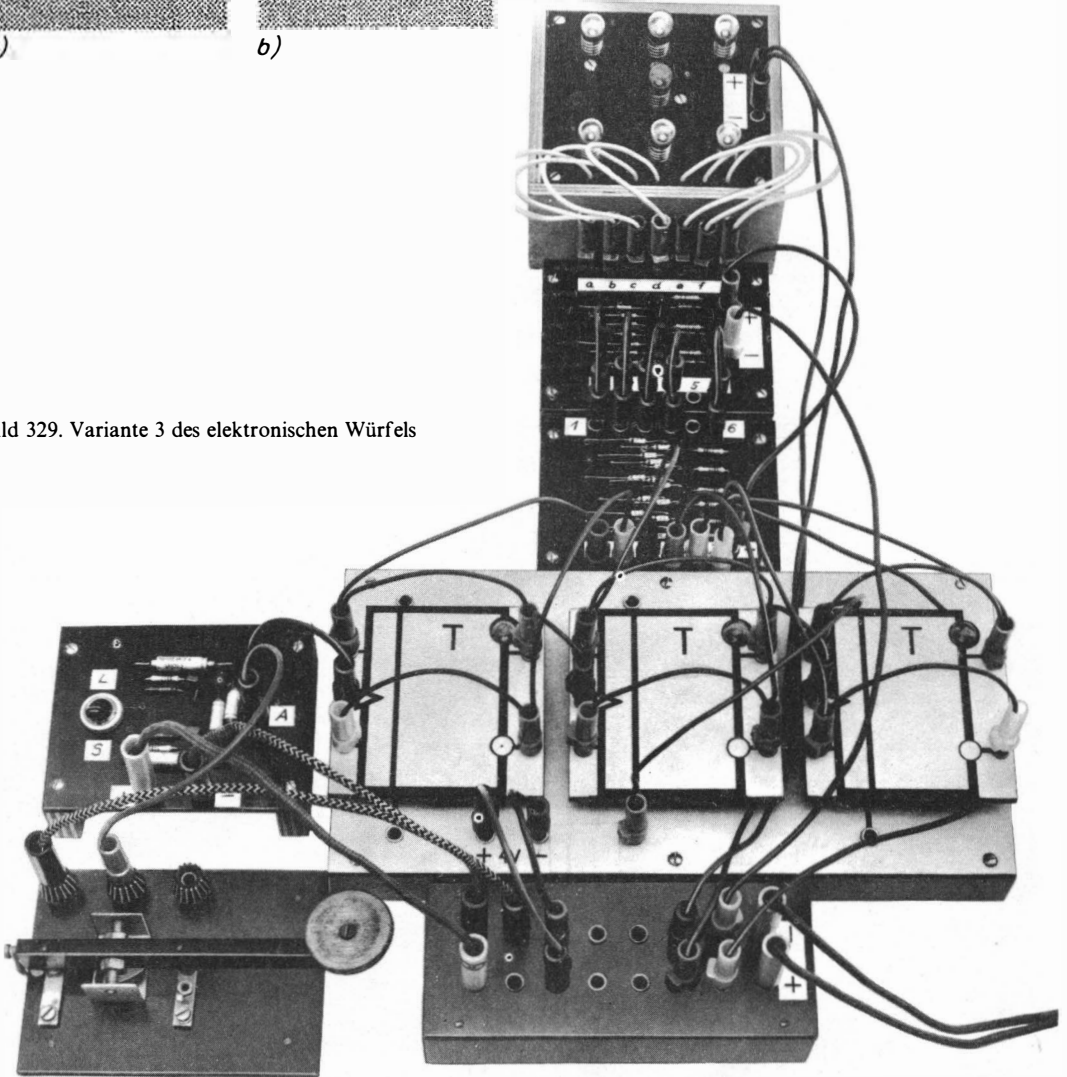


Bild 330. Darstellungsmöglichkeiten von Dezimalziffern (im Bild wird die 3 angezeigt)

Bild 329. Variante 3 des elektronischen Würfels



Eine Haupt- entwicklungsrichtung: Die Mikroelektronik

Der Aufwand an Bauelementen für die letzte Variante unserer digitalen Würfelanlage ist merklich höher als beispielsweise für unsere Radios. Auf diesen Umstand haben wir bereits zu Beginn des Abschnittes »Rechnen und Zählen« verwiesen. Er kennzeichnet die Digitalelektronik. Deshalb liegt es in der Natur der Sache, nach neuen, effektiveren technologischen Realisierungsmöglichkeiten elektronischer Schaltungen zu suchen. So wie die Halbleiterbauelemente im vergangenen Jahrzehnt die Elektronenröhre abgelöst haben, werden jene wiederum – und dieser Prozeß ist bereits in vollem Gange – von der *integrierten mikroelektronischen Schaltung* verdrängt. Wenn wir auch bei unseren Experimenten keine integrierten Schaltkreise verwendet haben, so soll eine abschließende Bemerkung zur Mikroelektronik doch zur Abrundung des Wissens über die Elektrotechnik mit beitragen.

Der wesentliche technologische Gedanke des Übergangs von der »klassischen« Elektronik mit einzelnen Bauelementen zur Mikroelektronik ist folgender:

Für den Aufbau einer Schaltung werden viele Widerstände, Dioden und Transistoren benötigt. Die Halbleiterbauelemente werden vom Hersteller zuerst gemeinsam auf einer dünnen Halbleiterscheibe, dem *Substrat*, gefertigt und anschließend getrennt. Der Anwender muß sie dann, gemeinsam mit anderen Bauelementen, wieder zusammenlöten. Bei einer mikroelektronischen Schaltung werden dagegen alle benötigten Bauelemente gleichzeitig auf dem Substrat hergestellt, und zwar in folgenden Schritten:

1. *Epitaxie:*

Auf dem hochohmigen, p-leitenden Substrat läßt man bei über 1000 °C aus der Dampfphase eine n-leitende Schicht aufwachsen, die die gleiche Kristallstruktur wie das Grundsubstrat hat (Bild 331a).

2. *Diffusion* von p- oder n-Gebieten durch je eine *Maske:*

Das erwärmte, jedoch nicht geschmolzene epitaxierte Substrat wird einer Atmosphäre ausgesetzt, die mit gasförmigem *Dotierungsmaterial* angerei-

chert ist. In Abhängigkeit von Temperatur und Zeit dringen die *Störatome* verschieden tief in die Exitaxieschicht ein. Zunächst werden in die n-Schicht zusammenhängende p-Gebiete bis zum p-leitenden Grundmaterial eindiffundiert. Dadurch entstehen »isolierte Inseln« in der n-Schicht, in denen anschließend entweder je ein Transistor oder gleichzeitig mehrere Widerstände eingebracht werden können (Bild 331b). Eine zweite Diffusion schafft in den Inseln dort p-Gebiete, wo Widerstände oder Basisgebiete von Transistoren vorhanden sein müssen (Bild 331c). Mit der letzten Diffusion erfolgt der Einbau von n-leitenden Emitterzonen in die Basisgebiete (Bild 331d).

3. *Kontaktierung:*

Durch eine Maske werden die metallischen *Anschlußkontakte* der Transistoren (Bild 331e) und Widerstände (Bild 331f) aufgedampft.

4. *Leitersystem:*

Nun erfolgt das Aufdampfen der metallischen *Verbindungsleitungen* zwischen den einzelnen Anschlußkontakten. Zum Schluß werden die Schaltungs-Ein- und -Ausgänge mit den Anschlußfahnen des Bausteins verbunden.

Die Herstellung einer integrierten Schaltung ist nicht viel aufwendiger als die eines einzigen Transistors. Das ist ein Vorteil. Ein zweiter ergibt sich aus der winzigen Größe der integrierten Bauelemente, die im wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt wird:

erstens von der technisch möglichen Strichbreite d (Bild 332) und zweitens von der Strombelastung.

Wir wissen, daß durch einen Leiterquerschnitt nur ein bestimmter Strom fließen darf, wenn sich der Leiter nicht unzulässig erwärmen soll. Laut Tabelle 4 wird für einen Strom von 0,01 A ein Querschnitt von 0,002 mm² gebraucht. Daraus be-

rechnen wir eine Stromdichte $J = \frac{I}{A} = \frac{0,01 \text{ A}}{0,002 \text{ mm}^2}$

$= 5 \text{ A/mm}^2$. Nehmen wir beispielsweise einen Emitter-

strom $I_E = 1 \text{ mA}$ an, dann muß die Emitterfläche $A_E = \frac{I_E}{J} = \frac{10^{-3} \text{ A}}{5 \text{ A/mm}^2} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$

$= 200 \mu\text{m}^2$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$) »groß« werden. Für eine Emitterlänge von $l_E = 10 \mu\text{m}$ (Strichbreiten von $d = 1 \mu\text{m}$ sind technisch möglich) muß der

Emitter $b_E = \frac{A_E}{l_E} = \frac{200 \mu\text{m}^2}{10 \mu\text{m}} = 20 \mu\text{m}$ breit werden.

Nach Bild 332a ergibt sich mit $d = 1 \mu\text{m}$ eine Breite von $B = 20 \mu\text{m} + 8 \mu\text{m} = 28 \mu\text{m}$ und eine

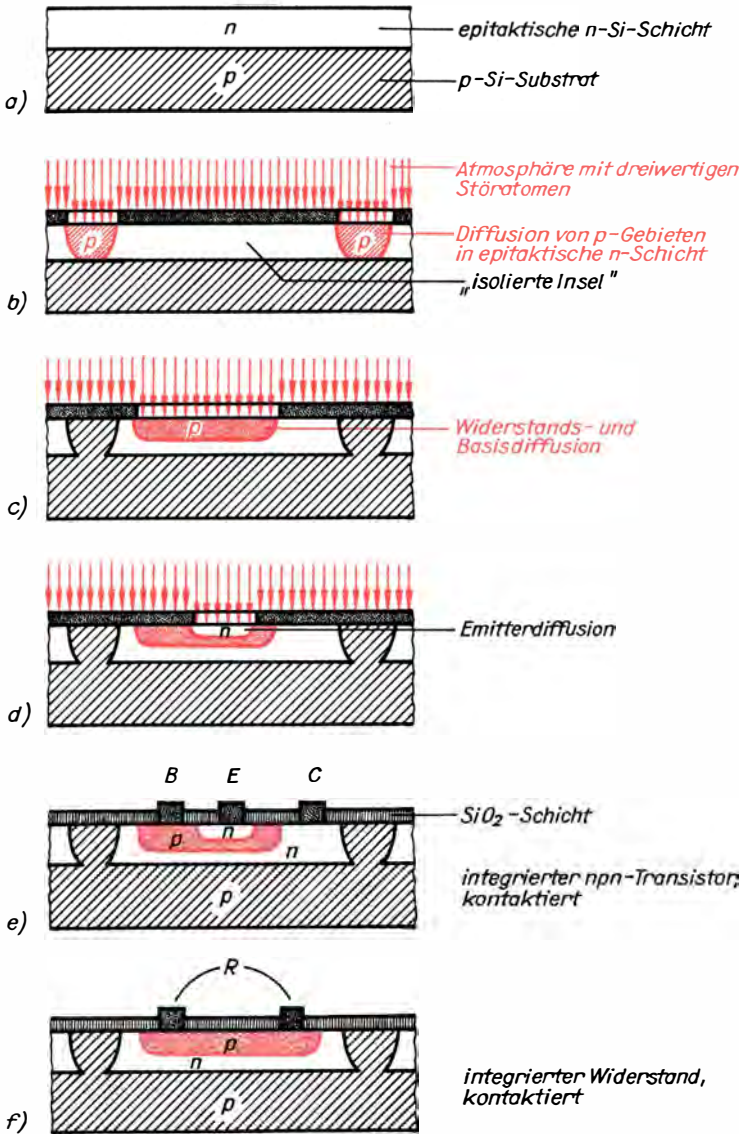


Bild 331. Schrittfolge zur Herstellung integrierter Bauelemente

Länge von $L = 10\mu\text{m} + 4\mu\text{m} = 14\mu\text{m}$. Der Flächenbedarf für einen Transistor beträgt demnach $A = L \cdot B = 14\mu\text{m} \cdot 28\mu\text{m} \approx 400\mu\text{m}^2$. Nimmt man weiter an, daß etwa 25% der Fläche für die Schaffung der »isolierten Inseln« benötigt werden, können auf 1mm^2 Substrat $n = \frac{1\text{mm}^2}{500\mu\text{m}^2} = 2000$ Transistoren integriert werden! Diese Zahl verdeutlicht

wohl, welche Präzision von der Technologie der Maskenherstellung und der gesamten Schaltkreisproduktion gefordert wird.

Auf Grund der geringen Abmessungen wird selbst für hochintegrierte Schaltungen nur wenig Material benötigt (kleines Volumen, geringe Masse), viele Lötstellen entfallen (das erhöht die Zuverlässigkeit ganz enorm), und der Strombedarf wird minimal.

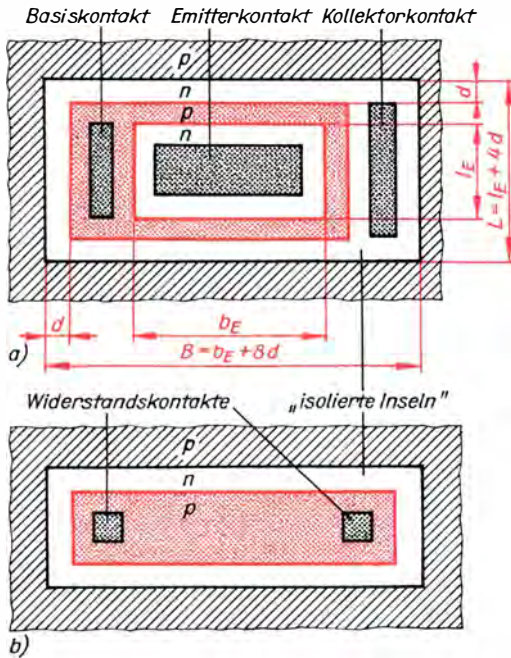


Bild 332. Integrierter Transistor (a) und Widerstand (b) in Draufsicht

Die moderne Mikroelektronik bietet somit ganz wesentliche Voraussetzungen zur weiteren *Intensivierung* aller Bereiche der materiellen Produktion. Mikroelektronische Steuerungs- und Regelungseinrichtungen werden künftig auch dort einsetzbar sein, wo die klassische Elektronik nur sehr aufwendige und damit oft uneffektive Möglichkeiten bot. Das betrifft industrielle Großanlagen ebenso wie die elektrischen Geräte unseres Haushalts.

Einige Bemerkungen zum Schluß

Wir sind am Ende des Buches angelangt, lieber Leser. Die Verfasser danken Ihnen für Ihre Mühe und Sorgfalt beim Basteln der vielen Modelle und hoffen, daß Sie dabei Erfolg hatten und einen Teil der Elektrotechnik wirklich selbst erlebt haben.

Erleben bedeutet: nicht nur mit den Sinnen aufnehmen, sondern auch geistig in Besitz nehmen und sich herzlich freuen, daß es gut gelungen ist! Auf solche Weise »mit Leib und Seele« oder »mit Herz und Verstand« angeeignetes Wissen hält sich lange, und man kann es zu eigenem und zu anderer Nutzen immer wieder anwenden. Statt sich abzunutzen, wird es immer sicherer, umfangreicher, besser.

Physik ist nicht die Natur selbst, sondern die Art, wie wir sie erforschend betrachten. Sie wissen, lieber Leser, daß wir sie gern als die Lehre von der *Umwandlung der Energie* aus einer Form in eine andere betrachten. Das haben Sie selbst getan: mechanische, chemische, Licht- und Wärmeenergie in elektrische Energie verwandelt und umgekehrt. Dabei ist uns ganz klar geworden, daß wir niemals und nirgendwo irgendeine Energie selber neu erzeugt und daß wir sie ebensowenig (im üblichen Sinne) verbraucht, das heißt vernichtet haben. Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie bleibt die Summe aller Energien stets unverändert. Begriffe wie Stromerzeuger und Stromverbraucher sind daher genaugenommen falsch; aber sie haben sich in der Technik eingebürgert wie so manches überflüssige und manchmal sogar falsch gebildete Fremdwort (beispielsweise das Wort »Transformator«, das auch wir, weil in der technischen Literatur so üblich, anstatt des eigentlich richtigen Begriffes »Umspanner« verwendet haben.

Bei jeder Bewegung verwandelt sich ein Teil der Energie in unerwünschte (weil für uns nutzlose) Reibungswärme; das haben auch wir nicht verhindern können. Selbst die Industrie kann keinen Wirkungsgrad 1 bzw. 100 Prozent erreichen – wenn sie auch oft wesentlich näher als wir an den Idealfall herankommt. Noch schlimmer ist es mit den Verlusten bei Strahlungen und Feldern, das haben wir ebenfalls selbst erlebt.

Im Literaturverzeichnis sind Bücher und Zeitschriften enthalten, die einige – aus Platzgründen kurzgehaltene – Abschnitte noch ergänzen können. Es ist außerordentlich wichtig, und das vorliegende Buch möchte dazu beitragen: nur das zu bauen, was in seiner physikalischen Wirkungsweise ganz und gar verstanden ist. Nur dann lohnt sich die Mühe, und nur dann wird der vielfältige und wechselseitige *Zusammenhang zwischen Physik und Technik* offenbar. Sie werden es selbst erlebt haben, lieber Leser, daß Sie dann auch selbständiger arbeiten und gelegentlich über die – mehr als Anregung und Bei-

spiel denn als Rezept gedachten – Bauanleitungen hinausgehen konnten zu eigenen Konstruktionen. Gerade das lag den Verfassern sehr am Herzen.

Sollten Sie in diesem Buch auf Fehler oder Möglichkeiten einer besseren Lösung gestoßen sein, so schreiben Sie das bitte an den Verlag; jede Anregung wird dankbar begrüßt werden!

Ein besonderer Dank gebührt den Herren Dr. Fritz Anacker, Prof. Dr. Helmut Claussnitzer, Oberingenieur Georg Lottmann und Prof. Dr. Karl Werner für ihre kritische Durchsicht des Buches.

Prof. Dr. paed. Dipl.-Ing. Hans Backe

Dr. sc. paed. Lothar König

Auswahl empfehlenswerter Literatur

- Ausborn, W.: Elektronik-Bauelemente. 6. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1979
- Autorenkollektiv: Bastelbuch für Modellelektronik. – Berlin: Deutscher Militärverlag 1970
- Autorenkollektiv: Elektronisches Jahrbuch für den Funkamateuer. Herausgegeben von K.-H. Schubert. – Berlin: Militärverlag der DDR, ab 1965
- Backe, H.: Physik selbst erlebt. 5. Aufl. – Leipzig, Jena, Berlin: Urania-Verlag 1977
- Backe, H.: Rund um die Physik. 2. Aufl. – Berlin: Der Kinderbuchverlag 1975
- electronica. Amateurreihe des Militärverlages der DDR. – Berlin
- Fischer, H.-J.: Transistortechnik für den Funkamateuer. 4. Aufl. – Berlin: Deutscher Militärverlag 1968
- Glaser, W., und G. Kohl: Mikroelektronik. – Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1970
- Hildebrand, S., und C. Markert: Zeichnungen und Darstellungen in der Elektrotechnik. 9. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1979
- Jakubaschk, H.: Amateurtontechnik. 2. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1975
- Jakubaschk, H.: Das große Elektronikbastelbuch. 4. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1974
- König, L.: Rundfunk und Fernsehen selbst erlebt. 4. Aufl. – Leipzig, Jena, Berlin: Urania-Verlag 1978
- Kovács, M.: Rechenautomaten und logische Spiele. – Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1970

- Kronjäger, O.: Amateuertechnik. – Berlin: Militärverlag der DDR 1973
- Löbig, H., und G. Schöne: Grundkenntnisse der Elektrotechnik. 5. Aufl. – Berlin VEB Verlag Technik 1975
- Lonze, K.: Einführung in die Elektrotechnik. – Berlin: VEB Verlag Technik 1967
- Miel, G.: Ferngesteuerte Modelle selbst gebaut. 2. Aufl. – Leipzig, Jena, Berlin: Urania-Verlag 1979
- Möschwitzer, A.: Elektronische Halbleiterbauelemente. 3. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1979
- Rumpf, K. H.: Bauelemente der Elektronik. 9. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1979
- Rumpf, K.-H., und M. Pulvers: Transistor-Elektronik. 7. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1979
- Schlenzig, K., und R. Oettel: Das große Bauplan-Bastelbuch. – Berlin: Militärverlag der DDR 1976
- Schubert, K.-H.: Das große Radiobastelbuch. 4. Aufl. – Berlin: Militärverlag der DDR 1974
- Semrad, H., und W. Otto: Grundlagen der Elektronik. 7. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1976
- Streng, K.: abc der Stromversorgungstechnik. – Berlin: Deutscher Militärverlag 1971
- Wahl, R.: Elektronik für Elektromechaniker. 7. Aufl. – Berlin: VEB Verlag Technik 1979

Zeitschriften

- Funkamateuer
Jugend und Technik
radio – fernsehen – elektronik
technikus
Urania
Wissenschaft und Fortschritt

Tabellenanhang

Tabelle 1. Werte der Maniperm-Magneten für unsere Geräte

Gerät	Anzahl	Axial magnetisierte Dauermagnetscheiben		
		Dicke in mm	Durch- messer in mm	Bohrung in mm
Elektrische Maschine I	5	6	25	6,2
Galvanometer	4	6	12,5	–
Drehspul- Meßgerät	3	6	25	–
Fernhörer	4	6	20	–
Lautsprecher	1	11,5	80	40

Tabelle 2. Zusammenstellung der elektronischen Bauelemente für unsere Geräte

Geräte und Experimente	Anzahl	Art	Elektronische Bauelemente			Höchstwerte			
			Typ	Bau- form	U_{sp} in V	I_d in mA	U_{CE} in V	I_C in mA	P in mW
Schalttafel	4	Ge-Diode	GY 111	3	40	1000			
Schwenkstab	1	Glimmlampe	S 51/10S		90°				
	1	Si-Diode	SY 202	5	200	1000			
Dioden-Kennlinien	1	Ge-Diode	GY 099	2	12	100			
	1	Si-Diode	SY 200	5	75	1000			
Transistor- Kennlinien	1	Ge-pnp-Trans.	GC 121	7			20	150	120*
	1	Si-npn-Trans.	SF 121	10			20	100	600
Einstufiger Verstärker	1	Ge-pnp-Trans.	GC 121	7			20	150	120*
	1	Ge-pnp-Trans. T_1	GC 100	7			15	15	30
NF-Verstärker I	1	T_2	GC 116	7			20	150	120*
	1	T_3	GC 121	7			20	150	120*
	1	Ge-pnp-Trans. T_1	GC 100	7			15	15	30
NF-Verstärker II	1	T_2	GC 121B	7			20	150	120*
	1	T_3	GD 175B	8			48	3000	5300*

Geräte und Experimente	Anzahl	Art	Elektronische Bauelemente			Höchstwerte			
			Typ	Bauform	U_{sp} in V	I_d in mA	U_{CE} in V	I_C in mA	P in mW
Diodenempfänger	1	Ge-Diode	GA 100	1	20	20			
HF-Verstärker	1	Ge-pnp-Trans.	GF 105	7			15	15	30
Versuch mit Fotodiode	1	Ge-Fotodiode	GP 120	6	20	3 ⁺⁺			30
Lichtempfänger	1	Ge-Fotodiode	GP 120	6	20	3 ⁺⁺			30
	1	Ge-pnp-Trans.	GC 100	7			15	15	30
Relaisverstärker	1	Fotowiderstand	CdSKG						
	2	Ge-pnp-Trans.	GC 123	7			66	150	120*
UND-Schaltung	2	Ge-Diode	GA 100	1	20	20			
ODER-Schaltung	2	Ge-Diode	GA 100	1	20	20			
NICHT-Schaltung	1	Si-npn-Trans.	SF 215	9			15	100	200
Lampenstromverstärker	1	Si-npn-Trans.	SF 121	10			20	100	600
	20	Ge- oder	GA 100	1	20	20			
Logische Schaltungen		Si-Diode	SAY 30	4	25	30			150
	20	Si-npn-Trans.	SF 215 ¹⁾	9			15	100	200
	12	Si-npn-Trans.	SF 121 ²⁾	10			20	100	600

Zeichenerklärungen:

Ge : Germanium

Si : Silizium

U_{sp} : Sperrspannung

I_d : Durchlaßstrom

U_{CE} : Kollektorspannung

I_C : Kollektorstrom

P : Verlustleistung

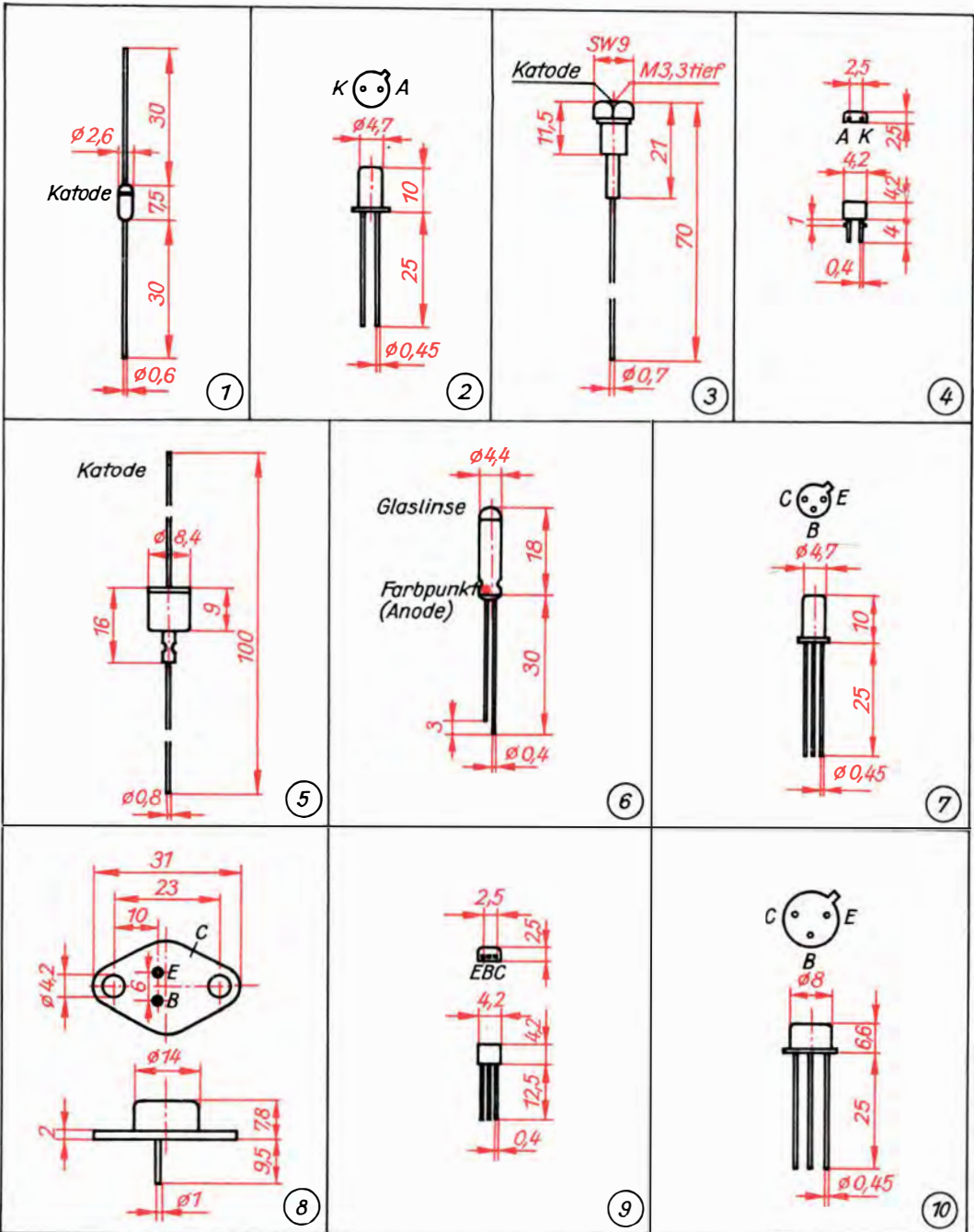
+ : Zündspannung

++ : Hellstrom

* : mit Kühlblech

1) Bastlerbeutel 6 mit 20 Si-Miniplasttransistoren

2) Bastlerbeutel 7 mit 12 Si-Transistoren im Metallgehäuse



Material	spezifischer elektrischer Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Kupfer	0,0175
Aluminium	0,0285
Messing	0,080
Nickel	0,07
Eisen	0,115
Nickelin	0,40
Manganin	0,43
Konstantan	0,50
Tantal	1,10

Tabelle 3. Spezifischer elektrischer Widerstand verschiedener Materialien (bei einer Temperatur von 20°C)

Tabelle 4. Technische Daten von Kupferdrähten

Blanker Draht		Lack- isolierter Draht	Daten für 1 m		Drahtlänge für 1 Ω	Größe zulässige Strom- stärke in A für einen	
Durchmesser in mm	Querschnitt in mm ²	Durch- messer in mm	Widerstand in Ω	Masse in g	in m	freien Draht	Draht in der Spule
0,05	0,002	0,07	8,91	0,018	0,112	0,01	0,005
0,08	0,005	0,10	3,48	0,045	0,287	0,02	0,013
0,10	0,008	0,12	2,23	0,070	0,449	0,04	0,020
0,15	0,018	0,17	0,99	0,158	1,010	0,08	0,045
0,20	0,031	0,23	0,56	0,280	1,795	0,15	0,080
0,25	0,049	0,28	0,36	0,438	2,805	0,20	0,125
0,30	0,071	0,33	0,25	0,630	4,039	0,35	0,180
0,35	0,096	0,38	0,18	0,858	5,498	0,45	0,245
0,40	0,126	0,43	0,14	1,12	7,181	0,60	0,320
0,45	0,159	0,48	0,11	1,42	9,088	0,75	0,405
0,50	0,196	0,53	0,09	1,75	11,12	0,80	0,500
0,55	0,238	0,59	0,074	2,12	13,58	1,00	0,605
0,60	0,283	0,64	0,062	2,52	16,16	1,35	0,720
0,70	0,385	0,74	0,045	3,43	21,99	1,65	0,980
0,80	0,503	0,84	0,035	4,48	28,72	2,40	1,280
0,90	0,636	0,94	0,028	5,67	36,35	3,20	1,620
1,00	0,785	1,04	0,022	7,00	44,88	4,20	2,000

Tabelle 5. Widerstand und größte zulässige Stromstärke von 1 m verschiedener Widerstandsmaterialien

Durchmesser in mm	Widerstandswerte in Ω/m für Drähte aus					Größte zulässige Strom- stärke in A für einen freien Draht Draht in der Spule	
	Eisen	Aluminium	Nickelin	Manganin	Konstantan	freien Draht	Draht in der Spule
0,05	66,1	15,3	204	219	255	0,03	0,02
0,08	25,8	5,9	79,5	86,5	99,5	0,05	0,03
0,10	16,5	3,8	50,5	54,7	63,7	0,1	0,06
0,15	7,4	1,7	22,6	24,3	28,2	0,2	0,12
0,20	4,12	0,96	12,7	13,7	15,9	0,3	0,18
0,25	2,64	0,91	8,1	8,4	10,2	0,4	0,22
0,30	1,84	0,43	5,65	6,08	7,07	0,6	0,35
0,35	1,35	0,31	4,15	4,46	5,20	0,7	0,40
0,40	1,03	0,24	3,18	3,42	3,98	0,9	0,50
0,45	0,82	0,19	2,52	2,70	3,14	1,0	0,60
0,50	0,66	0,14	2,04	2,19	2,55	1,2	0,70
0,55	0,55	0,12	1,68	1,81	2,10	1,4	0,80
0,60	0,46	0,10	1,41	1,52	1,77	1,6	1,00
0,65	0,39	0,09	1,22	1,30	1,51	1,8	1,20
0,70	0,34	0,08	1,04	1,12	1,30	2,0	1,30
0,75	0,29	0,07	0,91	0,98	1,13	2,2	1,45
0,80	0,26	0,06	0,80	0,86	0,99	2,5	1,60
0,90	0,20	0,04	0,63	0,68	0,79	3,5	1,80
1,00	0,17	0,035	0,51	0,55	0,64	4,5	2,20

Sachwörterverzeichnis

A

Ablaufsteuerung 185
 Absetzen eines Wellenendes 49
 Adapter, Telefon- 173
 Akkumulator 36
 Alarmeinrichtung, Modell einer 212
 Allgemeine Bauteile 18
 Ampere 103
Ampère, André Marie 40
 Amperewindungszahl 41
 Analoges Signal 196
 Analyse 98
 Anker 43, 88
 Anker des Relais 93
 Anker des Telegrafens 128
 Anode 38, 155
 Antenne 174
 Antrieb des Morseschreibers 134, 135
 Arbeit, elektrische 42
 Arbeitsgebiete der Elektrotechnik 9
 Arbeitspunkt 162
 Arbeitspunkt, Einstellen des 165, 172
 Atom 155
 Atomdefekt 155
 Aussage 197
 Aussagenverbindung 198
 Ausschalter 78, 87
 Außenpol, magnetischer 17, 41
 Außenpolmaschine 43, 52, 73
 Automatische Regelung 187
 Automatisierung 185

B

Bardeen, John 10, 160
 Basis 160
 Basisschaltung 162
 Basisstrom 160
 Batterie 36, 37
 Bauteile, allgemeine 18
 Bedingungsspeicher 185
Bell, Graham 137
 Berechnen der Drahtlänge 29, 74
 Berechnen der Durchflutung 41

Berechnen der Energie 43
 Berechnen der Gleichstromverstärkung 161, 204
 Berechnen der Größe eines integrierten Transistors 238
 Berechnen der Impedanz 166
 Berechnen der Kosten für Elektroenergie 43
 Berechnen der Kollektorschaltung 203
 Berechnen der Leistung 26, 42
 Berechnen der Löcherdichte im n-Halbleiter 157
 Berechnen der Spannung 33, 37, 80
 Berechnen der Windungszahl 29, 99, 171
 Berechnen des Arbeitspunktes einer Verstärkerstufe 162
 Berechnen des Experimentiertrafos 99
 Berechnen des Innenwiderstandes 35
 Berechnen des Nebenwiderstandes 123
 Berechnen des Stromes 26, 33, 38, 80
 Berechnen des Spannungsverlustes auf Fernleitungen 80
 Berechnen des Stromverstärkungsfaktors 161
 Berechnen des Vorwiderstandes 123
 Berechnen des Widerstandes 28, 33, 34, 35, 80, 105
 Berechnen von Netzmaschen 75, 76
 Berührungsspannung 193
 Bimetallstreifen 86
 Blinkrelais 87
Brattain, Walter 10, 160
Braun, Karl-Ferdinand 154
 Bürsten siehe Stromabnehmer

C

Charakteristik der Gleichstrommotoren 71

Chemie 36
 Computer, Bausteine eines 215

D

Dämmerungsschalter 192
 Dämpfung der Zeigerbewegung 106, 113
 Daniell-Element 36
 Datentechnik 9, 185
 Dauermagnet 48, s. a. keramische Magnete
 Dauermagnetsystem des Lautsprechers 152
 Defektelektron 155
 Dekodierschaltung 227
 Demodulator 176
 Detektor 154, 174
 Dezimalsystem 199
 Diffusion 160
 Digitales Signal 196
 Digitalelektronik 196
 Digitaluhr 231
 Diode 101, 154
 Diode, Flächen- 155
 Diode, Foto- 182
 Diode, Spitzen- 154
 Diodenempfänger 177
 Diodenkennlinie 158
 Dioden-Transistor-Logik 206
 Disjunktion 198, 199
 Doppel-T-Läufer 58
 Dotieren 156
 Dreheisen-Meßgerät, Meßwerk des 109
 Dreheisen-Meßgerät, Universal- 107
 Dreheisen-Meßgeräte 26
 Drehkondensator 177
 Drehmagnetsystem des Galvanometers 105
 Drehspul-Vielfach-Meßgerät 115
 Drehspul-Vielfach-Meßgerät, Meßsystem des 116
 Drehspule des Drehspul-Meßgerätes 118
 Drehsystem des Dreheisen-Meßgerätes 111

Drehzahl 71, 103
 Dualsystem 200
 Dualzahl 200
 Dualzähler 222
 Dunkelstrom 182
 Durchflutung, magnetische 41
 Durchlaßfall 159
 Durchlaßstrom 158
 Dynamoelektrisches Prinzip 70
 Dynamomaschine 42, 70

E

Effekt, lichtelektrischer 182
 Effekt, thermoelektrischer 193
 Eichen des Dreheisen-Meßgerätes 114
 Eichen des Galvanometers 106
 Eichen eines Spannungsmessers 27
 Eichen eines Strommessers 27
 Eigenleitung 156
 Eigenleitungsdichte 156
 Einstellen des Arbeitspunktes 165, 172
 Elektrische Arbeit 42
 Elektrische Leistung 42
 Elektrische Maschine, große 55
 Elektrische Maschine, kleine 43
 Elektrode 36
 Elektrodynamisches Prinzip 42
 Elektroenergie 13, 36, 38, 42, 74, 82
 Elektrolyt 36
 Elektromagnet 38, 40, 48, 88, 91, 128
 Elektromagnetismus 38, 40
 Elektromotor 50, 54, 67, 70, 71
 Elektromotorisches Prinzip 40, 42
 Elektronendefekt 155
 Elektronendichte 156
 Elektronenpaar 156
 Elektronenröhre 10, 238
 Elektronenüberschuß 156
 Elektronenwanderung 155
 Elektronik 10
 Elektronischer Würfel 222
 Elektroteile 11
 Elementarinformation 218
 Elementarschaltung, logische 209
 Emitter 160

Emitterschaltung 162
 Empfänger, Licht- 182
 Empfänger, Rundfunk- 180
 Energie, elektrische 42
 Energieanwendungstechnik 9, 81
 Energieerzeugungstechnik 9, 12
 Energieverteilungstechnik 9, 74
 Entschlüsselung 226
 Epitaxie 238
 Erdung 174
 Ergebnisregister 215
 Erzeugung der elektrischen Energie 13
 Experimentier-Transformator 99

F

Faraday, Michael 10, 40
 Fehlstelle 155
 Feldlinien 38, 39
 Fernhörer 138
 Fernhörer, Prüfen des 139
 Fernschalter 90
 Fernschaltrelais 90, 136
 Fernsprechanlage 137
 Fernsprecher, Lichtstrahl- 183
 Fernsprecher, Prüfen des 146
 Fernsprecher, Rufschalter des 144
 Fernsprecher, Umschalter des 145
 Fernsprechstellen 143
 Ferritantenne 181
 Ferritstab 177
 Festwertregelung 187
 Feuermelder 195
 Flachbatterie 38
 Flächendiode 155
 Flip-Flop 218
 Folgeregelung 187
Forest, Lee de 10
 Fotodiode 182
 Fotoelement 188
 Fotowiderstand 187
 Freies Elektron 155
 Fremderregung 43, 52, 70
 Frequenz 103, 177
 Frontplatte der Schalttafel 24
 Führungseinrichtung 186
 Führungsgröße 186
 Führungssteuerung 185
 Funktionsgruppe 215
 Funkwelle 174

G

Galvanisches Element 36
 Galvanometer 103
 Gasanzünder 81
 Gegenbetrieb zweier Telegrafestationen 136
 Generator siehe Spannungserzeuger
 Germanium 155
 Gitter, Kristall- 155
 Gleichrichter 21, 175
 Gleichrichtung 66, 101
 Gleichspannung 21, 101
 Gleichstrom 26, 33
 Gleichstromerzeuger 51, 53, 70
 Gleichstrom-Hauptschlußmotor 54, 67, 70
 Gleichstrommotor 50, 70
 Gleichstrom-Nebenschlußmotor 54, 71
 Gleichstromverstärker 191
 Gleichstromverstärkung 161, 204
 Gleitwiderstand siehe Schiebewiderstand
 Glimmlampe 25
 Graetzschaltung 21
 Große elektrische Maschine 55
 Grundbausteine eines Computers 215
 Gruppenschaltung 78

H

Halbleiter 155
 Halbleiter-Bauelemente 154
 Handregelung 186
 Hauptschluß-Gleichstromerzeuger 70
 Hauptschlußmotor 54, 67, 70, 71, 72
 Heizwendel 195
 Hellstrom 182
Hertz, Heinrich 10
 HF-Verstärker 179
 Hochempfindliches Relais 188
 Hochempfindliches Relais, Prüfen des 191
 Hochfrequenz-Verstärker 179
 Holtzsche Klemmen 36
Hughes, David Edward 137

I

I_C - I_B -Kennlinie 161
 I_C - I_{BE} -Kennlinie 161
 I_a - U_a -Kennlinie 158
 Impedanz 165
 Impulszähler 18
 Induktion 40, 41
 Induktivität 176
 Informationselektrik 9, 98
 Innenpol, magnetischer 17, 41
 Innenpolmaschine 43, 52, 73
 Innenwiderstand 35, 38
 Integrierter Schaltkreis 231, 238
 Inversionssatz 209
 Isolation 22, 45, 65
 Isolator 155

J

Joch 18
 Joule 43

K

Kabelbaum 25
Kamerling-Onnes, Heike 80
 Kapazität 102, 176
 Katode 38, 154
 Kennlinie von Dioden 158
 Kennlinie von Transistoren 161
 Keramische Magnete 48, 105, 120, 139
 Kern, Transformator- 22
 Kernbleche 17, 22
 Kilowatt 42
 Kilowattstunde 43
 Kinoschaltung 31
 Kippeschalter 20
 Kipp-Umschalter 25, 26
 Kirchhoffsche Gesetze 33, 35, 75
 Kleine elektrische Maschine 43
 Klemmenspannung 35
 Klingel 88
 Knotenpunkt 75
 Knotenpunktsatz 75
 Kodierschaltung 232
 Kohle-Zink-Element 36
 Kollektor 46, 65, 160
 Kollektor-Reststrom 160
 Kollektorschaltung 162, 203
 Kollektorstrom 160
 Kommutator siehe Stromwender

Kondensator 102
 Konjunktion 198, 199, 203
 Kopfhörer 142
 Kosten, Berechnen der 43
 Kristallbindung 155
 Kristalldetektor 154
 Kristallgitter 155
 Kühlkörper, Transistor- 170
 Kupfer-Zink-Element 36

L

Ladekondensator 102
 Ladestation 31
 Ladungsträgerverteilung 157
 Lampenbrett 31
 Lampenstromverstärker 203
 Läufer 43, 58, 63
 Lautsprecher 149
 Lautsprecher, Dauermagnet-
 system des 152
 Lautsprecher, Prüfen des 153
 Lautsprecher-Übertrager 165,
 171
 Leclanché-Element 36
 Legierungs-Transistor 159
 Leistung, elektrische 42
 Leistungselektrik 9, 12
 Leistungsmesser 103
 Leitfähigkeit 155
 Lichtelektrischer Effekt 182
 Lichtempfänger 182
 Lichtnetz 10, 20
 Lichtschranke 188, 192
 Lichtstrahl-Fernsprecher 183
Lieben, R. von 10
 Loch, positives 155
 Löcherdichte 156
 Löcherwanderung 155
 Logik 197
 Logik-Experimentiergerät
 209
 Logiksaltungen 201
 Logische Summe 201
 Logisches Produkt 201
 Löschen 218

M

Magnetfeld 38
 Magnetischer Außenpol 17, 40
 Magnetischer Innenpol 17, 40

Magnetsystem des Drehspul-Meß-
 gerätes 120
 Masche 76
 Maschensatz 76
 Maschine, große elektrische 55
 Maschine, kleine elektrische 43
Maxwell, James Clerk 10
 Megawatt 42
 Megawattstunde 43
 Meßbereiche des Dreheisen-
 Meßgerätes 114
 Meßbereiche des Drehspul-
 Meßgerätes 116, 122
 Meßbereichserweiterung 122
 Messen 98, 103
 Meßgeräte 20, 25, 26, 103, 186
 Meßgerät, Drehspul-Viel-
 fach- 115
 Meßgerät, Universal-Dreh-
 eisen- 107
 Meßgerät, Weicheisen- 26, 108
 Meßglied 186
 Meßwerk des Dreheisen-Meß-
 gerätes 109
 Meßsystem des Drehspul-Meß-
 gerätes 116
 Meßsystem des Galvano-
 meters 104
 Meßtechnik 9, 98
 Mikroelektronik 10, 160, 238
 Mikrofon 140
 Mikrofon, Prüfen des 140, 142
 Mikrofon, Tauchspul- 172
 Mikrofon-Übertragungs-
 anlage 166
 Modulation der Trägerwelle
 174
 Monozelle 38
Morse, Samuel 125
 Morsealphabet 136, 137
 Morseschreiber 127
 Morseschreiber, Antrieb des 135
 Morsetaste 125
 Morsetaste, Prüfen der 127
 Morsetelegraf 125
 Multivibrator 224

N

Nachrichtentechnik 9, 124
 NAND-Schaltung 206

Nebenschluß-Gleichstrom-
erzeuger 70
Nebenschlußmotor 54, 71, 73
Nebenwiderstand 27
Nebenwiderstände, Berechnen
der 122
Negation 198, 199
Negator 205
NF-Verstärker I 163
NF-Verstärker II 169
Nichtleiter 155
Nickelindraht 29
Niederfrequenz-Ver-
stärker 163, 169
Niederspannung 10
n-Leitung 156
Normung 10, 17, 18
NOR-Schaltung 207
nnp-Transistor 160

O

ODER-Schaltung 204
Oersted, Hans-Christian 10, 38, 40
Ohmsches Gesetz 28, 33

P

Parallelschaltung von Spannungs-
quellen 37
Parallelschaltung von Wider-
ständen 33
Peltiereffekt 193
p-Leitung 157
pn-Übergang 157
pnp-Transistor 160
Polschuh 48, 57
Potentiometer 28
Primärelement 36
Primärspule 22, 99
Prüfen 98
Prüfen der Morsetaste 127
Prüfen der Thermosäule 194
Prüfen der Wicklung 23, 45
Prüfen des Fernhörers 139
Prüfen des Fernsprechers 146
Prüfen des hochempfindlichen
Relais 191
Prüfen des Kopfhörers 143
Prüfen des Lautsprechers 153
Prüfen des Mikrofons 140, 142
Prüfen des Telegrafen 134, 135

R

Radio 174
Raum zum Basteln 11
Raumladungszone 158
Rechenmaschine 215
Rechenregister 215
Rechenwerk 216
Rechnen und Zählen 196
Rechtkant-Spulenkörper 17
Regelkreis 186
Regeln, Steuern und 185
Regelstrecke 186
Regelung der Temperatur 195
Register 215
Reihenschaltung von Spannungs-
quellen 37
Reihenschaltung von Wider-
ständen 34
Reihenschlußmotor siehe Haupt-
schlußmotor
Reis, Philipp 137
Relais 90, 188
Relais, Blink- 87
Relais, hochempfindliches 188
Resonanz 176
Rückkopplung 181
Rücksetzen 218
Rufschalter des Fern-
sprechers 144
Rundfunkempfänger 180
Rundspulenkörper 17
Rundspulenkörper mit
Flansch 17

S

Schalter 76, 198
Schalttafel 18
Schaltungsvereinfachung 227
Schieberegister 221
Schiebewiderstand 28
Schwenkstab 98
Schwenkstabversuche 100
Schwingkreis 176
Schwingung 177
Schwingung, gedämpfte 177
Schwingung, ungedämpfte 177
Schwingungskreis siehe Schwing-
kreis
Sekundärelement 36
Sekundärspule 23, 99

Sender 174
Serienschaltung 79
Setzen 218
Shockley, William 10, 160
Siebglied 102, 169
Siemens, Werner von 58, 70
Silizium 155
Spannung 33, 103
Spannungsmesser 20, 26, 27
Spannungsteiler 31
Spannungswähler 20
Speicher 218
Sperrfall 159
Sperrstrom 158
Spezifischer Widerstand 74
Spitzendiode 154
Spitzentransistor 160
Spule, Modell einer 38
Spulen-Kernbleche 17
Spulenwickel-Vorrichtung 12
Stahlmagnet 42
Ständer 43, 48, 57
Start-Stop-Schalter 231
Stator siehe Ständer
Steinheil, Karl-August 147
Stellenwert 199
Stellglied 185
Steuergeräte 186
Steuerkette 185
Steuern und Regeln 185
Steuerstrecke 185
Steuerwerk 215, 231
Störgröße 187
Störstelle 156
Störstellenleitung 156
Strom 33, 103
Stromabnehmer 46, 61, 68
Stromerzeuger 43, 51, 53, 70
Strommesser 20, 26, 27
Stromverstärkungsfaktor 161
Stromwender 53, 65
Summer 88
Supraleitung 80
Synchronmotor 53

T

Taktgenerator 223
Taktspannung 219
Taktzähler 216
Tauchspul-Mikrofon 172

Telefon siehe Fernsprecher
 Telefon-Adapter 173
 Telegraf 124
 Telegraf, Prüfen des 134, 135
 Telegrafestationen im Gegenbetrieb 136
 Temperaturfühler 195
 Temperaturregelung 195
 Temperaturschranke 192
 Thermoeffekt 193
 Thermoelement 192
 Thermosäule 193
 Thermosäule, Prüfen der 194
 Thermoschalter 84
 Tonanlagen 172
 Tonwelle 174
 Trägerwelle 174
 Trägerwelle, Modulation der 174
 Transformator siehe Umspanner
 Transistor 159
 Transistor als Schalter 206
 Transistor als Verstärker 159, 162
 Transistor-Kennlinie 161
 Transistor-Kühlkörper 170
 Transistor, Legierungs- 159
 Transistor, Spitzen- 160
 Transistor-Transistor-Logik 209
 Trennschärfe 177
 Trockenbatterie 38
 Trommelläufer 63

U

Überlandleitung 79
 Übertrager I 165
 Übertrager II 171
 Übertragungsanlage, Mikrophon- 166
 Umlaufregister 221
 Umschalter 25, 79, 88

Umschalter des Fernsprechers 145
 Umschalter für Wechselsprechanlage 167
 Umspanner 20, 22, 99
 UND-Schaltung 203
 Universal-Dreheisen-Meßgerät 107
 Universalmotor 70
 Unterbrecherkontakt 90
 Urspannung 35, 76

V

Valenzelektron 155
 Vereinfachung, Schaltungs- 227
 Verkupfern eines Kohlekegels 141
 Verschlüsselung 232
 Verstärker, Gleichstrom- 191
 Verstärker, HF- 179
 Verstärker, NF- 162, 163, 169
 Verstärker I 163
 Verstärker II 169
 Verstärkertechnik 154
 Verteilertafel 31
 Vielfach-Meßgerät, Drehspul- 115
Volta, Alessandro 9, 36
 Vorschaltwiderstand 27
 Vorwiderstände, Berechnen der 123

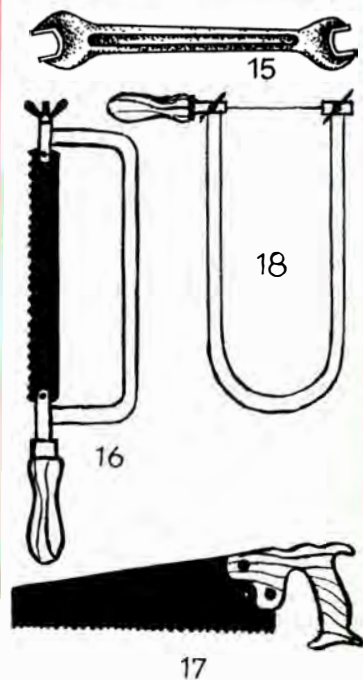
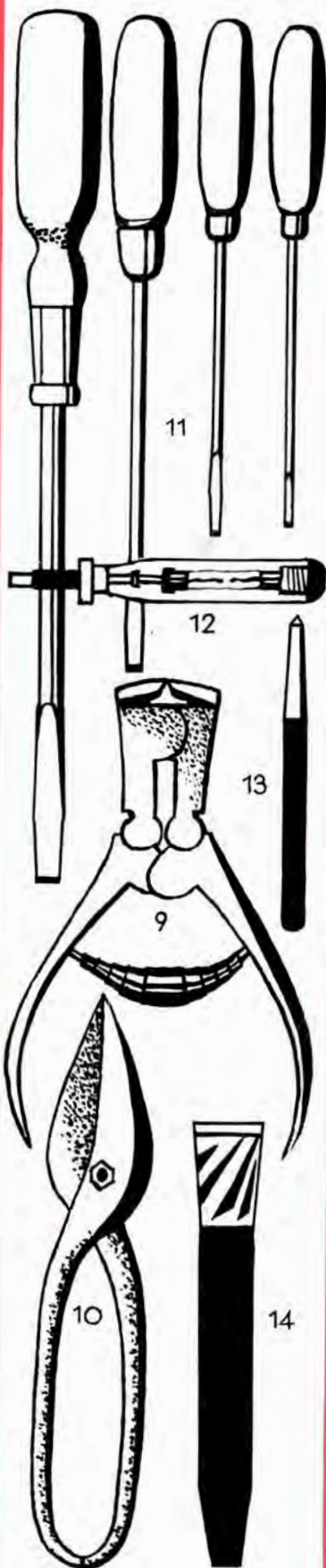
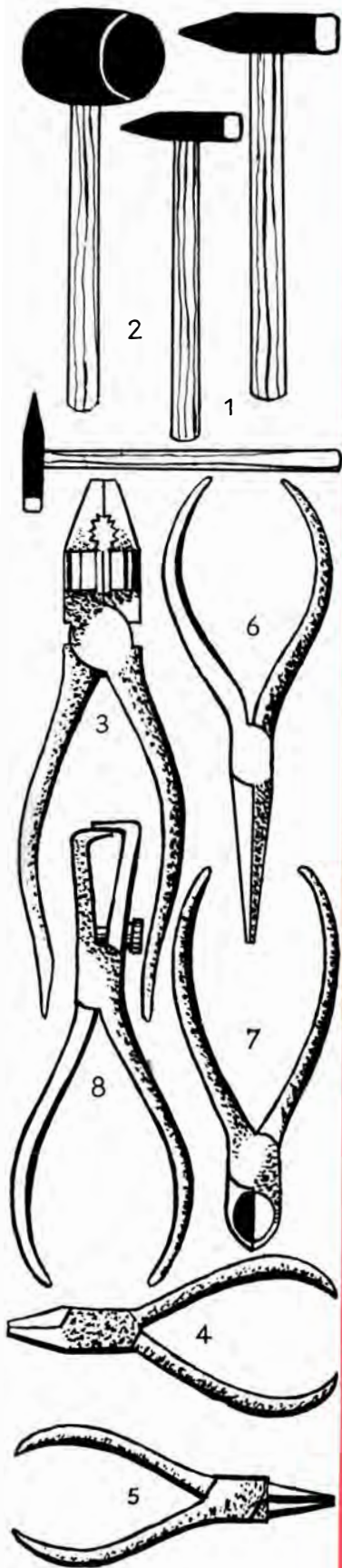
W

Wahrheitstabelle 198
 Wahrheitswert 197
 Watt 42
 Wattsekunde 43
 Wechselschaltung 79
 Wechselspannung 20, 101
 Wechselsprechanlage 167, 173

Wechselstrom 20, 26, 33
 Wechselstromerzeuger 52, 73
 Wechselstrom-Hauptschlußmotor 54, 71
 Wechselstrom-Nebenschlußmotor 71
 Weicheisen-Meßgeräte 26, 108
 Wellenlänge 177
 Werkstatt-Normen 17, 18
 Werkstoffe 11
 Werkstisch 11
 Werkzeuge 11
 Werkzeuge
 Übersicht am Ende des Buches
 Wertetabelle 201
 Wickelvorrichtung 12
 Widerstand 33
 Widerstand, innerer 35, 38
 Widerstand, spezifischer 74
 Widerstandsdraht 27, 29
 Widerstands-Transistor-Logik 209
 Wirkungen des elektrischen Stromes 81
 Wirkungen, chemische 81
 Wirkungen, magnetische 81, 88
 Wirkungen, Wärme- 81
 Würfel, elektronischer 222

Z

Zähler 221
 Zählersteuerung 233
 Zählwerk 15
 Zeiger, Herstellen des 106, 112
 Zeitplanregelung 187
 Zeitplansteuerung 185
 Zeitschalter 87
 Zifferanzeige 231, 237
 Zugsteuerung, Modell einer 213



- 1 Schlosserhämmer (150, 300 g)
- 2 Gummihammer
- 3 Kombinationszange
- 4 Flachzange 5 Rundzange
- 6 Flachzange mit langem Maul
- 7 Seitenschneider
- 8 Abisolierzange
- 9 Hebelvorschneider
- 10 Blechscher
- 11 Schraubenzieher (Schneidenquerschnitt:
0,5 × 3; 1 × 6; 1,5 × 8; 2 × 10)
- 12 Spannungsprüfer 13 Körner
- 14 Flachmeißel
- 15 Schraubenschlüssel
(6/7, 8/10, 9/11, 14/17)
- 16 Metallbügelsäge
- 17 Fuchsschwanz 18 Laubsäge
- 19 Feilen (je eine Schrupp- und eine
Schlichtfeile): Rund-, Dreikant-,
Flach- und Halbgrundfeilen
- 20 Raspel 21 Satz Nadelfeilen
- 22 Schneideisen
(M3, M4, M5, M6, M10)
- 23 Schneideisenhalter
- 24 Windeisen
- 25 Gewindebohrer
(M3, M4, M5, M6, M10)
- 26 Spannzwingen
- 27 Schraubstock
- 28 Gliedermaßstab 29 Stahllineal
- 30 Meßschieber
- 31 Anschlagwinkel
- 32 Reißnadel 33 Spitzzirkel
- 34 Spiralbohrer (1; 2; 2,5; 3; 3,2; 4;
5; 6; 8; 10 mm)
- 35 Handbohrmaschine
- 36 Elektrische Handbohrmaschine
mit Ständer

