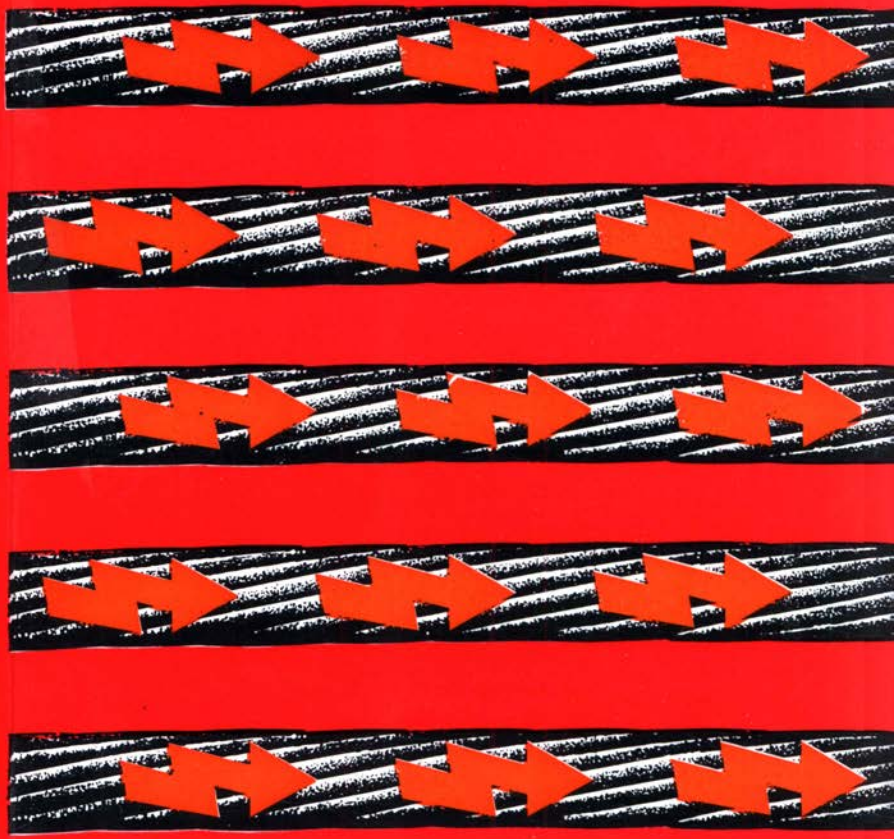
# Elektrotechnik kurz und einprägsam

W. CONRAD



POLYTECHNISCHE BIBLIOTHEK



Walter Conrad

# Elektrotechnik kurz und einprägsam

6., verbesserte Auflage mit 111 Bildern

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Dieser Band der Polytechnischen Bibliothek erscheint in Zusammenarbeit mit der »Urania« Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse

© VEB Fachbuchverlag Leipzig 1976
6. Auflage
Lizenznummer: 114-210/47/76
LSV 3 009
Verlagslektor: Helga Schmiedel
Einband und Gestaltung: Gottfried Leonhardt
Satz und Druck: Fachbuchdruck Naumburg (Saale)
Redaktionsschluß: 31. 1. 1976
Printed in GDR
Bestellnummer: 545 159 3
EVP 5,50 Mark

## Inhalt


Einleitung . . . . . 7

Der Stromkreis . . . . . 8
- Was ist elektrischer Strom? . . . . . 8
- Ein wichtiger Grundbegriff: die Stromstärke . . . . . 10
- Spannung – Ursache des elektrischen Stromes. . . . . 12
- Der Widerstand hemmt den Stromfluß . . . . . 15
- Ohms Gesetz verbindet die Grundgrößen . . . . . 19
- Urspannung und Klemmenspannung . . . . . 26

Arbeit, Leistung, Elektrowärme . . . . . 30
- Kilowatt und Kilowattstunden . . . . . 30
- Wärme – elektrisch erzeugt . . . . . 35
- Elektrowärme im Haushalt . . . . . 39
- Elektrowärme in der Industrie . . . . . 43
- Die Glühlampe . . . . . 46

Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes . . . . . 48
- Dissoziation und Elektrolyse . . . . . 48
- Anwendungen der Elektrolyse. . . . . 53
- Chemische Spannungsquellen . . . . . 59
- Akkumulatoren . . . . . 63

Ruhende Elektrizität . . . . . 66
- Ladungen werden getrennt . . . . . 66
- Anwendungen der elektrostatischen Erscheinungen . . 68
- Das elektrische Feld . . . . . 70
- Der Kondensator . . . . . 77

Magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes . . . . 82
- Der Magnet und das Magnetfeld . . . . . 82
- Das magnetische Feld des elektrischen Stromes . . . . 85
- Stoffe im magnetischen Feld . . . . . 89

Die magnetischen Wirkungen elektrischer Ströme in der Technik . . . . . 94
Telegraf und Telefon . . . . . 99
Magnetfelder wirken aufeinander . . . . . 107

Induktionserscheinungen . . . . . 116

Spannungserzeugung durch Induktion . . . . . 116
Einige Anwendungen der Induktionserscheinungen . . 121
Wirbelströme . . . . . 125
Selbstinduktion . . . . . 127

Der elektrische Strom im Vakuum, in Gasen und Halbleitern . . . . . 131

Die Glühemission . . . . . 131
Elektronen auf vorgeschriebenen Flugbahnen . . . . . 135
Die Verstärkerröhre . . . . . 142
Entladungserscheinungen in Gasen . . . . . 146
Halbleiterbauelemente . . . . . 150

Wechselstrom und Drehstrom . . . . . 161

Entstehung und Kenngrößen des Wechselstromes . . . 161
Induktivität und Kapazität im Wechselstromkreis . . . 165
Leistung, Leistungsfaktor und Arbeit im Wechselstromkreis . . . . . 171
Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom) . . . . . 177

Generatoren – Transformatoren – Motoren . . . . . 183

Wechselstrom- und Gleichstromgeneratoren . . . . . 183
Transformatoren . . . . . 190
Gleichstrommotoren . . . . . 194
Wechsel- und Drehstrommotoren . . . . . 198

Die Energieversorgung . . . . . 206

Das Kraftwerk . . . . . 206
Die Fernübertragung elektrischer Energie . . . . . 210
Der Verbundbetrieb . . . . . 216

Anhang . . . . . 221

# Einleitung

Es hieße Eulen nach Athen tragen, wollten wir den Lesern die Bedeutung der Elektrotechnik klarzumachen versuchen. Überall umgeben uns elektrische Geräte, begegnen uns die Wirkungen der Elektrizität. Millionen Motoren in der Industrie, im Verkehrswesen und im Haushalt treibt die Elektrizität; sie beleuchtet Wohnungen, Betriebe und Straßen, ist unentbehrlich für die meisten Produktionsverfahren. Ihr verdanken wir die Nachrichtentechnik ebenso wie die elektronische Datenverarbeitung und Tausende von Geräten der Elektronik, mit deren Hilfe wir messen, steuern und regeln. Ohne sie gäbe es keine Raumfahrt, keine medizinische Elektronik – und keinen Staubsauger.

Viele Völker bauen den Sozialismus auf oder haben sich von kolonialer Ausbeutung befreit. Für sie gilt besonders, was schon Lenin erkannte und – bezogen auf sein Land – aussprach: „Kommunismus, das ist Sowjetmacht plus Elektrifizierung des ganzen Landes."

War die Elektrotechnik noch vor wenigen Jahrzehnten Sache weniger Spezialisten, so gibt es heute kaum einen Beruf, kaum einen Arbeitsplatz, wo wir ihr nicht begegnen. Das aber bedeutet, daß wir mit ihren Grundlagen vertraut sein müssen.

Dieses Buch soll ein Wegweiser sein. Es versucht, dem Leser Grundkenntnisse zu vermitteln, die zum Verstehen der Elektrotechnik nötig sind. Es will zeigen, wie vielfältig physikalische Gesetzmäßigkeiten angewendet werden können, und es möchte ein Fundament bauen helfen, auf dem die Leser ihr Wissen und ihre Kenntnisse erweitern können.

## Der Stromkreis

### Was ist elektrischer Strom?

Als die ersten elektrischen Apparate und Maschinen gebaut wurden, hatte man vom Wesen der Elektrizität noch sehr unklare Vorstellungen. Niemand wußte, was elektrischer Strom eigentlich sei. Die Wissenschaft hat diese Frage am Ende des 19. Jahrhunderts beantwortet: Elektrischer Strom ist das gemeinsame Wandern von *Ladungsträgern*, von kleinsten elektrisch geladenen Teilchen.

Ladungsträger sind in der Elektrotechnik meistens Elektronen, gleiche Elektronen, wie sie in der „Hülle" jedes Atoms enthalten sind. In Flüssigkeiten und Gasen treten unter gewissen Voraussetzungen auch Atome oder Atomgruppen als Ladungsträger auf. Man nennt sie *Ionen*.

Die in einem Draht wandernden Elektronen entstammen keinem „Elektronenerzeuger". Ihn gibt es nicht. Sie sind von vornherein im Leiter enthalten. Atome des Werkstoffes, aus dem der Draht besteht, geben Elektronen ab, die sich nunmehr frei zwischen den Atomen bewegen können. Wandern sie sämtlich in einer Richtung, fließt im Draht Strom.

Die im Metall frei beweglichen Elektronen „transportieren" also die Elektrizität. Deshalb nennt man sie *Leitungselektronen*.

Metalle leiten den elektrischen Strom gut, weil in ihnen reichlich Leitungselektronen zur Verfügung stehen. Stoffe, in denen es zahlreiche leichtbewegliche Ladungsträger gibt, nennt man *Leiter*.

In Materialien, in denen keine oder nur sehr wenige Leitungselektronen vorhanden sind, kann ein nennenswerter Strom nicht fließen. Solche Stoffe heißen *Isolatoren*. Sie sind für den Elektrotechniker ebenso wichtig wie die Leiter.

Leiter und Isolatoren trennt keine scharfe Grenze. Zwischen ihnen sind vielmehr noch die *Halbleiter* einzuordnen. Es sind Stoffe, die den elektrischen Strom schlechter als Leiter und

besser als Isolatoren leiten. Doch ist das nicht ihr wichtigstes Charakteristikum. Für den Stromfluß durch Halbleiter gelten vielmehr besondere physikalische Gesetzmäßigkeiten; gerade ihnen verdanken die Halbleiter ihre große, von Jahr zu Jahr zunehmende Bedeutung.

Ein Leiter, in dem man einen Strom zum Fließen bringt, wäre sehr rasch von Leitungselektronen entvölkert, wenn man die abgewanderten Elektronen nicht immer wieder ergänzte. Weil sich aber Elektronen weder erzeugen noch in größeren Mengen „speichern" lassen, ist in einem Leiter ein dauernder Strom nur möglich, wenn die Leitungselektronen einen ständigen Kreislauf vollführen.

Denken wir uns einen Drahtring, in dem wir – wie, sei im Augenblick uninteressant – einen Strom zum Fließen bringen. Dann bewegen sich im Drahtring ständig die gleichen Leitungselektronen. Ihre Zahl ändert sich nicht wesentlich. Greifen wir ein Stück des Drahtringes heraus, so befinden sich in ihm stets gleich viele wandernde Leitungselektronen.

Eine Anordnung, in der Elektronen einen ständigen Kreislauf vollführen können, nennen wir *Stromkreis*. Er zählt zu den wichtigsten Begriffen der Elektrotechnik; denn wo immer ein elektrisches Gerät betrieben wird, ist es Teil eines Stromkreises.

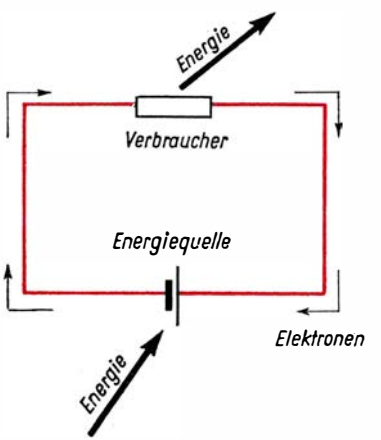



Bild 1 Der Stromkreis

In der Praxis haben wir es dabei nicht mit einem Drahtring zu tun, sondern mit einer Leiterschleife beliebiger Form. Sie ist an mindestens zwei Stellen unterbrochen: An der einen finden wir eine Energiequelle, die den Leitungselektronen eine gewisse Antriebsenergie vermittelt. An einer anderen Stelle begegnen wir dem *Verbraucher*, in dem diese Antriebsenergie in eine andere Energieform, zum Beispiel in Wärme oder in die mechanische Energie eines Motors, umgesetzt wird.

Der Name „Stromverbraucher" ist daher, obwohl allgemein eingebürgert, im Grunde falsch. Es wird keine elektrische Energie „verbraucht", sondern lediglich umgewandelt. Ebenso ist die *Energiequelle* des Stromkreises nur eine Vorrichtung, in der Elektroenergie aus einer anderen Energieform gewonnen wird.

Der Elektronenkreislauf im Stromkreis hat allgemein bekannte Folgen: Jeder Stromverbraucher muß über zwei Leitungen mit der Elektroenergiequelle verbunden werden – in der einen fließen ihm die Elektronen zu, über die andere fließen sie wieder ab. Wird der Kreislauf an irgendeiner Stelle unterbrochen, hört der Stromfluß sofort auf. Deswegen können wir einen Schalter an beliebiger Stelle in den Stromkreis einfügen.

Die Wanderungsgeschwindigkeit der Elektronen bleibt, wie durch experimentelle Untersuchungen festgestellt wurde, sehr gering. Leitungselektronen bewegen sich in der Sekunde nur um Bruchteile eines Millimeters vorwärts. Trotzdem wirkt sich eine Unterbrechung des Stromkreises oder sein Wiedereinschalten augenblicklich auf den ganzen Stromkreis aus.

Das scheint auf den ersten Blick merkwürdig, findet seine Erklärung aber darin, daß sich der *Antriebsimpuls* von Elektron zu Elektron, der mit der Wanderungsgeschwindigkeit der Elektronen nichts zu tun hat, sehr schnell fortpflanzt. Auch die Wasserteilchen in einem Rohr setzen sich unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit unverzüglich überall in Bewegung, wenn ein Hahn geöffnet wird.

### Ein wichtiger Grundbegriff: die Stromstärke

Wir können uns nicht mit der Feststellung begnügen, daß in einem Stromkreis Strom fließt. Wir müssen die Vorgänge auch

quantitativ, zahlenmäßig, beschreiben. Ein wichtiger Grundbegriff der Elektrotechnik ist daher die *Stromstärke.*

Um die Mächtigkeit eines Flußlaufes festzulegen, gibt man die Durchflußmenge in Kubikmetern je Sekunde an. Eine Durchflußmenge von 100 $m^3/s$ zum Beispiel bedeutet, daß an einem Beobachter am Flußufer in jeder Sekunde 100 $m^3$ Wasser vorbeiströmen.

Um die elektrische Stromstärke festzulegen, beschreitet man einen ähnlichen Weg: Ein Strom ist um so „stärker", je mehr Elektronen in der Zeiteinheit durch einen als Meßstelle festgelegten Querschnitt des Leiters fließen.

Beim Wasser zählt man Kubikmeter, weil es ausgeschlossen wäre, die Zahl der am Beobachter vorbeiwandernden Wassermoleküle festzustellen. Die Zahl der einzelnen Leitungselektronen wäre ebenfalls nicht feststellbar; deshalb mißt man die Stärke des elektrischen Stromes mit Hilfe der Wirkungen, die er ausübt.

Elektrischer Strom scheidet, wie wir später noch im einzelnen erfahren werden, aus Metallsalzlösungen das Metall ab; dabei ist die abgeschiedene und leicht wägbare Metallmenge der Stromstärke und der Zeit proportional. Auf diese Weise kann man eine Einheit der Stromstärke definieren. Eine andere Möglichkeit: Zwischen stromdurchflossenen Drähten treten anziehende oder abstoßende Kräfte auf. Auch diese sind einfach meßbar und dienen heute zur Festlegung der Stromstärke.

Einheit der Stromstärke ist das *Ampere* (A), so benannt nach dem französischen Physiker *André Marie Ampère* (1775 bis 1836). Abgeleitete Einheiten sind:

1 Milliampere (mA) = 0,001 $\quad A = 10^{-3}\,A$

1 Mikroampere ($\mu$A) = 0,000001 $\quad A = 10^{-6}\,A$

1 Kiloampere (kA) = 1000 $\quad A = 10^{3}\,A$.

Meßinstrumente für Stromstärken heißen Amperemeter.

Damit wir eine ungefähre Vorstellung davon bekommen, wie viele Elektronen „unterwegs" sind, sei verraten, daß bei einer Stromstärke von 1 A in ein elektrisches Gerät je Sekunde mehr als 6 Trillionen ($6 \cdot 10^{18}$) Elektronen eintreten.

| Stromstärken in bekannten technischen Geräten | | |
|---|---|---|
| Dynamotaschenlampe | | 0,07 A |
| 60-Watt-Lampe für 220 V | | 0,27 A |
| Motor eines Trockenrasierers | | 0,35 A |
| Rundfunkgerät (Großsuper) | | 0,37 A |
| Fernsehgerät | | 0,7 A |
| Staubsauger für 220 V | | 2 A |
| Bogenlampe eines Projektors | | 15 A |
| Straßenbahnmotor | | 150 A |
| Lichtbogenschweißen | | 300 A |
| Elektrochemische Anlagen | über | 100000 A |

Noch eine wichtige Eigenschaft des elektrischen Stromes sei hier bereits erwähnt: Die Elektronen im Stromkreis lassen sich nicht „zusammendrücken", ebensowenig wie wir mit normalen Kräften den Abstand der Moleküle in einer Wasserströmung verringern können.
Die Folgerung daraus ist wichtig: Im einfachen, unverzweigten Stromkreis ist die Stromstärke an allen Punkten gleich groß.

### Spannung — Ursache des elektrischen Stromes

Wir wissen, daß an den Buchsen einer Steckdose „Spannung liegt". Fehlt sie, versagt das elektrische Gerät, das wir an die Steckdose anschließen: Die Lampe brennt nicht, der Rundfunkempfänger bleibt stumm. Es muß Spannung vorhanden sein, damit elektrischer Strom fließen kann. Die Spannung ist die Ursache des elektrischen Stromes; sie „drückt" die Elektronen durch den Stromkreis.
Lange bevor an eine Elektrotechnik zu denken war, hatten Beobachtungen den Schluß nahegelegt, daß es zwei verschiedene Arten von Elektrizität geben müsse, die man *positiv* und *negativ* nannte. Körper, die „positiv geladen" waren, und Körper mit „negativer Ladung" zogen einander an und glichen ihre Ladungen bei Berührung ganz oder teilweise aus. Körper mit Ladungen gleichen Vorzeichens stießen einander ab.
Heute ist bekannt, daß nur Elektronen sich verhältnismäßig frei bewegen können. Sie sind nach der einst getroffenen will-

kürlichen Festlegung „negativ" elektrisch. Die positive Elektrizität bleibt an die Atomkerne gebunden und wandert nicht durch Leiter oder elektrische Geräte.

Ein Körper, der überschüssige Elektronen enthält, ist negativ geladen; ein positiv geladener Körper dagegen hat nicht etwa zusätzliche positive Ladung von außen aufgenommen, sondern von seinem „Normalbestand" an Elektronen abgegeben, wodurch die positiven Ladungen des Körpers überwiegen. Der elektrische Strom ist ein Ausgleichsvorgang, bei dem Elektronen aus einem Gebiet des Überschusses (—) in ein Gebiet des Mangels (+) wandern.

Überschuß einerseits und Mangel andererseits herrschen beispielsweise an den Anschlußklemmen eines Akkumulators. Verbinden wir die Klemmen über einen Stromverbraucher, scheint nichts näherzuliegen als die Feststellung: Der elektrische Strom fließt vom negativen zum positiven Anschluß. Doch jedes Lehrbuch der Elektrotechnik verrät, daß die „technische Stromrichtung" gerade umgekehrt, von Plus nach Minus, zählt.

Dieser scheinbare Widerspruch ist historisch bedingt. Zwar besteht kein Zweifel daran, daß die Elektronen vom negativen zum positiven Anschluß wandern – aber das ist erst seit einigen Jahrzehnten bekannt. Als die Grundregeln und -gesetze der Elektrotechnik formuliert wurden, wußte man von Elektronen und ihrer Wanderung noch nichts. Es war jedoch notwendig, sich über eine Stromrichtung zu einigen. Man tat es – und hatte Pech; denn später stellte sich heraus, daß die Elektronen gerade entgegengesetzt der angenommenen Stromrichtung wandern.




Bild 2 Technische Stromrichtung und Bewegungsrichtung der Elektronen

Um nicht Verwirrung zu stiften und alle Regeln wieder ändern zu müssen, behielt man die „falsche" Stromrichtung bei; es ist die heute allgemein verwendete „technische Stromrichtung". Sie ist stets gemeint, wenn wir im weiteren Verlauf dieses Buches von der Stromrichtung sprechen. In einigen Fällen werden wir allerdings auch auf die Bewegungsrichtung der Elektronen zurückgreifen müssen.

Ströme, die unverändert in einer Richtung fließen, nennt man *Gleichströme*, die zugehörigen Spannungen *Gleichspannungen*. Sehr oft jedoch begegnen uns in der Elektrotechnik Ströme, die ihre Richtung und Stärke periodisch ändern. Sie heißen *Wechselströme*, die zugehörigen Spannungen *Wechselspannungen*. Wir werden es in den folgenden Abschnitten allerdings vorerst stets mit Gleichströmen und Gleichspannungen zu tun haben.

Im Stromkreis erhalten die Elektronen ihren Bewegungsantrieb durch eine *Spannungsquelle*. Das kann eine Batterie, ein Akkumulator, eine Sonnenzelle, ein Thermoelement oder vor allem ein Generator sein. Allen Spannungsquellen ist gemeinsam: Durch Vorgänge, die wir erst später untersuchen werden, herrscht an einem Anschluß der Spannungsquelle Elektronenüberschuß, am anderen Elektronenmangel. Es ist also eigentlich nicht richtig, von „Stromquellen" zu sprechen. Die Spannungsquelle „erzeugt" keinen Strom, sondern setzt lediglich Elektronen in Bewegung. Je nach Art und Aufbau der Spannungsquelle ist der Bewegungsantrieb verschieden groß, den sie den Elektronen erteilt. Man beschreibt ihn quantitativ mit dem Begriff der elektrischen *Urspannung*. Sie ist im ganzen Stromkreis wirksam. Daher ist auch zwischen zwei beliebigen Punkten des Stromkreises ein Teil des Bewegungsantriebes feststellbar; jedoch spricht man in diesem Fall nur von *Spannung*.

Einheit der Spannung und der Urspannung ist das *Volt* (V), so benannt nach dem italienischen Forscher *Alessandro Volta* (1745 bis 1827). Abgeleitete Einheiten sind:

1 Millivolt (mV) = 0,001 V = $10^{-3}$ V

1 Mikrovolt ($\mu$V) = 0,000001 V = $10^{-6}$ V

1 Kilovolt (kV) = 1000 V = $10^{3}$ V

Meßgeräte für Spannungen heißen Voltmeter.

Für Forschungszwecke benutzt man Spannungen bis zu einigen Millionen Volt. Noch höhere Spannungen treten bei Gewittern auf.

Damit Strom fließen kann, muß eine Spannung vorhanden sein. Umgekehrt können jedoch Spannungen auftreten, ohne einen Stromfluß zu verursachen. An der Steckdose „liegt" eine Spannung von 220 V, Strom aber fließt erst dann, wenn durch ein elektrisches Gerät ein Stromkreis geschlossen wird. Beim Gewitter treten zwischen den Wolken oder zwischen Wolken und Erde sehr hohe Spannungen auf, aber erst der Blitz schafft einen gewaltsamen Ausgleich und läßt für eine sehr kurze Zeitspanne einen Strom von vielen Tausenden Ampere fließen.

Spannungen in bekannten technischen Geräten

| | | | |
|---|---|---|---|
| Antenne eines Funkempfängers | einige µV bis einige | 100 | mV |
| Monozelle (Taschenlampe) | | 1,5 | V |
| Autobatterie | | 6 | V (12 V) |
| Elektrische Spielzeuge | bis | 24 | V |
| Fernsprechanlagen | | 60 | V |
| Lichtnetz | | 220 | V |
| Straßenbahn | | 500 | V |
| Anodenspannung der Bildröhre | | 15 | kV |
| Elektrische Vollbahn | | 15 | kV |
| Energieversorgungsnetz (gegenwärtig) | bis | 525 | kV |

**Der Widerstand hemmt den Stromfluß**

Schließen wir ein Lämpchen über dünne Leitungsdrähte an eine Taschenlampenbatterie an, so leuchtet es um so weniger hell, je länger die Anschlußleitungen sind. Ein Amperemeter, das wir in den Stromkreis schalten, zeigt, daß die Stromstärke mit wachsender Leitungslänge sinkt. Nur durch Erhöhen der Batteriespannung ließe sich die Stromstärke wieder auf ihren ursprünglichen Wert bringen.

Hieraus müssen wir schließen, daß die Elektronen im Draht einen *Widerstand* zu überwinden haben. Dieser Widerstand ist

eine weitere wichtige Grundgröße der Elektrotechnik. Wir können ihn uns durch eine Art Reibung entstanden denken, die die Elektronen überwinden müssen, weil sie fortwährend mit den um Ruhelagen hin- und herschwingenden Leiteratomen „zusammenstoßen".

Einheit des Widerstandes ist das *Ohm* (Ω), so benannt nach dem deutschen Physiker *Georg Simon Ohm* (1787 bis 1854). Abgeleitete Einheiten sind:

$$1 \text{ Milliohm } (\text{m}\Omega) = 0{,}001\ \Omega = 10^{-3}\ \Omega$$

$$1 \text{ Kiloohm } (\text{k}\Omega) = 1000\ \Omega = 10^{3}\ \Omega$$

$$1 \text{ Megaohm } (\text{M}\Omega) = 1000000\ \Omega = 10^{6}\ \Omega$$

Ein Leiter hat den Widerstand 1 Ω, wenn in ihm bei einer Spannung von 1 V ein Strom von 1 A fließt.

Schon unser einfacher Versuch erweist, daß der Widerstand von den Abmessungen des Leiters abhängt. Er wächst mit der Leiterlänge und sinkt mit zunehmendem Leiterquerschnitt. Je länger und je dünner ein Draht ist, desto größer ist also sein Widerstand.

Würden wir Drähte gleicher Abmessungen, aber aus verschiedenem Material untersuchen, könnten wir feststellen, daß ihr Widerstand je nach dem Material einen anderen Wert aufweist. Der Silberdraht hat einen geringeren Widerstand als der Kupferdraht, dieser wieder einen geringeren als der Aluminiumdraht usf.

Man gibt für jeden Werkstoff einen „spezifischen" Widerstand ($\varrho$) an; es ist der Widerstand eines Drahtstückes von 1 mm² Querschnitt und 1 m Länge aus dem betreffenden Werkstoff.

Fassen wir unsere Überlegungen und Festsetzungen zusammen, ergibt sich für die Berechnung des Widerstandes eines Leiters die Formel:

$$\boxed{R = \frac{\varrho \cdot l}{A}},$$

worin $R$ in Ohm erhalten wird, wenn wir $l$ in m und deren Querschnitt $A$ in mm² einsetzen. Als Maßbezeichnung für $\varrho$ erhalten wir, indem wir die Formel nach $\varrho$ auflösen, $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

*Beispiel:* Als Widerstand eines Aluminiumdrahtes von 0,5 mm² Querschnitt und 500 m Länge ergibt sich, wenn wir $\varrho$ der Tabelle entnehmen:

$$R = \frac{0{,}0286 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \, 500\,\text{m}}{0{,}5\,\text{mm}^2}$$

$$= \frac{14{,}3 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \, \text{m}}{0{,}5\,\text{mm}^2}$$

$$= 28{,}6\,\Omega$$

Soll berechnet werden, wie lang ein Aluminiumdraht von 1 mm² Querschnitt und 1 Ω Widerstand ist, muß die Formel umgestellt werden:

$$l = \frac{R \cdot A}{\varrho}$$

$$l = \frac{1\,\Omega \cdot 1\,\text{mm}^2}{0{,}0286 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}}$$

$$= 34{,}9\,\text{m}$$

Spezifischer Widerstand und spezifischer Leitwert wichtiger Leiter bei 20 °C

| Werkstoff | spez. Widerstand $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ | spez. Leitwert $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ |
|---|---|---|
| Silber | 0,016 | 62,5 |
| Kupfer | 0,01 786 | 56 |
| Aluminium | 0,0286 | 35 |
| Wolfram | 0,055 | 18 |
| Eisen | 0,10 bis 0,15 | 10 bis 7 |
| Blei | 0,21 | 4,8 |
| Nickelin | 0,43 | 2,3 |
| Konstantan | 0,50 | 2,0 |
| Chromnickel | 1,1 | 0,91 |

Elektrische Leitungen sollen dem Strom einen möglichst geringen Widerstand entgegensetzen. Es liegt daher nahe, sie aus Material geringen spezifischen Widerstandes und mit großem Querschnitt anzufertigen. Das ist jedoch keineswegs immer möglich. Gerade die besten elektrischen Leitermaterialien stehen nur in begrenztem Umfang zur Verfügung; ihre Verwendung muß auf solche Zwecke beschränkt werden, wo sie unentbehrlich sind. So erklärt es sich zum Beispiel, daß in den vergangenen Jahrzehnten in der Elektrotechnik immer häufiger Aluminium statt des knappen Kupfers verwendet wird.

In den letzten drei Zeilen der Tabelle auf S. 17 stehen Stoffe auffällig hohen spezifischen Widerstandes. Es sind sogenannte *Widerstandswerkstoffe*. Für viele Anwendungen der Elektrotechnik sind nämlich auch Leiter hohen Widerstandes erforderlich (vgl. S. 40). Für diese Zwecke wurden zahlreiche Widerstandsmaterialien entwickelt.

In der dritten Spalte der Tabelle ist der *spezifische Leitwert* aufgeführt. Es ist nämlich mitunter günstig, nicht mit dem Widerstand eines Leiters, sondern mit dem Kehrwert des Widerstandes, dem *Leitwert* ($G$), zu rechnen:

$$\text{Leitwert} = \frac{1}{\text{Widerstand}} \qquad G = \frac{1}{R}$$

$$\text{Widerstand} = \frac{1}{\text{Leitwert}} \qquad R = \frac{1}{G}$$

Der Leitwert ist gering, wenn der Widerstand hoch ist, und umgekehrt. Einheit des Leitwertes ist das *Siemens* (S), so benannt nach *Werner von Siemens* (1816 bis 1892):

$$1\,\text{S} = \frac{1}{1\,\Omega}$$

Unter dem „spezifischen Leitwert" eines Materials versteht man den Kehrwert seines spezifischen Widerstandes. Eine anschauliche Bedeutung gewinnt der spezifische Leitwert dadurch, daß er angibt, wieviel Meter ein Draht von 1 mm² Querschnitt aus dem betreffenden Material lang sein muß, um einen Widerstand von 1 Ω aufzuweisen.

Daß wir die Werte des spezifischen Widerstandes und des spezifischen Leitwertes für eine Temperatur von 20 °C angegeben

haben, hat einen wichtigen Grund: Der Widerstand ist temperaturabhängig. Er nimmt bei Metallen mit steigender Temperatur zu. Die Atome des Leiters schwingen nämlich um so heftiger, je höher die Temperatur des Leiters ist. Infolgedessen behindern sie mit zunehmender Temperatur die Elektronenbewegung immer mehr.
Durch viele elektrische Geräte fließt, da ihre Leiter zunächst „kalt" sind, unmittelbar nach dem Einschalten ein weit höherer Strom als der spätere Betriebsstrom. Eine Glühlampe zum Beispiel nimmt im Augenblick des Einschaltens ein Vielfaches ihres normalen Betriebsstromes auf.
Halbleitermaterialien verhalten sich im allgemeinen gerade umgekehrt. Ihr Widerstand sinkt mit steigender Temperatur. Der Widerstand sogenannter *Heißleiterwiderstände* ist daher nach dem Einschalten eines Stromes am größten, während er mit der allmählichen Erwärmung durch den Stromfluß oder auch durch äußere Einwirkungen sinkt.
*Kaltleiterwiderstände* hingegen weisen einen innerhalb eines eng begrenzten Temperaturbereichs steil ansteigenden Widerstand auf, während sich der Widerstandswert spannungsabhängiger Widerstände (sogenannter *Varistoren*) in Abhängigkeit von der Spannung am Widerstand ändert. Diese Sonderformen von Widerständen haben in jüngster Zeit weite Verbreitung in der Meßtechnik, für Schutz- und Stabilisierungsschaltungen sowie für zahlreiche Aufgaben der Steuerungs- und Regelungstechnik gefunden.

**Ohms Gesetz verbindet die Grundgrößen**

Die Grundgrößen Spannung, Stromstärke und Widerstand sind im Stromkreis nicht unabhängig voneinander. Um die gegenseitigen Beziehungen zu untersuchen, benutzen wir die in Bild 3 dargestellte Anordnung. Die Spannungsquelle sei dabei so beschaffen, daß ihre Spannung sich verändern läßt, von der Stärke des fließenden Stromes aber nicht beeinflußt wird (wir werden auf S. 26 sehen, wie wichtig diese Bedingung ist).
Die Skizze weist uns außerdem auf die wichtige Regel hin, nach der Amperemeter stets in Reihe mit dem Verbraucher, Voltmeter dagegen parallel zum Verbraucher geschaltet werden müssen (vgl. S. 23).

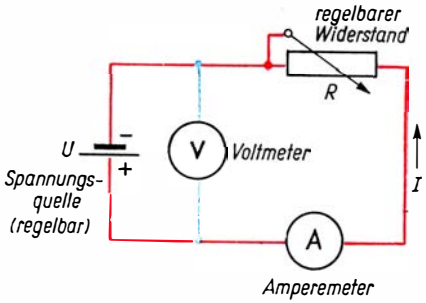



Bild 3 Versuchsanordnung zum Nachweis des Ohmschen Gesetzes

Wir stellen einen Widerstandswert ein und verändern die Spannung. Wir erkennen, daß jede Spannungsänderung eine Stromstärkeänderung verursacht, die der Spannungsänderung proportional ist. Spannungsverdopplung bedeutet doppelte Stromstärke, Spannungsverdreifachung dreifache Stromstärke usf.

Verstellen wir den Widerstand bei unveränderter Spannung, ändert sich die Stromstärke ebenfalls. Allerdings sind jetzt die Stromstärkeänderungen den Widerstandsänderungen umgekehrt proportional: Verdopplung des Widerstandes verringert die Stromstärke auf die Hälfte, ein dreifacher Widerstand setzt die Stromstärke auf ein Drittel herab.

Georg Simon Ohm gebührt das Verdienst, diese Zusammenhänge aufgedeckt zu haben. Nach ihm wurde das Gesetz

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}$$

*Ohmsches Gesetz* genannt.

In Zeichen:

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

Für die Einheiten gilt:

$$1\,\text{A} = \frac{1\,\text{V}}{1\,\Omega}$$

Sind zwei der Grundgrößen gegeben, kann die dritte mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes errechnet werden.

*Beispiele:* Welcher Strom fließt bei einer Spannung von 220 V durch einen Heizkörper von 50 Ω Widerstand?

$$I = \frac{220\ \text{V}}{50\ \Omega}$$

$$= 4{,}4\ \text{A}$$

Welchen Widerstand hat ein Lämpchen mit den aufgedruckten Betriebsdaten 3,5 V, 0,2 A? Wir stellen die Formel um:

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

$$= \frac{3{,}5\ \text{V}}{0{,}2\ \text{A}}$$

$$= 17{,}5\ \Omega$$

Ein Widerstand von 250 Ω wird von einem Strom der Stärke 0,1 A durchflossen. Welche Spannung liegt am Widerstand?
Stellen wir um:

$$U = I \cdot R$$

$$U = 0{,}1\ \text{A} \cdot 250\ \Omega$$

$$= 25\ \text{V}$$

Das Ohmsche Gesetz gilt nicht nur dann, wenn wir den ganzen Stromkreis betrachten. Es kann auch für Teile eines Stromkreises benutzt werden.
Wie verteilt sich beispielsweise eine Urspannung $E$, wenn in einem Stromkreis zwei Widerstände $R_1$ und $R_2$ hintereinander liegen (die Leitungsdrähte und die Spannungsquelle seien als widerstandslos angenommen)? Uns ist bekannt, daß die Stromstärke in einem unverzweigten Stromkreis überall gleich groß

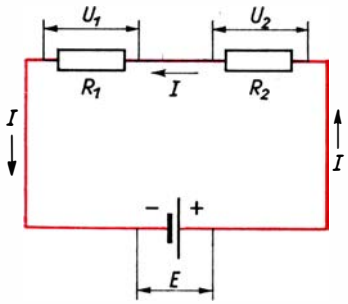



Bild 4 Strom und Spannungen bei der Reihenschaltung von Widerständen

ist. In unserem Fall muß der Strom $I$ nacheinander beide Widerstände durchfließen. Den dazu nötigen Bewegungsantrieb liefert die Urspannung $E$. Daher ist nach dem Ohmschen Gesetz:

$$I = \frac{E}{(R_1 + R_2)}$$

Ein Teil der Urspannung, er heiße $U_1$, „drückt" die Elektronen durch $R_1$; der andere, $U_2$, übernimmt die gleiche Aufgabe bei $R_2$. Setzen wir für diese Spannungen das Ohmsche Gesetz an, folgt:

$$U_1 = I \cdot R_1, \quad U_2 = I \cdot R_2$$

Außerdem ist natürlich:

$$E = U_1 + U_2$$

*Beispiel:* Berechnen wir: $E$ betrage 24 V, $R_1$ 80 Ω, $R_2$ 40 Ω.

$$I = \frac{24\,\text{V}}{(80 + 40)\,\Omega}$$

$$= 0{,}2\,\text{A}$$

$$U_1 = 0{,}2\,\text{A} \cdot 80\,\Omega \qquad U_2 = 0{,}2\,\text{A} \cdot 40\,\Omega$$

$$= 16\,\text{V} \qquad = 8\,\text{V}$$

$$E = U_1 + U_2$$

$$24\,\text{V} = 16\,\text{V} + 8\,\text{V}$$

Man macht sich die *Spannungsaufteilung* an hintereinandergeschalteten Widerständen oft zunutze. Es kommt häufig vor, daß die Betriebsspannung eines Stromverbrauchers kleiner ist als die zur Verfügung stehende Spannung. Verbände man in diesem Fall den Verbraucher unmittelbar mit der Spannungsquelle, würde er überlastet und unter Umständen zerstört. Durch den Spannungsabfall an einem vorgeschalteten Widerstand jedoch kann man die überschüssige Spannung „vernichten".

*Beispiel:* Eine Lampe von 5 V, 0,2 A soll aus einer 12-V-Akkumulatorenbatterie gespeist werden. Ein direkter Anschluß scheidet aus; die Lampe würde durchbrennen. Wir müssen einen Widerstand vorschalten, an dem ein „Spannungsabfall" von 7 V auftritt, wenn der Lampenstrom hindurchfließt. Die Größe dieses Widerstandes ergibt sich sofort aus dem Ohmschen Gesetz:

$$R = \frac{7\ \text{V}}{0{,}2\ \text{A}}$$

$$= 35\ \Omega$$

Das gleiche Verfahren kann man auch bei einer größeren Zahl von Widerständen anwenden. Ein Beispiel hierfür sind elektrische Weihnachtskerzen, bei denen man so viele Lampen geringer Betriebsspannung hintereinanderschaltet, daß sich als Summe die Netzspannung ergibt. Voraussetzung für diese Art des Hintereinanderschaltens ist, daß alle Verbraucher für die gleiche Stromstärke bemessen sind. Dagegen können sie verschiedene Betriebsspannungen aufweisen, solange nur die Summe der Einzelspannungen der Speisespannung gleich ist.
Hieraus erklärt sich auch unsere Feststellung von Seite 19: Will man die an einem Verbraucher auftretende Spannung messen, muß der Spannungsmesser mit den Anschlüssen dieses Verbrauchers verbunden werden. Auch durch den Spannungsmesser fließt dann ein Strom. Seine Stärke hängt vom Widerstand des Instruments und von der Spannung zwischen seinen Anschlüssen ab. Der Spannungsmesser ist im Grunde ein „umgeeichter" Strommesser (eine Ausnahme lernen wir auf S. 70

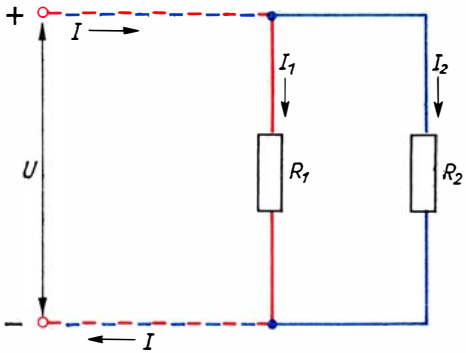



Bild 5 Spannung und Ströme bei der Parallelschaltung von Widerständen

kennen). Wählt man den Instrumentenwiderstand gegenüber dem Widerstand des Verbrauchers genügend hoch, kann man den Strom durch das Meßinstrument vernachlässigbar klein halten. Trotzdem taucht jetzt eine allgemeine und wichtige Frage auf:

Was geschieht, wenn in einem Stromkreis zwei Widerstände parallel liegen? Offensichtlich tritt dann an beiden Widerständen die gleiche Spannung $U$ auf, während sich der Leitungsstrom $I$ in zwei Teilströme $I_1$ und $I_2$ teilt. Da die Stärke des aus der Spannungsquelle fließenden Stromes ebensogroß ist wie die Stärke des ihr wieder zufließenden Stromes (vgl. S. 12), muß gelten:

$$I = I_1 + I_2$$

Diese Beziehung läßt sich auf die Parallelschaltung beliebig vieler Widerstände ausdehnen und ist der Inhalt einer von *Robert Kirchhoff* (1824 bis 1887) aufgestellten Regel:

> Die Summe der Zweigströme ist gleich dem Gesamtstrom.

Setzen wir das Ohmsche Gesetz an, erhalten wir für die Teilströme:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

Für den Gesamtstrom also:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

Wir können uns aber auch vorstellen, daß die Spannung $U$ den Strom $I$ durch *einen* Widerstand $R$ treibt, dessen Widerstandswert dem der Parallelschaltung von $R_1$ und $R_2$ entspricht. Dieser „Ersatzwiderstand" läßt sich leicht berechnen, indem wir in der letzten Formel $I$ durch den aus dem Ohmschen Gesetz zu erhaltenden Ausdruck $\frac{U}{R}$ ersetzen:

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

Dividieren wir durch $U$, folgt:

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

Durch Aufsuchen des Hauptnenners und Umstellen erhalten wir für den Ersatzwiderstand zweier parallelgeschalteter Widerstände:

$$\boxed{R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$$

*Beispiel:* Die Parallelschaltung eines 500-Ω-Widerstandes mit einem 1000-Ω-Widerstand ergibt:

$$R = \frac{500\ \Omega \cdot 1000\ \Omega}{(500 + 1000)\ \Omega}$$

$$= 333\ \Omega$$

Die Formel

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

läßt sich mit Hilfe der Leitwerte weit einfacher schreiben:

$$G = G_1 + G_2$$

Auch bei der Parallelschaltung beliebig vieler Widerstände addieren sich die Leitwerte:

$$G = G_1 + G_2 + \cdots$$

Die Parallelschaltung von Widerständen ist uns allen geläufig: Sämtliche elektrischen Geräte unserer Wohnung, die Lampen, der Kühlschrank, der Rundfunkempfänger, sind parallelgeschaltet und liegen an der gleichen Spannung. Der Zähler und die Sicherungen werden vom Gesamtstrom durchflossen, der sich aus den verschiedenen Teilströmen durch die Stromverbraucher ergibt. Man kann – ein weiterer Vorteil dieser Schaltungsart – einen oder mehrere der Stromverbraucher beliebig aus- und einschalten, ohne die anderen störend zu beeinflussen.

### Urspannung und Klemmenspannung

Jede Spannungsquelle wird durch ihre Urspannung charakterisiert. Legt man jedoch ein Voltmeter an die Anschlüsse einer Spannungsquelle, der ein Strom entnommen wird, so zeigt das Instrument stets eine Spannung an, die geringer als die Urspannung ist. So beträgt zum Beispiel die Urspannung einer Taschenlampen-Flachbatterie 4,5 V; sobald die Lampe brennt, sind aber an den Batterieanschlüssen nur noch etwa 3,5 V zu messen.

Natürlich ist keine Spannung „verschwunden". Wir haben bisher lediglich unberücksichtigt gelassen, daß auch die Spannungsquelle selbst einen gewissen Widerstand aufweist. Man nennt ihn den „inneren Widerstand" $R_i$. Diesen Widerstand müssen die Elektronen bei ihrem ständigen Kreislauf ebenfalls überwinden, und dazu wird bereits ein Teil des Bewegungsantriebs, also der Urspannung, benötigt. Die an den Anschlüssen der Spannungsquelle gemessene Spannung, die „Klemmenspannung", unterscheidet sich um die an $R_i$ auftretende Spannung, den „inneren Spannungsabfall", von der Urspannung:

Klemmenspannung = Urspannung — innerer Spannungsabfall

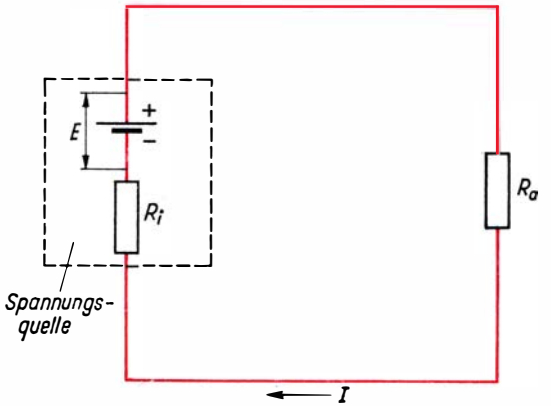



Bild 6 Ersatzschaltung der Spannungsquelle

Um den inneren Widerstand der Spannungsquelle bei Berechnungen berücksichtigen zu können, denkt man sich eine widerstandslose Spannungsquelle der Urspannung $E$ mit dem Widerstand $R_\mathrm{i}$ in Reihe geschaltet. Mit Hilfe dieser „Ersatzschaltung" und des Ohmschen Gesetzes kann dann auch der Spannungsabfall an $R_\mathrm{i}$ bestimmt werden.

*Beispiel:* Nehmen wir an, ein Stromverbraucher $R_\mathrm{a}$ von 100 Ω Widerstand werde an eine Spannungsquelle der Urspannung $E = 60$ V und mit einem inneren Widerstand $R_\mathrm{i}$ von 5 Ω angeschlossen. Welcher Strom fließt? Wie hoch ist die Klemmenspannung? Der Strom muß nacheinander durch die Widerstände $R_\mathrm{i}$ und $R_\mathrm{a}$ fließen. Daher ist:

$$I = \frac{E}{R_\mathrm{i} + R_\mathrm{a}}$$

$$= \frac{60\ \mathrm{V}}{105\ \Omega}$$

$$= 0{,}571\ \mathrm{A}$$

Um den inneren Spannungsabfall zu berechnen, setzen wir das Ohmsche Gesetz für $R_\mathrm{i}$ an:

$$U_1 = I \cdot R_i$$
$$= 0{,}571\ \text{A} \cdot 5\ \Omega$$
$$= 2{,}86\ \text{V}$$

Als Klemmenspannung stehen also

$(60 - 2{,}86)\ \text{V} = 57{,}14\ \text{V}$

zur Verfügung.

Wird die Spannungsquelle nicht durch einen Stromverbraucher belastet, tritt kein innerer Spannungsabfall auf; denn es fließt kein Strom. In diesem Fall, beim „Leerlauf", stimmen Urspannung und Klemmenspannung überein.

Ist der Außenwiderstand vernachlässigbar klein, wird die Stromstärke ausschließlich durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle bestimmt. Der Strom erreicht in diesem Fall – man nennt ihn Kurzschluß – eine sehr große Stärke. Die meisten Spannungsquellen werden durch einen Kurzschluß zerstört.

Reicht die mit einer Spannungsquelle zu erzielende Spannung nicht aus, kann man mehrere Spannungsquellen hintereinanderschalten, indem man jeweils einen Pluspol mit dem Minuspol der folgenden Spannungsquelle verbindet. Dabei addieren sich die Urspannungen und die Innenwiderstände der Spannungsquellen, der innere Spannungsabfall nimmt mit wachsender Stromstärke rasch zu. Daher wird die Hintereinanderschaltung bevorzugt dort angewandt, wo relativ kleine Stromstärken benötigt werden.

Bei der Parallelschaltung von Spannungsquellen werden jeweils die gleichnamigen Anschlüsse miteinander verbunden. Die

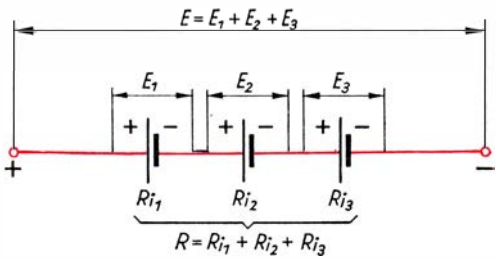
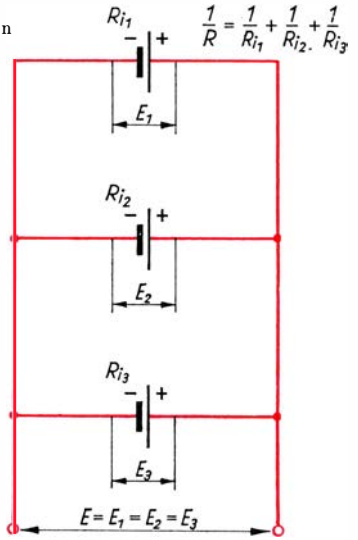



Bild 7 Reihenschaltung von Spannungsquellen

Bild 8
Parallelschaltung von Spannungsquellen




Innenwiderstände der einzelnen Spannungsquellen liegen parallel, der Gesamtwiderstand einer solchen „Batterie" ist daher sehr gering. Ihre Spannung entspricht der der einzelnen Spannungsquelle (wobei wir annehmen, daß alle Spannungsquellen die gleiche Urspannung haben); dafür können einer solchen Batterie große Stromstärken ohne wesentlichen Klemmenspannungsverlust entnommen werden.
Schließlich ist es möglich und üblich, Hintereinander- und Parallelschaltung miteinander zu kombinieren.

## Kilowatt und Kilowattstunden

Die große Bedeutung der Elektroenergie rührt nicht zuletzt daher, daß sie sich verhältnismäßig einfach in andere Energieformen umwandeln läßt: in mechanische Arbeit bei Motoren, in Wärmeenergie bei den vielerlei Elektrowärmegeräten, in die Energie elektromagnetischer Wellen beim Rundfunk und beim Fernsehen.

Die mechanische Arbeit, die ein Motor verrichtet, die Wärmemengen, die ein Tauchsieder oder ein anderes Gerät entwickelt, sind meßbar. Doch von welchen elektrischen Größen hängt die vollbrachte Arbeit ab?

Je mehr Stromverbraucher – Glühlampen, Motoren usw. – wir einschalten und je länger wir sie eingeschaltet lassen, desto mehr Elektroenergie wird in andere Energieformen umgewandelt. Mehr Stromverbraucher, das bedeutet aber – sofern, wie allgemein üblich, die Stromverbraucher parallelgeschaltet werden – höhere Stromstärke. Die geleistete elektrische Arbeit wächst also mit der Stromstärke und mit der Zeit.

Es kommt aber noch auf eine dritte Größe an: Zwei parallelgeschaltete Glühlampen setzen doppelt soviel Energie um wie eine, verbrauchen dafür aber auch den doppelten Strom. Wir könnten das gleiche Ergebnis aber auch erzielen, wenn wir die Lampen hintereinanderschalten und die doppelte Spannung anlegen. Die elektrische Arbeit hängt also auch von der Spannung ab. Fassen wir unsere Überlegungen zusammen, so erhalten wir für die elektrische Arbeit $W$ die Formel:

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

worin $U$ die Spannung, $I$ die Stromstärke und $t$ die Zeit bedeuten.

Wir wollen, ehe wir die Arbeitseinheiten kennenlernen, noch einen Schritt weitergehen. Unter „Leistung" versteht man die während einer bestimmten Zeit verrichtete Arbeit, also:

$$P = \frac{W}{t}$$

Setzen wir für $W$ den Ausdruck für die elektrische Arbeit ein, folgt:

$$P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t}$$

$$\boxed{P = U \cdot I}$$

Die Leistung eines elektrischen Gerätes ergibt sich demnach in einfacher Weise als Produkt aus Spannung und Stromstärke. Wir setzen die Spannung in Volt, die Stromstärke in Ampere ein. Das Produkt aus Volt und Ampere nennt man Watt (W) zur Erinnerung an *James Watt* (1736 bis 1819). Es gilt die Einheitengleichung:

$$1\ \text{W} = 1\ \text{V} \cdot 1\ \text{A}$$

Wenn die Leitungen unserer Wohnung also mit 6-A-Sicherungen geschützt sind, dürfen wir im Höchstfall Geräte bis zu einer Gesamtleistung von

$$P = 220\ \text{V} \cdot 6\ \text{A}$$
$$= 1320\ \text{W}$$

gleichzeitig betreiben.

Als abgeleitete Leistungseinheiten sind üblich:

1 Milliwatt (mW) = 0,001 W = $10^{-3}$ W
1 Kilowatt (kW) = 1000 W = $10^{3}$ W
1 Megawatt (MW) = 1000000 W = $10^{6}$ W

Man kann jedoch die Leistung auch noch anders ausdrücken: Setzen wir in die Leistungsgleichung

$$P = U \cdot I$$

für $U$ den nach dem Ohmschen Gesetz erhaltenen Wert $I \cdot R$ ein, so folgt:

$$P = I^2 \cdot R$$

Die Leistung eines Stromverbrauchers steigt also mit dem Quadrat der Stromstärke. Wir werden auf diese wichtige Beziehung noch öfter zurückkommen.

Leistung bekannter elektrischer Geräte und Anlagen

| | | |
|---|---|---|
| Taschenlampe | nehmen auf | 1 W |
| Rundfunkgerät (Großsuper) | | 80 W |
| Fernsehempfänger | | 150 W |
| Heizsonne | | 500 W |
| Elektroherd | | 4 kW |
| Elektrolokomotive | | 4000 kW |
| Elektr. Stahlöfen | | 10000 kW |
| Karbidöfen | | 30000 kW |
| Großgeneratoren | geben ab bis | 800 MW |
| Wasserkraftwerk Bratsk | | 4500 MW |

Gehen wir zur Formel für die elektrische Arbeit zurück, so erkennen wir, daß sie nichts anderes darstellt als das Produkt aus der elektrischen Leistung und der Zeit, während der diese Leistung umgesetzt wird. Setzen wir die Zeit in Sekunden oder auch in Stunden ein, erhalten wir die Arbeitseinheiten „Wattsekunde" (Ws) und „Wattstunde" (Wh):

$$1\ \text{Ws} = 1\ \text{W} \cdot 1\ \text{s}$$

$$1\ \text{Wh} = 1\ \text{W} \cdot 1\ \text{h}$$

und

$$1\ \text{Wh} = 3600\ \text{Ws}$$

Wattsekunde und Wattstunde sind recht kleine Arbeitseinheiten. Deshalb rechnet man meistens mit der *Kilowattstunde* (kWh):

$$1\ \text{kWh} = 1000\ \text{Wh} = 3\,600\,000\ \text{Ws}$$

Auf fast allen elektrischen Geräten, die wir täglich benutzen, ist die Leistung angegeben, die sie umsetzen. Diese Angabe ermöglicht uns, die Betriebskosten zu berechnen.

*Beispiel:* Wieviel kostet die Betriebsstunde eines Fernsehgerätes, das eine Leistung von 150 W aufnimmt? Es verbraucht je Stunde 150 Wh. Da für die Kilowattstunde 8 Pfennige zu zahlen sind, ergibt sich:

$$1\ \text{Wh} \mathrel{\triangleq} \frac{8}{1000}\ \text{Pfennig}$$

$$150\ \text{Wh} \mathrel{\triangleq} \frac{8 \cdot 150}{1000}\ \text{Pfennig}$$

$$= 1{,}2\ \text{Pfennig}$$

Elektroenergie ist also billig. Das wird noch deutlicher, wenn wir von den uns zunächst ungewohnten elektrischen Einheiten in mechanische umrechnen:

$$1\ \text{kWh} = 367000\ \text{kpm}$$

$$1\ \text{kW} = 102\ \frac{\text{kpm}}{\text{s}}$$

Sehen wir von Energieverlusten einmal ab, ließe sich mit der Energie einer Kilowattstunde eine Masse von 367 kg 1000 m hoch heben. 1 kW würde genügen, um 102 kg in der Sekunde um 1 m zu heben.

Wie in jeder Maschine, so treten auch in jedem elektrischen Gerät Verluste auf. Sie entstehen, weil stets ein Teil der elektrischen Energie in Energieformen umgewandelt wird, die für den jeweiligen Zweck unerwünscht sind. Bei Elektromotoren wird die zugeführte Leistung teilweise durch Reibung aufgezehrt; eine Glühlampe strahlt nicht nur Licht aus, sondern auch Wärme. Daher ist zum Beispiel die mechanische Leistung, die „Nutzleistung", eines Motors kleiner als die elektrische Leistung, die er aufnimmt. Um das Verhältnis zwischen der zugeführten, der *indizierten* Leistung, und der abgegebenen Nutzleistung, der

*effektiven* Leistung, zahlenmäßig zu erfassen, benutzt man auch in der Elektrotechnik den Begriff des „Wirkungsgrades“:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{effektive Leistung}}{\text{indizierte Leistung}}$$

$$\boxed{\eta = \frac{P_e}{P_i}}$$

Hierbei sind indizierte und effektive Leistung in gleichen Einheiten zu messen. Für den Wirkungsgrad ergibt sich ein Zahlenwert, der in Prozenten ausgedrückt wird. Da Verluste nicht zu vermeiden sind, ist $P_i$ immer größer als $P_e$, der Wirkungsgrad kann daher den Wert 1 (100 %) niemals erreichen oder gar überschreiten.

Je geringer die Verluste sind, desto höher wird der Wirkungsgrad eines Gerätes oder einer Anlage, und desto größer ist bei gleicher indizierter Leistung die Nutzleistung. Das Herabsetzen der Energie- und Leistungsverluste ist daher eine Aufgabe, der Wissenschaftler und Techniker in allen Ländern große Aufmerksamkeit widmen.

*Beispiel:* In einem Großbetrieb seien 500 Motoren mit einer Nutzleistung von je 5 kW und einem Wirkungsgrad von 0,75 (75 %) eingesetzt. Die Motoren haben also eine Gesamt-Nutzleistung von 2500 kW. Dem Netz entnehmen sie:

$$P_i = \frac{P_e}{\eta}$$

$$= \frac{2500\ \text{kW}}{0{,}75}$$

$$= 3330\ \text{kW}$$

Gelingt es, durch bessere Konstruktion der Motoren den Wirkungsgrad auf 0,82 zu erhöhen, läßt sich mit der gleichen indizierten Leistung eine effektive Leistung von

$$P_i = P_e \cdot \eta$$
$$= 3330\,\text{kW} \cdot 0{,}82$$
$$= 2730\,\text{kW}$$

erzielen. Bei gleicher indizierter Leistung ließen sich allein durch die Verbesserung des Wirkungsgrades fast fünf Motoren zusätzlich betreiben.

Wir wollen noch ergänzen, daß der Wirkungsgrad elektrischer Geräte und Anlagen im allgemeinen sehr günstige Werte erreicht und bei vielen elektrischen Geräten und Maschinen (z. B. bei Motoren, Generatoren, Gleichrichtern und Transformatoren) nahe 90 % oder gar darüber liegt.

**Wärme — elektrisch erzeugt**

Der Widerstand eines Leiters kommt durch Zusammenstöße zwischen Leitungselektronen und Atomen des Leitermaterials zustande. Bei diesen Zusammenstößen übertragen die Elektronen einen Teil ihrer Energie auf die Atome des Leiters. Diese führen infolgedessen verstärkte Schwingungen aus. Es ist ähnlich, wie wenn wir eine Kegelkugel rollen lassen: Sie gibt Bewegungsenergie ab, indem sie die Kegel umwirft. Im Leiter machen sich die stärker werdenden Schwingungen der Atome als Temperaturzunahme bemerkbar.

Jeder Stoff, durch den elektrischer Strom fließt, wird erwärmt, bei jedem Stromfluß wird ein Teil der Elektroenergie in Wärme umgewandelt. Diese Wärmeentwicklung ist oftmals unerwünscht, weil sie Energieverluste bedeutet oder gar Gefahren mit sich bringt. Andererseits aber wird häufig gerade die durch den Stromfluß entstehende Wärme bewußt genutzt. Gegenüber den anderen Methoden der Wärmeerzeugung hat nämlich die Elektrowärme erhebliche Vorteile:

Sie kann überall da auf einfache Weise gewonnen werden, wo Elektroenergie zur Verfügung steht.

Es gibt keinen Brennstofftransport, keine Asche oder Schlacke; es wird kein Rauch entwickelt.

Im Gegensatz zu Öfen und anderen Anlagen, in denen die Wärme aus natürlichen Brennstoffen gewonnen wird, arbeiten Elektrowärmegeräte mit hohem Wirkungsgrad.

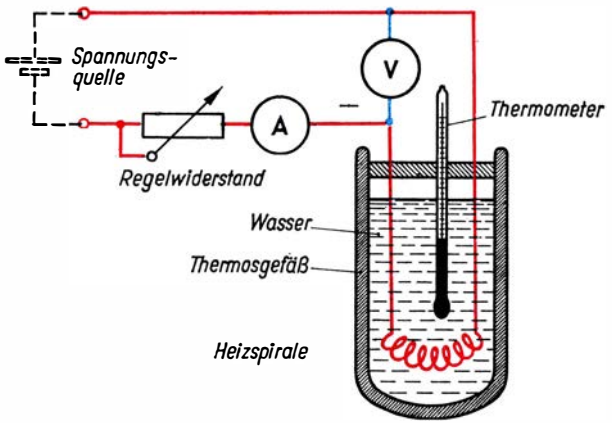



Bild 9 Versuchsanordnung zur Bestimmung der vom elektrischen Strom erzeugten Wärmemenge

Elektrowärme läßt sich leicht und ohne große Verzögerungen verändern und steuern. Automatische Temperaturregeleinrichtungen lassen sich besonders einfach aufbauen, wenn die Wärme elektrisch gewonnen wird.

Ehe wir die Anwendungen der Elektrowärme untersuchen, müssen wir das Umrechnungsverhältnis zwischen den Energieeinheiten der Elektro- und der Wärmetechnik lernen. Die experimentelle Feststellung dieses Zahlenwertes bereitet keine großen Schwierigkeiten. Wir brauchen dazu ein Gefäß, in dem sich eine genau gewogene Wassermenge befindet. Das Gefäß muß so konstruiert sein, daß es möglichst wenig Wärme nach außen abgibt, also etwa nach Art eines Thermosbehälters. In das Gefäß tauchen ein Thermometer und eine Heizspirale, die mit einer Spannungsquelle verbunden werden kann. Die an der Heizspirale liegende Spannung wird durch ein Voltmeter angezeigt, den Heizstrom mißt ein Amperemeter. Ferner ist noch eine Uhr nötig. Auch kann man einen regelbaren Widerstand in den Stromkreis schalten, mit dessen Hilfe sich der Heizstrom verändern oder auf einen bestimmten Wert einstellen läßt.
Die Meßinstrumente gestatten es, die der Heizspirale zugeführte Elektroenergie genau zu bestimmen. Diese Energie wird restlos

in Wärme umgewandelt und auf das Wasser im Meßgefäß übertragen.
Können wir annehmen, daß das Meßgefäß selbst keine Wärmeverluste mit sich bringt, oder sind diese Verluste vorher auf andere Weise bestimmt worden und somit bekannt, läßt sich aus der Temperaturerhöhung des Wassers leicht errechnen, wie viele Kalorien dem Gefäßinhalt zugeführt wurden. Vergleicht man das Ergebnis mit dem Betrag der aufgewendeten Elektroenergie, erhält man die gesuchte Umrechnungszahl:

$$\boxed{\begin{aligned} 1\ \text{Ws} &= 0{,}239\ \text{cal} \\ 1\ \text{cal} &= 4{,}1868\ \text{Ws} \end{aligned}}$$

Hat man es mit größeren Elektroenergie- und Wärmemengen zu tun, rechnet man günstiger mit dem abgerundeten Wert:

$$\boxed{1\ \text{kWh} = 860\ \text{kcal}}$$

*Beispiel:* Welche Wärmemenge setzt eine 500-W-Heizsonne bei achtstündigem Betrieb frei?
Für die verbrauchte Elektroenergie ergibt sich:

$$\begin{aligned} W &= P \cdot t \\ &= 500\ \text{W} \cdot 8\ \text{h} \\ &= 4000\ \text{Wh} \\ &= 4\ \text{kWh} \end{aligned}$$

Daraus folgt für die Wärmeentwicklung:

$$\begin{aligned} Q &= 4 \cdot 860\ \text{kcal} \\ &= 3440\ \text{kcal} \end{aligned}$$

Da sich mit der Wärmemenge von 1 kcal ein Liter Wasser um 1 Grad erwärmen läßt, würde die von der Heizsonne entwickelte Wärmemenge also ausreichen, 100 l Wasser um rund 34 Grad zu erwärmen.

Die gewonnene Wärmemenge in Kalorien läßt sich auch unmittelbar aus der Formel für die elektrische Arbeit entnehmen.

Wir müssen lediglich den Umrechnungsfaktor „einbauen“: Der elektrischen Arbeit $W = U \cdot I \cdot t$ entspricht die in Kalorien ausgedrückte Wärmemenge

$$Q = 0{,}239 \frac{\text{cal}}{\text{Ws}} \cdot W$$

und damit

$$\boxed{Q = 0{,}239 \frac{\text{cal}}{\text{Ws}} \cdot U \cdot I \cdot t}$$

*Beispiel:* Wieviel Wärme entwickelt ein 110-V-Bügeleisen, das von einem Strom von 3,8 A durchflossen wird, bei einstündigem Betrieb?

Es ist:

$$Q = 0{,}239 \frac{\text{cal}}{\text{Ws}} \cdot 110\,\text{V} \cdot 3{,}8\,\text{A} \cdot 3600\,\text{s}$$

$$= 360\,000\,\text{cal}$$

$$= 360\,\text{kcal}$$

Die Vorzüge der Elektrowärme scheinen es nahezulegen, die Wärmeerzeugung auf elektrischem Wege vorzunehmen, wo immer das nur möglich ist. Wer einmal die an einem Wintertag über einer Stadt liegende Rauch- und Dunstglocke beobachtet hat, wer Tag für Tag Brennmaterial aus dem Keller holt und später die Asche zu transportieren hat, wird sich unwillkürlich fragen, warum diese umständlichen Heizmethoden nicht längst zugunsten einer elektrischen Heizung abgeschafft wurden. Er wird vielleicht auch nicht verstehen, daß man umfangreiche Rohranlagen für Fernheizungen verlegt, statt neuen Wohnblöcken sämtliche Energie für Beleuchtung, Motoren, Kochen und Heizen durch Kabel zuzuleiten.

Es gibt vor allem einen Grund dafür, daß noch keine Stadt, kein Dorf auf der ganzen Welt „vollelektrifiziert“ ist: Elektroenergie ist „Mangelware“. Der Bedarf an Elektroenergie ist in den letzten Jahrzehnten so rasch und so gewaltig gestiegen, daß nirgends reichlich oder gar im Überschuß Elektroenergie zur Verfügung steht. Daher muß die Umwandlung von Elektro-

energie in Wärme vorläufig auf solche Zwecke beschränkt bleiben, für die andere Arten der Wärmegewinnung nicht in Frage kommen.
Auch darf man bei Betrachtungen über die Elektrowärme nicht nur die Verbraucherseite berücksichtigen. Wir können zwar aus einer Kilowattstunde 860 kcal gewinnen, und bei den meisten Elektrowärmegeräten sind überdies die Verluste gering. Im Kraftwerk aber, in dem aus der Verbrennungswärme von Kohle, Erdöl oder Erdgas elektrische Energie entsteht, reichen 860 kcal bei weitem nicht zur Erzeugung einer Kilowattstunde aus. Man benötigt dazu selbst in modernen Wärmekraftwerken ungefähr 2000 kcal! Der Wirkungsgrad auf der Erzeugerseite ist also gering, und er läßt sich aus physikalischen Gründen, die wir hier nicht untersuchen können, bei den derzeit üblichen Wärmekraftwerken auch nicht mehr entscheidend verbessern.
Erst Kernverschmelzungs-Großkraftwerke (vgl. S. 209) oder andere Energiequellen (z. B. die Erdwärme oder die Sonnenenergie) werden die Energiesituation auf der Welt grundlegend verändern und uns einen solchen Energieüberfluß zur Verfügung stellen, daß keine Aufgabe und kein technisches Projekt mehr aus Energiemangel zurückgestellt werden müssen.

**Elektrowärme im Haushalt**

Beginnen wir mit einer der unscheinbarsten und zugleich wichtigsten Anwendungen der Elektrowärme. Es ist die Schmelzsicherung, die darüber wacht, daß aus einer unzulässigen Belastung des Lichtnetzes in unserer Wohnung, aus einem schadhaften elektrischen Gerät oder aus einem Kurzschluß keine Gefahren erwachsen.
Erhöhen wir die Stromstärke in einem Leiter, nimmt die entwickelte Wärmemenge zu. Die Temperatur steigt weiter an; der Leiter beginnt zu glühen und schmilzt schließlich durch, damit den Stromfluß selbst unterbrechend. Das ist das Arbeitsprinzip der Schmelzsicherung.
Im Innern eines Porzellankörpers verläuft – in Sand gebettet – ein dünner Draht. Er ist so bemessen, daß er bei einer bestimmten Stromstärke, zum Beispiel bei 6 A, schmilzt. Der Draht endet an zwei Kontakten. Gleichzeitig mit seinem Durch-

schmelzen fällt von der Stirnseite der Sicherung ein farbiges Plättchen ab. Eine „durchgebrannte" Sicherung ist am Fehlen dieses Plättchens sofort zu erkennen.

Die Sicherungen werden so geschaltet, daß sie vom gesamten Strom im Wohnungsnetz durchflossen werden. Die „Nennstromstärke" der Sicherung richtet sich nach der zulässigen Höchststromstärke in den „abgesicherten" Leitungen. Auf keinen Fall darf eine Sicherung höherer Nennstromstärke eingesetzt werden; denn in diesem Fall könnte im Netz ein gefährlich starker Strom fließen, ohne daß die Sicherung anspräche. Um ein versehentliches Einsetzen von Sicherungen zu hoher Nennstromstärke unmöglich zu machen, haben die Sicherungen Füße verschiedenen Durchmessers. Dem Durchmesser entsprechend sind im Sicherungssockel Paßeinsätze angebracht, die eine Mittelbohrung tragen. Diese hat je nach der Nennstromgröße eine solche Weite, daß auf keinen Fall Sicherungen größerer Nennstromstärke eingeführt werden können.

Schmelzsicherungen sind nach einmaligem Ansprechen wertlos und müssen ausgewechselt werden. Deshalb wurden verschiedene Typen von Sicherungsautomaten entwickelt, die einen Stromkreis zwar bei Überlastung oder Kurzschluß unterbrechen, nach Beseitigung der Fehlerquelle jedoch wieder eingeschaltet werden können (vgl. S. 97).

In ihrem grundsätzlichen Aufbau unterscheiden sich die meisten der im Haushalt benutzten Elektrowärmegeräte nur wenig. Die Wärme entsteht in sogenannten Heizleitern aus zickzack- oder wendelförmig ausgespanntem Widerstandsdraht. Als Heizleitermaterial dienen häufig Chromnickellegierungen. Die Heizwendeln werden frei ausgespannt, in Rillen eines keramischen Isolierkörpers eingelegt oder in eine isolierende Masse, zum Beispiel in Magnesiumoxid, gebettet.

Ein sehr einfaches und weit verbreitetes Elektrowärmegerät ist der Tauchsieder. Bei ihm liegen die Heizwendeln isoliert in einem korrosionsbeständigen Metallrohr. Es ist, um die nötige Heizwendellänge unterbringen zu können, zu einer Schleife gebogen. Der Tauchsieder wird in das Gefäß gehängt, dessen Inhalt erwärmt werden soll. Da die Wärmeentwicklung sich inmitten der Flüssigkeit vollzieht, treten fast keine Wärmeverluste auf. Der Tauchsieder hat daher einen sehr hohen Wirkungsgrad,

den man bei überschläglichen Berechnungen ohne nennenswerten Fehler mit 100 % ansetzen kann.
In elektrischen Kochtöpfen, Kaffeemaschinen usw. sind die Heizleiter im Boden oder auch in den Wänden untergebracht. Die meisten Kochtöpfe dürfen nur in gefülltem Zustand betrieben werden, da sie sich sonst überhitzen. Einige moderne Ausführungen jedoch unterbrechen den Strom selbsttätig, wenn sie ohne Flüssigkeit eingeschaltet werden oder versehentlich leerkochen.
Elektrische Kochplatten und Herde sind allgemein bekannt. Sie werden in unterschiedlicher Größe und Ausführung hergestellt. Mit Schaltern lassen sich verschiedene Wärmestufen einstellen, um Speisen möglichst energiesparsam bereiten zu können. In viele Elektroherde ist bereits eine Schaltuhr eingebaut. Mit ihrer Hilfe schaltet sich der Herd zu wählbaren Zeiten ein und aus, oder die Wärmezufuhr wird selbsttätig verändert. Für die Hausfrau, die einen solchen Herd sich selbst überlassen kann, bedeutet das eine große Erleichterung.
Bei den Elektrowärmegeräten, die wir bisher kennenlernten, wurde die Wärme unmittelbar auf das zu erwärmende Medium übertragen. Die von den Heizleitern ebenfalls stets ausgehende infrarote Wärmestrahlung spielte eine untergeordnete Rolle. Wir wollen uns jetzt Geräten zuwenden, in denen gerade diese Wärmestrahlung entscheidend ist.
Bereits beim Toaströster stehen die Brotscheiben nicht mehr mit den Heizleitern – hier kurze Stäbchen aus Widerstandsmaterial – in Berührung. Auch beim Infrarotgrill, der sich steigender Beliebtheit erfreut, bleiben die Heizleiter ein Stück von dem zuzubereitenden Fleisch entfernt.
Die Infrarotstrahlung wird auch in den weit verbreiteten elektrischen Strahlöfen genutzt. Sie sind kenntlich an den offen liegenden, im Betrieb glühenden Heizleitern und einem dahinter angebrachten Metallreflektor. Er wirft die Wärmestrahlung bevorzugt in eine Richtung. „Heizsonnen" sind die bekanntesten Vertreter dieser Elektrowärmegeräte.
Allen Strahlöfen ist gemeinsam, daß sie die Luft im Raum nur unwesentlich erwärmen. Die Wärme entsteht größtenteils in dem Körper, der von der Infrarotstrahlung getroffen wird. Deshalb ist die von einem Strahlofen hervorgerufene Wärme-

empfindung immer „einseitig"; nur die Körperpartie, die im Strahlenbereich liegt, wird erwärmt. Außerdem nimmt die Wärmewirkung rasch ab, wenn man sich von der Strahlungsquelle entfernt.

Strahlöfen sind nur für eine kurzzeitige, zusätzliche Wärmeerzeugung gedacht, können und dürfen wegen ihres hohen Energiebedarfs aber keinesfalls den Ofen oder die Warmwasserheizung in Wohnräumen ersetzen. Ein wichtiger Vorzug der Strahlöfen ist, daß sie unmittelbar nach dem Einschalten eine Wärmewirkung hervorrufen. Deshalb bringt man heute in Badezimmern häufig langgestreckte Infrarotstrahler an, die bei Bedarf eingeschaltet werden.

Soll die Zimmerluft erwärmt werden, muß man zu anderen Heizverfahren greifen. Eine Möglichkeit stellen die sogenannten Thermolüfter dar: Ein Ventilator drückt einen Luftstrom zwischen glühenden Heizleitern hindurch. Die Zimmerluft wird erwärmt und ständig umgewälzt. Die Raumtemperatur kann auf diese Weise verhältnismäßig rasch gesteigert werden. Auch dieses Verfahren ist aber nur in ganz wenigen Sonderfällen und nur für kurze Zeitspannen vertretbar.

Gegenwärtig ist eine regelmäßige elektrische Raumheizung nur zu verantworten, wenn man ihr die „Wärmespeicherung" zugrunde legt. Der Energiebedarf eines größeren Gebietes schwankt im Laufe von 24 Stunden stark (vgl. S. 217). Dabei steht nachts im allgemeinen überschüssige Elektroenergie zur Verfügung. Sie läßt sich – einer der Mängel der Elektroenergie – nicht unmittelbar speichern und für den Tag aufbewahren. Deshalb wandelt man sie nachts in Wärmeenergie um, die dann tagsüber verfügbar ist.

Elektrische „Speicheröfen" enthalten einen massiven Wärmespeicherblock aus Steinen oder Kies. Er wird während der Nachtstunden durch Heizleiter auf eine Temperatur von mehreren hundert Grad gebracht. Am Morgen werden Lüftungsklappen geöffnet. Die Zimmerluft streicht durch den Speicherblock und wird dabei erwärmt. Vom energiewirtschaftlichen Standpunkt aus sind Speicheröfen recht günstig; denn sie entlasten das Energienetz tagsüber, während sie den nächtlichen Energieüberschuß abbauen helfen. Der Besitzer des Ofens hat zudem den Vorteil, daß ihm der „Nachtstrom" für den halben Preis geliefert wird.

Auch Wasser ist ein guter Wärmespeicher. In den Warmwasserspeichern wird mit billigem Nachtstrom Wasser bis nahe an den Siedepunkt erhitzt. Das Wasser befindet sich in einem gegen Wärmeverluste gut isolierten Gefäß und kühlt sich nur sehr langsam ab. Infolgedessen steht während der Tagesstunden heißes Wasser zur Verfügung, ohne daß zusätzlich Elektroenergie benötigt wird. Speicherofen und Warmwasserspeicher schalten sich selbsttätig ein und aus.

**Elektrowärme in der Industrie**

In Industrie- und Handwerksbetrieben begegnen uns viele der auch im Haushalt üblichen Elektrowärmegeräte in nur wenig veränderter, häufig jedoch vergrößerter Form.

Chemische Bäder oder Werkstoffe werden durch elektrische Beheizung auf eine bestimmte Temperatur gebracht, Pressenstempel und Formen werden durch Heizleiter vorgewärmt. Glüh- und Härteöfen werden mit der sauberen, leicht regelbaren elektrischen Heizung ausgestattet. An die Stelle von Drahtwendeln treten dabei als Heizleiter häufig Stäbe aus der Silizium-Kohlenstoffverbindung Silit. Für hohe Temperaturen finden auch Molybdän und Wolfram als Heizleitermaterial Verwendung.

Besondere Bedeutung für die Industrie hat in den vergangenen Jahren die Infrarottechnik erlangt. Sie kann zahlreiche zeitraubende, umständliche und bisher nicht voll befriedigende Trockenprozesse grundlegend umgestalten.

Trocknet man beispielsweise lackierte Teile durch Infrarotstrahler, so entsteht die Wärme in der Lackschicht selbst. Der Trockenprozeß wird gegenüber den früher üblichen Warmluftverfahren erheblich beschleunigt; trotzdem besteht nicht die Gefahr, daß der Lack an der Oberfläche zu rasch verhärtet, was zur Rißbildung führen könnte. Außerdem sind Infrarottrockenanlagen leicht regelbar und verhältnismäßig einfach aufzubauen. Die Trocknung erfolgt, während die Teile langsam durch einen mit Infrarotstrahlern bestückten „Trockentunnel" wandern. Man kann auf diese Weise Autokarosserien, ja ganze lackierte Güterwagen trocknen.

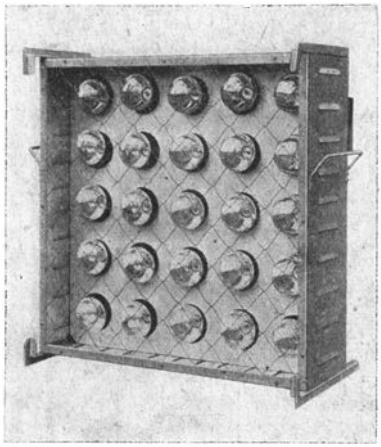


Bild 10 Strahlerkasten

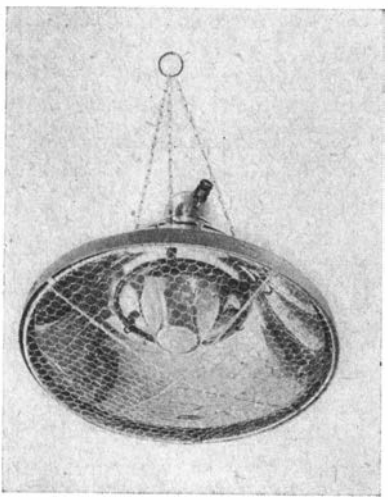


Bild 11 Tieraufzuchtgerät

Auf ähnlich einfache Weise lassen sich emaillierte und galvanisierte Teile, Gußformen und Gußkerne trocknen. Stoff- und Papierbahnen werden heute ebenfalls häufig mit Infrarotstrahlern getrocknet.

Bei der Herstellung von Gebäck, etwa zum Keksbacken, in der Landwirtschaft und an vielen anderen Stellen hat die Infrarottechnik Einzug gehalten. Ihr Anwendungsbereich wird sich in den kommenden Jahren noch erweitern.

Zwischen zwei Leitern, die sich nur lose berühren, tritt ein hoher „Berührungswiderstand" auf. Infolgedessen kommt es zu starker Wärmeentwicklung, wenn man einen kräftigen Strom durch eine solche Stelle schickt.

Diese Wärme wird beim elektrischen Widerstandsschweißen ausgenutzt. Die beiden zu verbindenden Werkstücke werden gegeneinandergedrückt. Aus zwei Elektroden fließt ein starker Strom durch die künftige Verbindungsstelle. Das Metall an den Berührungsstellen erhitzt sich so stark, daß es schmilzt und sich vereinigt.

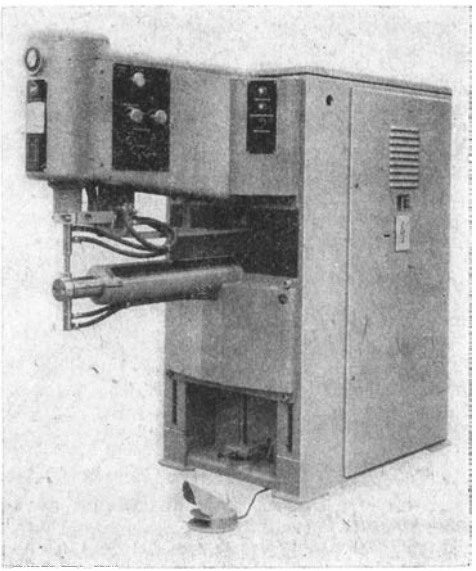


**Bild 12** Punktschweißmaschine

## Die Glühlampe

Wenn wir der Glühlampe einen besonderen Abschnitt widmen, so deshalb, weil wir diese Anwendung der Elektrowärme aus unserem Leben einfach nicht wegdenken können – wir brauchen uns nur der ersten Nachkriegsjahre zu erinnern, in denen nicht nur Elektroenergie, sondern auch Glühlampen Kostbarkeiten waren.

Daß elektrischer Strom einen Leiter bis zum Glühen erwärmen kann, entdeckte man schon zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts. Doch es war nicht einfach, eine brauchbare und billige Lichtquelle aus dem glühenden Draht werden zu lassen. Soll ein stromdurchflossener Leiter helles Licht ausstrahlen, muß man ihn bis zur Weißglut erhitzen. Doch die meisten Leitermaterialien schmelzen bereits bei niedrigerer Temperatur; auch muß man ihnen, um ein Verbrennen zu verhüten, den Luftsauerstoff fernhalten.

Anfänglich glaubte man in Kohle das geeignete Material gefunden zu haben: *Heinrich Goebel* (1818 bis 1893) spannte verkohlte Bambusfasern in luftleer gepumpten Glasgefäßen aus; *Alexander Nikolajewitsch Lodygin* (1847 bis 1923) benutzte statt der empfindlichen verkohlten Fasern Kohlestäbchen; *Thomas Alva Edison* (1847 bis 1931) endlich verbesserte die Glühlampe so, daß sie ihren Siegeszug durch die Welt antreten konnte.

Das Licht der „Kohlenfadenlampen" war gelblich, der Stromverbrauch, gemessen an der Lichtausbeute, unverhältnismäßig hoch. Die naheliegende Möglichkeit, die Temperatur des Leuchtfadens weiter zu steigern, schied aus, weil die Kohle rasch „zerstäubte".

Nach langen Versuchen gelang es, Leuchtfäden aus den schwer schmelzbaren Metallen Osmium (2500 °C) und Tantal (3000 °C) herzustellen. Wolfram (3370 °C) widersetzte sich der technologischen Verarbeitung lange. Erst um 1910 gelang es, Glühlampen mit Wolframleuchtdrähten herzustellen. Sie behaupten seitdem das Feld. Zunächst kam man allerdings mit der Leuchtdrahttemperatur auch nicht annähernd an den Schmelzpunkt des Wolframs heran. Bereits bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen begann das Leuchtfadenmaterial, begünstigt durch das Vakuum im Kolben der Glühlampe, zu zerstäuben.

Daher ging man dazu über, den Lampenkolben nach der Evakuierung mit chemisch trägem Stickstoff oder mit einem Edelgas zu füllen. Dadurch wurde das Zerstäuben erheblich vermindert, ohne daß der Leuchtfaden verbrennen konnte. Allerdings machten sich jetzt wieder erhöhte Wärmeverluste bemerkbar, da das Füllgas Wärme zum Lampenkolben abführte. Auch hier fand sich ein Ausweg: Man drängte den Leuchtdraht auf möglichst engem Raum zusammen, indem man ihn zu einer Wendel wickelte und diese nochmals wendelte. Die Wärmeverluste der Doppelwendellampen („D-Lampen") sind verhältnismäßig gering, die Temperatur ihres Leuchtdrahtes liegt nahe bei 3000 °C.

Trotz vieler Verbesserungen ist der Wirkungsgrad der Glühlampe, im Gegensatz zu dem vieler anderer elektrischer Geräte, sehr gering. Mehr als 95 % der zugeführten elektrischen Energie werden in Wärme umgewandelt, und nur der Rest wird zu Licht. Deshalb bemühen sich Wissenschaftler und Techniker schon seit Jahrzehnten um andere elektrische Lichtquellen (vgl. S. 149).

## Dissoziation und Elektrolyse

Ein Draht wird durch den hindurchfließenden elektrischen Strom nicht merklich verändert. Ganz anders verhalten sich dagegen elektrisch leitende Flüssigkeiten. Dafür ein Beispiel:

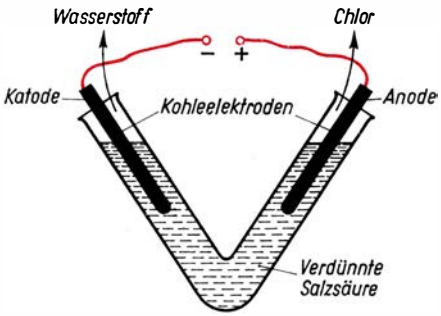



Bild 13 Elektrochemische Zersetzung verdünnter Salzsäure

Das V-förmige Rohr in Bild 13 wird mit verdünnter Salzsäure (HCl) gefüllt, in die zwei Kohlestäbe als *Elektroden* tauchen. Die Elektroden werden mit den Anschlüssen einer Gleichspannungsquelle verbunden. Sobald Strom zu fließen beginnt, steigen an den Elektroden Gasblasen auf, während die Flüssigkeitsmenge im Rohr sich allmählich vermindert. Das an der negativen Elektrode – man nennt sie *Katode* – freiwerdende Gas ist, wie sich leicht nachweisen läßt, Wasserstoff. Das an der positiven Elektrode – sie heißt *Anode* – auftretende Gas riecht stechend und reizt die Atmungsorgane; seine chemische Untersuchung würde zeigen, daß es sich um Chlor handelt. Offensichtlich wird die Salzsäure durch die Wirkung des elektrischen Stromes in ihre Bestandteile Chlor und Wasserstoff zersetzt. Eine solche Zerlegung mit Hilfe des elektrischen Stromes nennt man Elektrolyse.

Der elektrolytische Vorgang ist nicht auf Salzsäure beschränkt. Alle Säuren, Basen, Salzlösungen und auch Salzschmelzen verhalten sich ähnlich. Viele organische Flüssigkeiten dagegen leiten den elektrischen Strom nicht; elektrolytische Erscheinungen treten infolgedessen bei ihnen nicht auf.

Man vermutete zunächst, daß die Zersetzung der leitenden Flüssigkeit, des „Elektrolyten", dadurch hervorgerufen wird, daß unter dem Einfluß der an den Elektroden liegenden elektrischen Spannung die Flüssigkeitsmoleküle „zerrissen" werden. Dieser Annahme stand jedoch die Beobachtung entgegen, daß elektrolytische Vorgänge bereits bei beliebig geringer Spannung einsetzen. Man hätte ja erwarten müssen, daß eine gewisse Mindestspannung nötig wäre, die Moleküle in ihre Bestandteile zu trennen.

Die richtige Erklärung verdanken wir dem schwedischen Physiker *Svante August Arrhenius* (1859 bis 1927). Nach ihm sind in einer Säure, einer Base, einer Salzlösung oder -schmelze stets zahlreiche Moleküle in positiv und negativ elektrisch geladene Bestandteile zerfallen, „dissoziiert". Diese beginnen unter dem Einfluß elektrischer Kräfte zu wandern, weswegen man sie Ionen, „Wanderer", nennt. Die Zahl der positiven und der negativen Ionen ist in einer Flüssigkeit gleich groß. Daher erscheint die Flüssigkeit nach außen elektrisch neutral.

Tauchen wir in die Flüssigkeit Elektroden, an denen eine elektrische Spannung liegt, bewegen sich die Ionen mit positiver Ladung, das heißt mit Elektronenmangel, zur Katode, wo sie ihre fehlenden Elektronen ergänzen. Die Ionen mit negativer Ladung wandern zur Anode und geben dort ihre überschüssigen Ladungen ab. Aus diesem Grund hat man zwei weitere Bezeichnungen eingeführt:

Die positiv geladenen Ionen nennt man *Kationen*. Zu ihnen zählen Wasserstoff und Metalle. Die negativ geladenen Ionen nennt man *Anionen*. Zu ihnen gehören „Säurereste", ferner die „OH-Gruppe" von Basen.

Wir lernen hier einen neuen Typ der elektrischen Leitung kennen: Während in Leitern nur die Elektronen die Elektrizitätsleitung übernehmen, ist in Flüssigkeiten die Elektrizitätsleitung mit einem Stofftransport verbunden. Dabei wird allerdings der Elektronenkreislauf im Stromkreis nicht unterbrochen;

denn an der Katode werden durch die Ionen Elektronen aufgenommen, während an der Anode von den Ionen Elektronen abgegeben werden.

Lange bevor Arrhenius seine Theorie aufstellte, hat man untersucht, welche Zusammenhänge zwischen der abgeschiedenen Stoffmenge – in unserem Beispiel also des Chlors und des Wasserstoffs – und den elektrischen Größen bei der Elektrolyse bestehen. Bereits *Michael Faraday* (1791 bis 1867) fand die grundlegenden Beziehungen. Wir können sie in dem Satz zusammenfassen:

> Die bei der Elektrolyse abgeschiedenen Stoffmengen sind der durch die Ionen transportierten Ladungsmenge proportional.

Das bedeutet: Die abgeschiedenen Stoffmengen sind um so größer, je länger wir Strom durch einen Elektrolyten fließen lassen. Erhöht man die Stromstärke, wird in der gleichen Zeit eine größere Ladungsmenge transportiert. Dabei mißt man die Ladungsmengen in Amperesekunden (As) bzw. Amperestunden (Ah): Fließt durch einen Leiterquerschnitt 1 s lang ein Strom von 1 A, so entspricht das einer Ladungsmenge von 1 As.

Man kann die aus zahlreichen Versuchsreihen gewonnenen Resultate in der Formel zusammenfassen:

$$m = \ddot{A} \cdot I \cdot t$$

Hierin ist $I$ die Stromstärke und $t$ die Zeit. $\ddot{A}$ ist ein Proportionalitätsfaktor. Er kennzeichnet das Verhältnis der abgeschiedenen Stoffmenge $m$ zur transportierten Ladungsmenge, ist für jeden Stoff charakteristisch und heißt „elektrochemisches Äquivalent" des betreffenden Stoffes. Je nachdem, welche Einheiten wir für die Zeit und für die abgeschiedene Masse einsetzen, erhalten wir als Maßbezeichnung für $\ddot{A}$ mg/As oder g/Ah. Wird beispielsweise für Kupfer ein elektrochemisches Äquivalent von 0,3294 mg/As bzw. von 1,186 g/Ah angegeben, so bedeutet das, daß ein Strom von 1 A und 1 s Dauer 0,3294 mg Kupfer abscheidet, während wir bei einer Stromstärke von 1 A und einer Stromflußdauer von 1 h 1,186 g erhalten. Einige Beispiele für

elektrochemische Äquivalente wichtiger Grundstoffe sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

| Grundstoff | $\ddot{A}$ in g/Ah |
|---|---|
| Blei | 3,859 |
| Chrom | 0,323 |
| Kupfer | 1,186 |
| Nickel | 1,096 |
| Zink | 1,219 |
| Silber | 4,025 |
| Wasserstoff | 0,0374 |
| Sauerstoff | 0,2984 |
| Chlor | 1,3212 |

Geben wir das elektrochemische Äquivalent für Silber in mg/As an, finden wir 1,118 mg/As. Dieser Wert ist insofern interessant, als er lange Zeit zur Festlegung der gesetzlichen Einheit der Stromstärke diente.
Bereits auf den ersten Blick läßt die Tabelle erkennen, daß zur Abscheidung nennenswerter Stoffmengen erhebliche Elektrizitätsmengen notwendig sind. In der Tat zählen elektrochemische Betriebe zu den größten Elektroenergieverbrauchern.

*Beispiele:* Welche Elektrizitätsmenge ist nötig, um 1 kg Chlor abzuscheiden, und wieviel Kilowattstunden werden dazu benötigt, wenn an dem Elektrolysegefäß eine Spannung von 4 V liegt?

Es ist:

$$m = \ddot{A} \cdot I \cdot t$$

und umgestellt

$$I \cdot t = \frac{m}{\ddot{A}}$$

$$I \cdot t = \frac{1000\ \text{g}}{1{,}3212\ \text{g/Ah}}$$

$$= 757\ \text{Ah}$$

Für die Arbeit, die der Strom zu verrichten hat, erhalten wir:

$$W = U \cdot I \cdot t$$
$$= 4\ \text{V} \cdot 757\ \text{Ah}$$
$$= 3028\ \text{Wh}$$
$$= 3{,}028\ \text{kWh}$$

Betrachten wir ein weiteres Beispiel. Wieviel Kupfer wird durch einen Strom von 12 A im Laufe eines Tages aus einer Kupfersulfatlösung ausgeschieden?

Es ist:

$$m = Ä \cdot I \cdot t$$
$$m = 1{,}186\ \frac{\text{g}}{\text{Ah}} \cdot 12\ \text{A} \cdot 24\ \text{h}$$
$$= 342\ \text{g}$$

Nicht immer vollzieht sich die Elektrolyse so einfach und übersichtlich, wie wir es am Beispiel der Zerlegung von Salzsäure kennenlernten. Oft kommt es noch zu weiteren Reaktionen, zu sekundären Prozessen. Auch dann aber gilt die von Faraday aufgestellte Grundregel.

Eine der bekanntesten elektrolytischen Erscheinungen ist die *Wasserzersetzung*. Schickt man elektrischen Strom durch Wasser, das mit etwas Schwefelsäure ($H_2SO_4$) versetzt wurde, so scheiden sich an der Katode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff im Verhältnis 2 : 1 ab. Die Wassermenge vermindert sich, während die Säurekonzentration zunimmt. Es sieht aus, als werde lediglich das Wasser in seine Bestandteile zerlegt.

In Wirklichkeit jedoch verläuft der Vorgang komplizierter. Ehe wir ihn untersuchen, wollen wir die Symbolik kennenlernen, die in der Elektrochemie üblich ist: Ein Ion, das ein überschüssiges Elektron enthält, wird durch einen hochgestellten Minusstrich gekennzeichnet, zum Beispiel $Cl^-$. Hat das Ion zwei überschüssige Elektronen, schreibt man zwei Minuszeichen hintereinander. Bei einem positiven Ion werden fehlende Elektronen

durch hochgesetzte Pluszeichen gekennzeichnet, zum Beispiel $H^+$. Die Elektronen selbst werden durch ein Minuszeichen in einem kleinen Kreis dargestellt.
Kehren wir nun zur Wasserzersetzung zurück. Die Schwefelsäuremoleküle dissoziieren nach dem Schema:

$$H_2SO_4 \rightarrow 2\,H^+ + SO_4^{--}$$

An der Katode nehmen die Wasserstoffionen Elektronen auf und vereinigen sich zu neutralen Wasserstoffmolekülen, die als Gas entweichen:

$$2\,H^+ + 2\,\ominus \rightarrow H_2$$

An der Anode geben die $SO_4$-Ionen je zwei Elektronen ab und werden damit elektrisch neutral:

$$SO_4^{--} \ominus 2 — \rightarrow SO_4$$

Die Chemie lehrt, daß die Gruppe $SO_4$ nicht selbständig existieren kann. Sie „zerstört" ein Wassermolekül und reißt dessen Wasserstoff an sich. Es kommt an der Anode zu der Sekundärreaktion:

$$SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + \tfrac{1}{2}\,O_2$$

wobei je zwei O-Atome ein Sauerstoffmolekül bilden, das entweicht.
Wir erkennen: Für jedes Schwefelsäuremolekül, das zersetzt wird, bildet sich ein neues Schwefelsäuremolekül, wobei zusätzlich ein Wassermolekül zerlegt wird. Die Zahl der Schwefelsäuremoleküle bleibt demnach ständig erhalten, während die Zahl der Wassermoleküle ständig abnimmt.

**Anwendungen der Elektrolyse**

Zwei Anwendungsbereiche der elektrochemischen Erscheinungen sind für die Volkswirtschaft besonders bedeutsam: die Gewinnung wichtiger Ausgangsstoffe der chemischen und metallurgischen Industrie mit Hilfe des elektrischen Stromes und die elektrochemische Behandlung von Metalloberflächen.

In vielen Industriezweigen ist Natronlauge unentbehrlich. Sie läßt sich aus Kochsalz gewinnen. Wird Strom durch Kochsalzlösung (NaCl) geschickt, so wandern negative Chlorionen zur Anode, geben ihre Ladung ab und entweichen als Chlorgas. Es ist ein wichtiger Ausgangsstoff der chemischen Industrie. Die positiven Natriumionen dagegen bewegen sich zur Katode. Dort nehmen sie Elektronen auf und neutralisieren ihre Ladung. Da Natrium ein chemisch sehr aktives Element ist, verbindet es sich sofort mit dem Wasser der Kochsalzlösung. Dabei entsteht Natriumhydroxid (NaOH), dessen wässerige Lösung Natronlauge ist. Außerdem wird an der Katode Wasserstoff freigesetzt. Durch technische Kunstgriffe muß man dafür sorgen, daß Chlor und Natronlauge voneinander getrennt bleiben, da es sonst zu unerwünschten Reaktionen käme, in deren Verlauf erneut Natriumchlorid gebildet würde. In ähnlicher Weise gewinnt man durch die Elektrolyse von Kaliumchlorid (KCl) die wichtige Kalilauge.

Wenn Metalle hoher Reinheit gewonnen werden sollen, hilft oft gleichfalls die Elektrolyse. So wird von dem in der Elektrotechnik verwendeten Kupfer ein hoher Reinheitsgrad verlangt, da sich sonst die Leitungseigenschaften des Kupfers stark verschlechtern. Weil das hüttentechnisch gewonnene Rohkupfer mit seinem Kupfergehalt zwischen etwa 96 bis 98 % den Erfordernissen der Elektrotechnik nicht genügt, wird es elektrochemisch weiterbehandelt.

In Bild 14 stehen sich in Kupfersulfatlösung eine dünne Reinkupferplatte als Katode und ein Rohkupferblock als Anode gegenüber. An diese Elektroden wird eine Gleichspannung von wenigen Volt gelegt.

In der Kupfersulfatlösung wandern positive Kupferionen zur negativen Katode, wo sie ihre Ladung neutralisieren und sich ablagern. Entsprechend bewegen sich die negativen $SO_4$-Gruppen zur Anode. Sie bilden dort mit Kupferionen aus dem Anodenblock neues Kupfersulfat. Dieser Vorgang läuft stetig weiter. Dabei scheidet sich an der Katode reines Kupfer ab, während die Anode allmählich aufgelöst wird. Verunreinigungen der Anodenblöcke sind an diesen Vorgängen nicht beteiligt, sondern sinken als „Anodenschlamm" zu Boden. Der Reinheitsgrad des so erhaltenen Elektrolytkupfers erreicht 99,97 %.

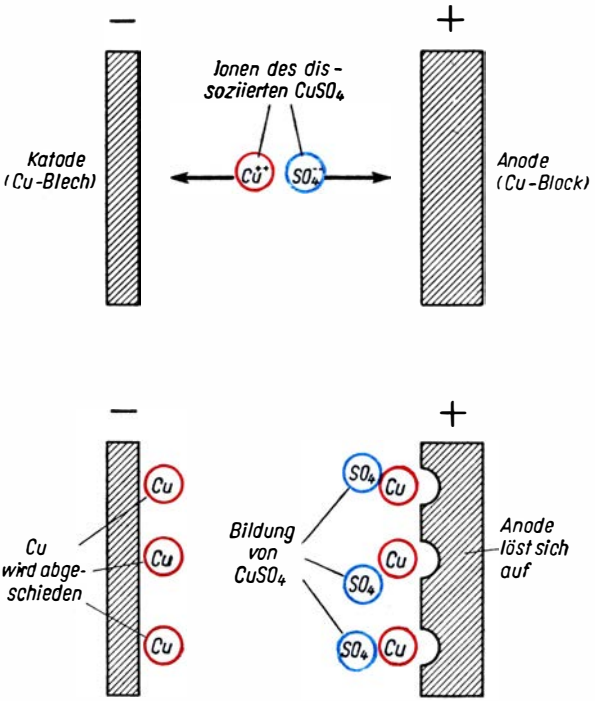



Bild 14 Elektrolytische Gewinnung von Reinkupfer (schematisch)

Eines der für die Technik wichtigsten elektrochemischen Verfahren ist die *Schmelzflußelektrolyse* des Aluminiums.
Mit Kohle ausgekleidete Tröge enthalten ein Gemisch aus den Aluminiumverbindungen Tonerde und Kryolith. In das Gemisch tauchen Kohleblöcke als Anoden. Die Kohleauskleidung der Tröge dient als Katode. Durch einen starken Gleichstrom wird das Gemisch zunächst bis zum Schmelzen erhitzt. Dem Kryolith fällt dabei gewissermaßen die Rolle eines Lösungsmittels zu. Es wird beim Elektrolyseprozeß kaum verbraucht.
In der Schmelze wandern positive Aluminiumionen zur Katode, nehmen Elektronen auf und scheiden sich als metallisches Aluminium ab. Es bleibt flüssig und kann von Zeit zu Zeit am

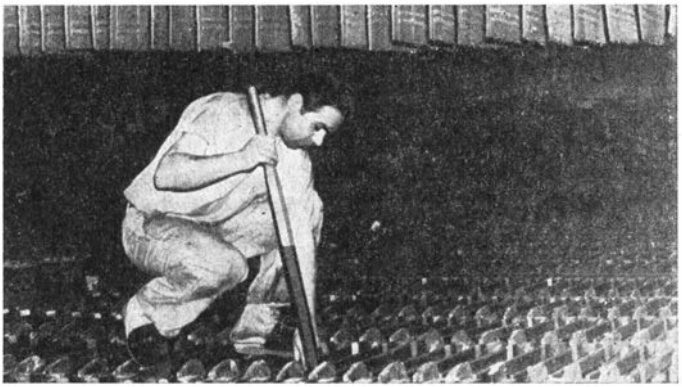


**Bild 15** Kupfer-Elektrolyse

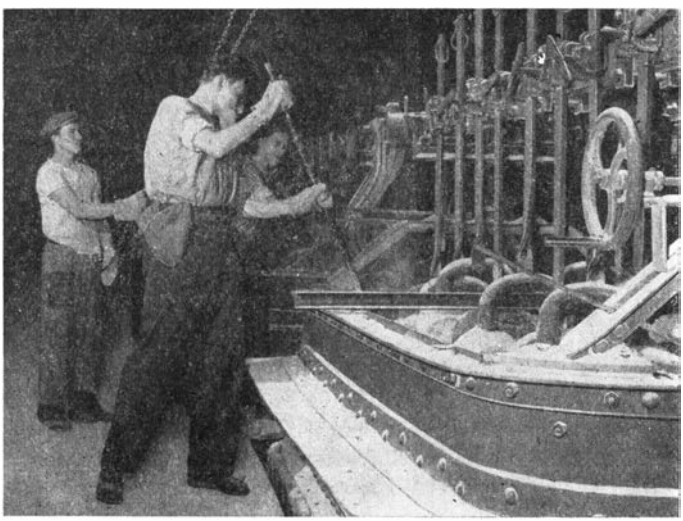


**Bild 16** Schmelzflußelektrolyse von Aluminium

Boden des Troges abgestochen werden. Da Tonerde eine Aluminium-Sauerstoffverbindung ist, wandern negative Sauerstoffionen zur Anode. Dort verbinden sie sich mit dem Kohlenstoff. Die Anoden verbrennen also im Laufe des Prozesses und müssen entsprechend nachgeschoben bzw. ergänzt werden.

Der Stromverbrauch ist hoch. Zur Gewinnung von 1 t Aluminium werden etwa 20000 kWh benötigt. Die Wichtigkeit des Aluminiums für die Industrie, für das Verkehrswesen usw. rechtfertigt jedoch diesen Energieaufwand.

Auf ähnliche Weise werden auch andere Leichtmetalle, zum Beispiel Magnesium und Kalium, gewonnen.

Kupfer wird aus einer Kupfersulfatlösung auch dann abgeschieden, wenn die Katode aus einem anderen leitenden Material besteht. Hätten wir zum Beispiel eine Katode aus Eisenblech gewählt, so würde sich diese mit einer Kupferschicht überziehen, deren Stärke von der Dauer des Stromflusses und von der Stromstärke abhinge. Das Blech würde „verkupfert".

Hier begegnen wir dem zweiten großen Anwendungsgebiet der elektrochemischen Erscheinungen: Man kann Metallflächen oder ganz allgemein elektrisch leitende Flächen auf elektrochemischem Wege mit einer Schicht aus einem anderen Metall überziehen.

Eisen und Stahl sind gegenüber chemischen Angriffen verhältnismäßig wenig widerstandsfähig. Durch Korrosionserscheinungen werden Jahr für Jahr auf der Welt Millionen Tonnen Eisen und Stahl zerstört, und jedermann weiß, daß häufig bereits der Fingerschweiß ausreicht, metallische Oberflächen rasch unansehnlich werden zu lassen.

Andere Metalle – zum Beispiel Zink, Nickel oder Chrom, auch Silber und Gold – sind chemisch zwar sehr widerstandsfähig, eignen sich aber aus verschiedensten Gründen nicht zur Herstellung von Werkstücken. Die Elektrochemie erlaubt es, die Vorzüge dieser Metalle zu benutzen, um chemisch leicht angreifbare Metalle zu schützen.

Hängt man einen Gegenstand aus Stahl in eine Nickelsalzlösung, schaltet man ferner diesen Gegenstand als Katode und eine Nickelplatte als Anode in einen Stromkreis, so überzieht sich der Stahl mit einer Nickelschicht. Arbeitet man mit einer

Chromanode und einer Chromsalzlösung, werden die als Katode dienenden Gegenstände verchromt, bei einer Silberanode und einer Silbersalzlösung werden sie versilbert usf. In der Technik wird von diesem „Galvanisieren" weitgehend Gebrauch gemacht, wenn Metalloberflächen zu schützen sind oder wenn man ihnen durch einen Überzug ein gefälliges Aussehen geben möchte.

Aluminium ist stets mit einer hauchdünnen Schicht von Aluminiumoxid überzogen. Diese Schicht ist durchaus erwünscht, denn sie übt die Funktion einer schützenden Hülle aus. Beim sogenannten „Eloxieren" (elektrisches Oxydieren) wird die Oxidschicht künstlich hergestellt und verstärkt. Der zu eloxierende Gegenstand wird als Anode in ein spezielles chemisches Bad gehängt. Durch entsprechende Wahl der Badflüssigkeit läßt sich erreichen, daß sich die Aluminiumanode nicht auflöst, sondern daß ihre Oberfläche in Aluminiumoxid überführt wird. Diese Schutzschicht „wächst" gewissermaßen in das Metall hinein und haftet daher unlösbar auf ihrer Unterlage. Sie ist chemisch und mechanisch sehr widerstandsfähig und läßt sich überdies leicht färben.

Hängt man einen erhabenen leitenden Gegenstand als Katode in ein elektrochemisches Bad und bleibt der Strom lange genug eingeschaltet, so bildet sich eine dicke Schicht des Überzugsmetalls. Löst man diese Schicht vorsichtig ab, zeigt ihre Rückseite als „Negativ" alle Erhöhungen und Vertiefungen der Katode. Man kann den Abdruck beispielsweise mit Wachs ausgießen und erhält so eine Kopie des ursprünglich in das Bad gehängten Gegenstandes.

Man nennt diese Anwendung elektrochemischer Erscheinungen „Galvanoplastik". Sie wird seit langem benutzt, um Kopien von kleineren Kunstgegenständen oder Altertümern, von Münzen usw. zu erhalten. Man kann sogar Kopien von nichtleitenden Gegenständen herstellen, wenn man diese vorher mit einem dünnen, leitenden Oberflächenbelag, zum Beispiel mit einer Graphitschicht, überzieht.

Die Schallplattenindustrie käme ebenfalls nicht ohne Galvanoplastik aus. Bei der Aufnahme werden die den Schallschwingungen entsprechenden Seiten- oder Tiefenauslenkungen eines Schneidstichels in eine Wachsplatte eingegraben. Diese ist

naturgemäß sehr wenig widerstandsfähig. Daher wird sie mit einer mikroskopisch dünnen Graphitschicht bedeckt und in ein elektrochemisches Bad gehängt, in dem sie sich mit einer Metallschicht überzieht. Diese Metallschicht enthält als Negativ sämtliche Rillen der Wachsplatte. Die Schicht wird abgelöst und so weiterverarbeitet, daß sie in der Plattenpresse als Pressenstempel dienen kann.
Ähnlich geht man bei der Herstellung von „Galvanos" in der polygraphischen Industrie vor. Bei hohen Auflagen von Druckerzeugnissen ist es oft nicht möglich, unmittelbar vom Druckstock zu drucken, da dieser zu rasch verschleißen würde. Deshalb prägt man zunächst eine „Matrize" aus weichem Werkstoff, beispielsweise aus Wachs oder aus einer Kunststoffolie. Diese Matrize enthält als Vertiefungen sämtliche Erhöhungen des Druckstockes.
Die Matrize wird mit einer leitenden Graphitschicht überzogen und als Katode in ein elektrochemisches Bad mit Kupferanode gehängt. Dabei überzieht sich die Matrize mit einer Kupferschicht, deren Erhebungen den Vertiefungen der Matrize entsprechen. Die Kupferschicht ist also eine Kopie des ursprünglichen Druckstockes. Sie wird anschließend abgelöst, verzinnt und mit Blei hintergossen.

### Chemische Spannungsquellen

Tauchen zwei verschiedene Metalle oder ein Metall und Kohle in eine elektrisch leitende Flüssigkeit, so ist zwischen den Metallen bzw. dem Metall und der Kohle eine elektrische Spannung meßbar. Verbinden wir die Elektroden mit einem Stromverbraucher, wird er von einem elektrischen Strom durchflossen. Wir haben eine chemische Spannungsquelle, ein „galvanisches" Element, vor uns.
Galvanische Elemente sind etwa seit Beginn des 19. Jahrhunderts bekannt. Sie waren damals die einzigen Spannungsquellen, denen man über längere Zeit eine nennenswerte Leistung entnehmen konnte. Ihr Name erinnert an den italienischen Arzt und Naturforscher *Luigi Galvani* (1737 bis 1798). Er entdeckte bei seinen berühmten Experimenten mit präparierten Froschschenkeln diese Art der Elektrizitätsgewinnung. Allerdings ver-

mochte er die beobachteten Erscheinungen noch nicht richtig zu erklären, sondern vermutete eine besondere Art „tierischer Elektrizität".

Tauchen wir ein Metall in einen Elektrolyten, so treten zwei Effekte auf, die einander entgegenwirken.

Das Metall unterliegt einem „Lösungsdruck". Er hat das Bestreben, Metallionen abzulösen und in die Flüssigkeit zu treiben. Umgekehrt ist die Flüssigkeit auf Grund des „osmotischen Druckes" bestrebt, Metallionen auszuscheiden. Dabei stellt sich stets ein Gleichgewichtszustand her.

Taucht man beispielsweise ein Zinkblech in verdünnte Schwefelsäure, so überwiegt der Lösungsdruck des Zinks. Es treten positive Zinkionen in die Lösung über. Infolgedessen wird das Zinkblech gegenüber dem Elektrolyten negativ elektrisch. Dieser Vorgang der Ladungstrennung läuft aber nicht ständig weiter. Je mehr Ionen in die Flüssigkeit übertreten, desto stärker werden die nachfolgenden von der bereits in der Flüssigkeit vorhandenen Ladung zurückgestoßen und gleichzeitig von der zunehmenden negativen Ladung der Zinkplatte zurückgehalten. Außerdem steigt mit wachsender Ionenzahl der osmotische Druck der Flüssigkeit, der dem Lösungsdruck entgegenwirkt.

Ist der osmotische Druck größer als der Lösungsdruck, werden Metallionen aus der Flüssigkeit getrieben und setzen sich am Metall ab. Infolgedessen wird diesmal das Metall gegenüber der Flüssigkeit positiv elektrisch. Auch hier ist bald der Gleichgewichtszustand erreicht, weil der osmotische Druck sich durch das Absetzen der Ionen vermindert.

Zwischen dem Metall und der Elektrolytflüssigkeit tritt in beiden Fällen eine elektrische Spannung auf. Sie ist jedoch einer unmittelbaren Messung nicht zugänglich. Wollen wir die zwischen Metall und Elektrolyt entstehenden Spannungen messen, müssen wir – wie bei dem eingangs erwähnten Versuch – zwei Metalle in die Flüssigkeit tauchen. Die zwischen diesen Elektroden auftretende Spannung ist die Differenz bzw. Summe der Einzelspannungen zwischen jeder Elektrode und dem Elektrolyten. Werden gleiche Metalle für beide Elektroden gewählt, heben die Spannungen einander auf. Die Größe der Spannung hängt vom Elektrodenmaterial und von der Elektro-

lytflüssigkeit ab, nicht dagegen von Größe, Abstand und Form der Elektroden.
Verwendet man den gleichen Elektrolyten, so lassen sich die verschiedenen Elektrodenmaterialien zur „elektrochemischen Spannungsreihe" ordnen. Sie sieht, auszugsweise dargestellt, so aus:

+ Kohle, Platin, Gold, Silber, Kupfer, Zinn, Blei, Zink, Aluminium, Magnesium —

Konstruiert man ein galvanisches Element aus zwei beliebigen Stoffen, die in dieser Reihe aufgeführt sind, wird das weiter links in der Reihe stehende Elektrodenmaterial zum Pluspol. Bei der Kombination Kohle-Kupfer zum Beispiel entstünde an der Kohle der Pluspol, am Kupfer der Minuspol, bei der Kombination Magnesium-Silber am Magnesium der Minus-, am Silber der Pluspol. Je weiter zwei Stoffe in der elektrochemischen Spannungsreihe auseinanderstehen, desto größer ist die Urspannung des aus ihnen angefertigten galvanischen Elements.
Die elektrochemische Spannungsreihe eröffnet zahlreiche Möglichkeiten für die Konstruktion galvanischer Elemente. Viele davon wurden im vergangenen Jahrhundert erprobt. Die meisten vermochten sich jedoch nicht durchzusetzen. Größere Bedeutung hat heute vor allem das Zink-Kohle-Element, besonders als „Trockenelement", wie wir es von Taschenlampenbatterien, Batterien für Kofferempfänger, Hörhilfen usw. her kennen.
Das Zink-Kohle-Element enthält einen Kohlenstab als positive, einen Zinkzylinder als negative Elektrode. Als Elektrolyt findet Salmiaklösung Verwendung. Die Urspannung dieses Elements liegt bei etwa 1,5 V.
Die Spannung des Elements würde jedoch rasch absinken, wenn man den Kohlestab nicht mit Braunstein ($MnO_2$) umgäbe, der in einem kleinen Beutel untergebracht ist. Das hat folgenden Grund: Wird dem Element Strom entnommen, so überzieht sich der Kohlestab rasch mit einer Schicht von Wasserstoffbläschen. Dadurch sinkt die Berührungsfläche zwischen Kohle und Elektrolyt, der Innenwiderstand des Elements nimmt zu. Außerdem entsteht eine Gegenspannung, die die Urspannung

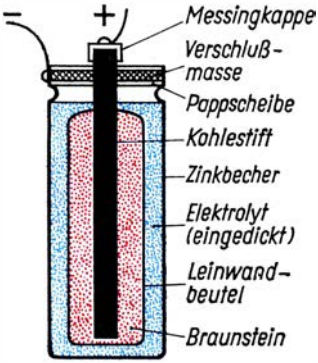



Bild 17 Aufbau eines Trockenelements

des Elements vermindert. Man nennt diese Erscheinung, die bei allen galvanischen Elementen zu beobachten ist, „Polarisation". Beim Zink-Kohle-Element übernimmt die sauerstoffreiche Verbindung Braunstein die Rolle des „Depolarisators". Es läuft eine chemische Reaktion ab, in deren Verlauf sich der Wasserstoff mit einem Teil des im Braunstein enthaltenen Sauerstoffs zu Wasser verbindet. Dadurch wird der Polarisation entgegengewirkt. Lediglich bei starker Belastung des Elements, d. h. bei Entnahme eines kräftigen Stromes, entwickelt sich der Wasserstoff so rasch, daß die Polarisation nicht sofort kompensiert werden kann. In diesem Falle sinkt die Urspannung ab. Bleibt das Element anschließend längere Zeit unbelastet, wird der Wasserstoff umgewandelt, das Element „erholt" sich wieder. In den „Trockenelementen" wird ein Elektrolyt in Form einer eingedickten Paste verwendet. Es gibt auch Zink-Kohle-Elemente, die den Luftsauerstoff zum Depolarisieren verwenden.

Durch die fortschreitende Miniaturisierung elektrischer, elektronischer und fernmeldetechnischer Anlagen, durch den sparsamen Energieverbrauch insbesondere solcher Geräte, die mit Halbleiterbauelementen bestückt sind, hat die Bedeutung der galvanischen Elemente in den vergangenen Jahren wieder zugenommen.

Es gelang, überraschend kleine, leichte und doch leistungsfähige Elemente zu entwickeln, die etwa eine elektrische Armbanduhr

für ein Jahr oder länger mit elektrischem Strom versorgen können. Für solche Elemente werden spezielle Elektrodenmaterialien und spezielle Elektrolyten, zum Beispiel Quecksilberoxid, Zinkamalgam und Kalilauge, benötigt.

**Akkumulatoren**

Die chemischen Vorgänge, die in galvanischen Elementen ablaufen, lassen sich nicht auf einfache Weise rückgängig machen. Daher ist ein galvanisches Element wertlos, wenn es sich einmal erschöpft hat. Aus diesem Grunde scheiden galvanische Elemente für die Lieferung großer Elektroenergiemengen von vornherein aus – der Materialverbrauch wäre viel zu hoch.

Die weit verbreiteten Akkumulatoren sind zwar ebenfalls chemische Spannungsquellen; jedoch können bei ihnen die während der Stromlieferung ablaufenden chemischen Umwandlungen einfach dadurch rückgängig gemacht werden, daß man dem Akkumulator nun von außen Elektroenergie zuführt. Dieses Wechselspiel zwischen „Entladen" und „Laden" des Akkumulators kann Hunderte Male wiederholt werden.

Besonders bekannt wurde der Bleiakkumulator. Er enthält eine Gruppe „positiver" und eine Gruppe „negativer" Platten, die in einem Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure ($H_2SO_4$) stehen. Die Platten jeder Gruppe sind leitend miteinander verbunden, beide Plattengruppen werden so angeordnet, daß die Platten kammähnlich ineinandergreifen.

Um die wirksame Oberfläche möglichst zu vergrößern, haben die Platten eine gitter- oder rippenförmige Struktur. Die Lücken zwischen den Rippen bzw. Gittern werden mit einer Masse aus Bleiverbindungen ausgefüllt. Werden die Platten in Schwefelsäure getaucht, verwandeln sie sich an der Oberfläche in Bleisulfat.

Verbindet man die negativen Platten mit dem Minuspol, die positiven mit dem Pluspol einer Spannungsquelle, setzen elektrolytische Vorgänge ein. Das Bleisulfat der negativen Platten wird zu Blei, aus dem Bleisulfat der positiven Platten bildet sich Blei(IV)-oxid. Außerdem entsteht unter Wasserverbrauch neue Schwefelsäure. Die Säuredichte steigt. Schematisch läßt sich dieser Vorgang wie folgt darstellen:

$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O \rightarrow PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4$$

Das „Laden" ist beendet, sobald sämtliches Bleisulfat umgewandelt wurde. Hält man die Energiezufuhr weiterhin aufrecht, tritt durch Zersetzung des Wassers eine starke Gasentwicklung auf. Das „Gasen" zeigt also das Ende des Ladevorganges an. Das entstehende Gas – ein Gemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff – ist unter dem Namen Knallgas bekannt und hochexplosiv.

Nach der Ladung stehen sich positive Platten mit Blei(IV)-oxid und negative Platten mit Blei gegenüber. Der geladene Akkumulator ist ein galvanisches Element, dessen Urspannung zunächst etwa 2,7 V beträgt, bei der Stromentnahme aber rasch auf etwa 2 V zurückgeht. Erst gegen Ende des Entladens sinkt die Spannung weiter ab. Hat sie einen Wert um 1,8 V erreicht, muß der Akkumulator erneut geladen werden.

Beim Entladen verwandeln sich Blei und Blei(IV)-oxid in Bleisulfat zurück; dabei wird Wasser gebildet und Schwefelsäure zerlegt, die Säuredichte nimmt wieder ab. Schematisch lassen sich diese Vorgänge so darstellen:

$$PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4 \rightarrow 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O$$

Welche Elektrizitätsmenge Akkumulatoren speichern können, hängt von ihrer Größe und von ihrer Konstruktion ab. Man kennzeichnet dieses Speichervermögen mit der „Kapazität" des Akkumulators und mißt es in Amperestunden. Wird für einen Akkumulator eine Kapazität von 50 Ah angegeben, so bedeutet das zunächst, daß man ihm für 10 h eine Stromstärke von 5 A oder für 20 h eine Stromstärke von 2,5 A entnehmen könnte. Allerdings darf man das Produkt aus Entladestrom und Entladezeit nicht beliebig „aufteilen". So ist für jeden Akkumulator eine Höchstgrenze des Entladestromes festgesetzt. Wird sie überschritten, ist der Akkumulator gefährdet. Auch sinkt die Kapazität eines Akkumulators um so mehr, je stärker der Entladestrom ist. Aus diesem Grunde bezieht man die „normale" Kapazität auf eine dreistündige Entladedauer.

Für die Speicherung großer Energiemengen ist ein Akkumulator nicht geeignet. Die Masse einer Akkumulatorenbatterie, die auch nur 1 kWh speichern könnte, läge nicht wesentlich unter 50 kg!

Nachteile des Bleisammlers sind, daß er gegen elektrische Überlastung und mechanische Beanspruchungen verhältnismäßig empfindlich ist.

„Edison-Akkumulatoren" („Stahlakkumulatoren") verwenden als Elektrolytflüssigkeit Kalilauge (KOH), als Elektrodenmaterial Eisen- und Nickelverbindungen. Die Spannung des Stahlakkumulators liegt nur bei etwa 1,2 V. Er ist jedoch mechanisch sehr robust; auch eine Überlastung beim Entladen schadet ihm wenig. Beim Laden und Entladen bildet sich nur wenig Gas.

Eine Weiterentwicklung des alkalischen Akkumulators, der Nickel-Kadmium-Akkumulator, gast überhaupt nicht. Man kann ihn luft- und feuchtigkeitssicher abschließen. Das bewährt sich besonders für die Stromversorgung transportabler Geräte, unter anderem bei Elektronenblitzgeräten, Trockenrasierern und Kofferempfängern.

Das Streben nach Verkleinerung elektrischer und elektronischer Geräte führte auch zur Entwicklung neuartiger Akkumulatoren, die bereits für viele Spezialaufgaben eingesetzt werden. So bewährt sich der Silber-Zink-Akkumulator, dessen Masse bei gleicher Leistungsfähigkeit nur etwa $^1/_3$ derjenigen eines Bleiakkumulators beträgt.

## Ladungen werden getrennt

Meistens benutzt man in der Elektrotechnik die Eigenschaften und Wirkungen bewegter elektrischer Ladungen, d. h. elektrischer Ströme.

Viel länger jedoch – nämlich seit Jahrtausenden – sind elektrische Erscheinungen bekannt, bei denen sich die elektrischen Ladungen in Ruhe befinden und an Ort und Stelle bleiben. Mit dieser ruhenden, „statischen" Elektrizität wollen wir uns jetzt befassen.

Man hatte beobachtet, daß manche Stoffe, zum Beispiel Bernstein, Schwefel, Glas oder trockenes Harz, sich merkwürdig verhielten, nachdem sie kräftig gerieben worden waren: Sie zogen leichte Körper, wie Flaumfedern, Wollfasern und Papierschnitzel, an, um sie nach einer gewissen Zeit wieder wegzuschnellen. Später beobachtete man, daß von solchen geriebenen Körpern Funken zu anderen Gegenständen übersprangen, wenn man diese entsprechend näherte.

Manche Stoffe wurden also durch Reiben „elektrisch", wobei man den Namen elektrisch von „elektron", dem griechischen Wort für Bernstein, entlehnte. Doch gab es dabei, wie sich bald herausstellte, noch Unterschiede: Zwei geriebene Glasstäbe stießen einander ab, einen geladenen Harzstab dagegen zogen die gleichen Glasstäbe an. Zwei geladene Harzbrocken stießen sich untereinander ab, zogen aber einen geladenen Glasstab an; geladenen Schwefel dagegen stießen sie ab.

Diese Beobachtungen führten zu dem Schluß: Es gibt eine *Glaselektrizität* und eine *Harzelektrizität*. Später nannte man geladene Stoffe, die sich wie Glas verhielten, positiv elektrisch, Stoffe, die sich wie Harz benahmen, negativ elektrisch. Daß man dabei irrtümlich annahm, die positive Elektrizität sei in gleicher Weise beweglich und übertragbar wie die negative, war ein Trugschluß, der sich zunächst nicht störend aus-

wirkte. So gilt auch heute noch der schon damals aufgestellte Satz:

> Ladungen gleichen Vorzeichens stoßen sich ab,
> Ladungen ungleichen Vorzeichens ziehen sich an.

Wie kommt nun die „Reibungselektrizität" zustande? Damit ein Körper eine elektrische Ladung zeigt, muß er Elektronenüberschuß oder Elektronenmangel aufweisen. Wir müssen also annehmen, daß beim Reiben eine „Ladungstrennung" erfolgt, durch die dem einen der beiden Körper Elektronen entzogen werden, während sie sich auf dem anderen anhäufen. Tatsächlich zeigt es sich bei allen Versuchen, daß nicht nur der geriebene Körper sich elektrisch auflädt, sondern daß auch der reibende eine elektrische Ladung – und zwar die entgegengesetzte wie der geriebene Körper – aufweist.

Zur Erklärung des Elektronenübertritts nimmt man an, daß verschiedene Stoffe auch ein verschiedenes Bestreben, eine verschieden starke „Affinität" zur Abgabe und zur Aufnahme von Elektronen haben. Berühren sich zwei verschiedene Stoffe innig, treten Elektronen zum Stoff mit der größten Affinität über. Entfernt man jetzt die Körper voneinander, bleibt ein Ladungsunterschied bestehen; der eine Körper zeigt sich positiv, der andere negativ elektrisch geladen.

In unserer Erklärung ist von „Reibung" überhaupt nicht mehr die Rede, sondern nur von Berührung. Tatsächlich kommt es nur auf eine möglichst enge Berührung der beiden Körper an. Reibt man zwei Körper aneinander, so wird diese Berührung gefördert, weil die Oberflächen der Körper mit ihren mikroskopischen Unebenheiten vielfach ineinandergreifen.

Daß tatsächlich nur die Berührung, nicht aber die Reibung entscheidend ist, läßt sich durch einfache Versuche nachweisen. Bereits Volta demonstrierte, daß zwei völlig ebene Platten aus verschiedenen Metallen eine elektrische Ladung zeigen, wenn man sie erst aufeinanderlegt und dann plötzlich auseinanderreißt. Taucht man eine an einem Isoliergriff befestigte Paraffinkugel in Wasser, um sie anschließend schnell wieder herauszuziehen, so zeigt sich das Wasser positiv, die Paraffinkugel negativ elektrisch geladen.

Das Gesetz, daß gleichnamige Ladungen einander abstoßen, gilt nicht nur für verschiedene Körper. Stets suchen auch die gleichnamigen Ladungen *eines* Körpers sich soweit wie möglich voneinander zu entfernen. Allerdings gelingt ihnen das nur in Leitern, in denen elektrische Ladungen leicht beweglich sind. Daraus folgt die wichtige Regel: Bei geladenen Leitern sitzen die Ladungen stets an der Leiteroberfläche. Bringt man Ladung in das Innere eines Leiters, zum Beispiel in das Innere einer metallischen Hohlkugel, wandert sie unverzüglich nach außen, an die Kugeloberfläche. Das Kugelinnere bleibt ladungsfrei. Ladung, die von außen auf die Kugel oder auf einen anderen leitenden Hohlkörper gelangt, kann nicht in das Innere eindringen. Das ist das Prinzip des „Faradayschen Käfigs". Sollen empfindliche Meßgeräte oder andere Apparaturen gegen elektrische Einwirkungen von außen geschützt werden, setzt man sie in einen „Käfig" aus Blech oder aus engmaschigem Drahtgeflecht. Selbst wenn die Oberfläche dieses Käfigs stark elektrisch aufgeladen ist, sind auf der Innenwandung keine elektrischen Ladungen nachweisbar. Dieser Schutzwirkung ist es übrigens auch zu verdanken, daß die Insassen eines Eisenbahnzuges, eines geschlossenen Kraftwagens oder einer Flugzeugkabine relativ sicher vor Blitzschlägen sind.

**Anwendungen der elektrostatischen Erscheinungen**

Bereits *Otto von Guericke* (1602 bis 1686) baute eine einfache „Elektrisiermaschine", das heißt ein Gerät, mit dessen Hilfe sich durch Reibung fortlaufend und stetig elektrische Ladungen trennen ließen. Seine Maschine bestand im wesentlichen aus einer großen Schwefelkugel, die drehbar gelagert war. Drehte man die Kugel, wobei man ihr gleichzeitig die Hand als „Reibzeug" auflegte, so lud sich der Schwefel auf. Guericke konnte lange Funken aus der geladenen Kugel ziehen und zahlreiche eindrucksvolle Versuche vorführen. Seine Elektrisiermaschine wurde bald auf verschiedenen Wegen weiterentwickelt. Man konnte auf diese Weise zwar sehr hohe Spannungen – bis zu einigen Hunderttausenden Volt – erzeugen, die Ladungsmengen blieben aber viel zu gering, um über längere Zeit einen technisch verwendbaren Strom zum Fließen bringen zu können.

Aufladungen durch Reibung kommen sehr oft vor. Daß unsere Haare und der Plastkamm „elektrisch" werden, wenn wir trockenes Haar kämmen, ist allgemein bekannt. Unangenehmer ist, daß auch andere Gegenstände sich aufladen können. Auf Schallplatten zum Beispiel haftet Staub oft hartnäckig, und Versuche, ihn abzuwischen, verschlimmern diesen Effekt noch; denn die Platten laden sich dadurch stärker auf und halten den Staub um so fester. Hilfe bringen hier sogenannte „Antistatik-Tücher", die die Ladung beim Wischen sofort wieder beseitigen. Treibriemen laden sich unter Umständen auf so hohe Spannungen auf, daß aus ihnen lange Funken zu geerdeten Metallteilen überspringen. Ähnliche Beobachtungen kann man in Betrieben der Textil- und Papierindustrie machen. Hier sind sie oft sehr störend, weil Papierbogen aneinanderhaften, Fäden sich anziehen oder sich ausweichen usw. Man verhindert die Aufladung durch künstliches Erhöhen der Luftfeuchtigkeit oder auch dadurch, daß man an den kritischen Stellen radioaktive Präparate anbringt, die die Luft teilweise elektrisch leitend machen, so daß die Ladung sofort abgeführt wird.

Auch isolierende Flüssigkeiten, die durch Röhren oder Düsen aus isolierendem Material strömen, können sich stark elektrisch aufladen. Das ist gefährlich, weil viele isolierende Flüssigkeiten, zum Beispiel Benzin, brennbar sind. Es ist durch elektrostatische Ladungen schon mehrfach zu Treibstoffexplosionen gekommen.

Die anziehenden oder abstoßenden Kräfte zwischen geladenen Körpern wurden schon sehr bald genutzt, um Nachweisinstrumente für elektrische Ladungen zu konstruieren. Im „Goldblattelektroskop" sind an einer Metallstange, die isoliert in das Innere eines durchsichtigen Gefäßes geführt ist, zwei schmale Blattgoldstreifen befestigt. Berührt man die Kugel bzw. Platte am Ende der Stange mit einem elektrisch geladenen Gegenstand, so teilt sich der Metallstange und auch den Blattgoldstreifen Ladung mit. Wegen der Gleichnamigkeit dieser Ladung spreizen sich die Blättchen auseinander.

Im „elektrostatischen Spannungsmesser" finden wir in geringem Abstand voneinander drei Metallplatten. Die mittlere Platte kann zur Seite ausweichen und nimmt dabei über ein möglichst leichtes Hebelsystem einen Zeiger mit, der vor einer Skale

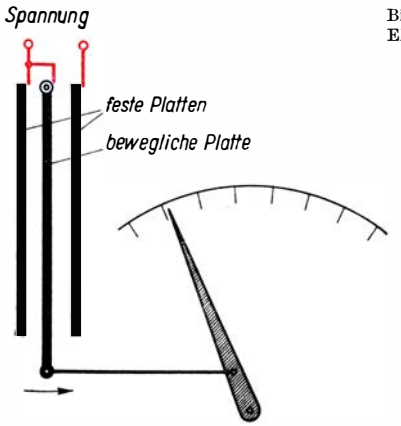



Bild 18
Elektrostatischer Spannungsmesser

spielt; außerdem ist sie leitend mit einer der beiden Außenplatten verbunden. Liegt Spannung an den Außenplatten, wird die Mittelplatte von einer Außenplatte angezogen, von der anderen dagegen abgestoßen. Sie weicht zur Seite aus und bewegt den Zeiger über die Skale.

Ein Vorteil des elektrostatischen Spannungsmessers ist, daß im Gegensatz zu den meisten anderen Meßinstrumenten praktisch kein Strom durch ihn fließt. Er kann außer für Gleichspannungsmessungen auch für Wechselspannungsmessungen bei niedrigen Frequenzen Verwendung finden. Die „Empfindlichkeit" des elektrostatischen Spannungsmessers ist jedoch verhältnismäßig gering, da erst bei Spannungen um 100 V genügend starke Anziehungskräfte ausgeübt werden, die das Gerät ansprechen lassen.

## Das elektrische Feld

Geladene Körper ziehen sich an oder stoßen sich ab. Die Kraftwirkungen bleiben jedoch nicht auf die Körper selbst beschränkt; sie treten auch im Raum zwischen ihnen und in ihrer Umgebung auf.

Man kann das leicht und auf verschiedene Weise nachweisen: Bringen wir beispielsweise Wollfäden zwischen zwei elektrisch geladene Platten, so richten sich die Fäden so aus, daß sie von

Platte zu Platte weisen. Ebenso würden sich Stückchen von Strohhalmen oder schmale Papierstreifen verhalten. Hängt man in den Plattenzwischenraum ein elektrisch geladenes Metallkügelchen, so wird es nach der Seite gezogen, auf der sich die Platte mit der der Kugelladung entgegengesetzten Ladung befindet. Schieben wir in den Plattenzwischenraum einen kleinen Tisch aus Isoliermaterial, dessen Fläche wir mit Korkmehl oder mit pulverisierten Gipskristallen bestreuen, so ordnen sich diese zu charakteristischen Linien, die im Plattenzwischenraum parallel verlaufen, außerhalb der Plattenränder dagegen nach außen gebogen sind.

Die beschriebenen und zahlreiche andere Versuche zeigen, daß es ein lückenloses Raumgebiet gibt, in dem Kraftwirkungen auftreten, die von den Ladungen verursacht werden. Man nennt dieses Gebiet ein *elektrisches Feld*.

Um ein elektrisches Feld und seine Form näher zu beschreiben, führte man den überaus nützlichen Begriff der „elektrischen

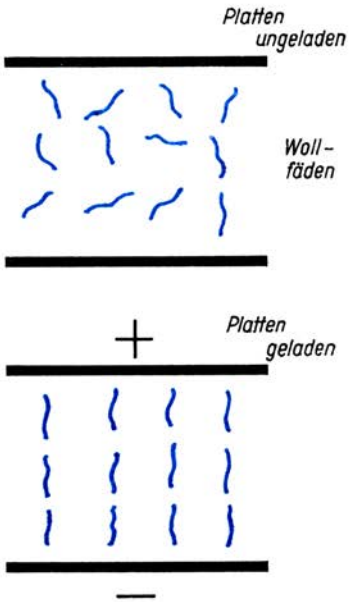



Bild 19 Kräfte im elektrischen Feld

Feldlinien“ ein. Es sind gedachte Linien, die von Ladung zu Ladung verlaufen und für jeden Punkt des elektrischen Feldes die Richtung der wirkenden Kraft angeben.
Der Versuch mit Gipskristallen oder mit Korkmehl gibt bereits ein anschauliches, wenn auch nur flächenhaftes Bild des elektrischen Feldes zwischen zwei geladenen Platten. Das elektrische Feld anderer geladener Körper läßt sich auf entsprechende Weise darstellen (Bild 21). Papierfähnchen, die wir an eine Feldlinie hielten, stellten sich, wenn sie leicht genug drehbar wären, tangential zu den Feldlinien ein.

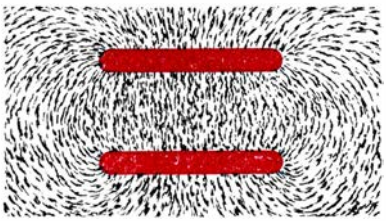


Bild 20 Das elektrische Feld zwischen zwei Platten

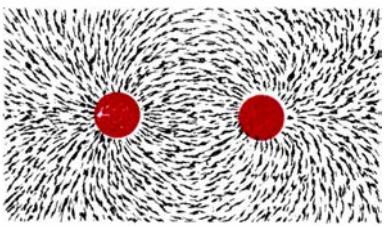


Bild 21 Das elektrische Feld zwischen zwei Kugeln

Eine positive, unendlich klein und leicht beweglich gedachte Ladung würde sich, „setzte“ man sie auf eine Feldlinie, längs dieser zum negativ geladenen Körper bewegen. Von dieser Vorstellung rührt es her, daß man den Feldlinien einen bestimmten Richtungssinn, und zwar von der positiven zur negativen Ladung, zuschreibt. Diese Festlegung ist willkürlich und historisch bedingt. Unseren heutigen Kenntnissen entspräche es viel besser, ein Elektron, also eine negative Ladung, auf die Feldlinie zu setzen. Es würde sich auf ihr entlang zur positiven Ladung bewegen.

Bei der Untersuchung elektrischer Felder zeigte sich, daß die Feldlinien stets senkrecht auf den geladenen Körpern enden und sich nirgends überschneiden. Die Feldlinien sind außerdem bestrebt, sich zu verkürzen und sich gegenseitig auszuweichen. Es herrscht ein „Zug" in Feldlinienrichtung und ein „Druck" quer zu den Feldlinien.

Felder, deren Feldlinien parallel und gleichmäßig dicht verlaufen, nennt man „homogen". Als homogenes Feld können wir das Feld zwischen parallelstehenden, geladenen Platten ansehen, solange wir nur den Plattenzwischenraum betrachten. Mit diesem Feld wollen wir uns noch weiter beschäftigen.

Wir beginnen damit, daß wir die Auslenkung einer kleinen, elektrisch geladenen Metallkugel untersuchen. In allen Punkten des homogenen elektrischen Feldes wird diese Kugel um das gleiche Stück zur Seite gezogen. Das bedeutet, daß die ablenkende Kraft in allen Punkten gleich groß ist.

Um herauszubekommen, von welchen Größen diese Kraft abhängt, erhöhen wir bei gleichem Plattenabstand die an den Platten liegende Spannung. Sofort nimmt der Ausschlag der Kugel zu. Bei genauen Messungen würde sich zeigen, daß eine Spannungsverdopplung auch die Verdopplung der wirkenden Kraft zur Folge hat, eine Verdreifachung der Spannung dreifache Kraft. Plattenspannung und auslenkende Kraft sind einander proportional.

Entfernen wir nun bei unveränderter Spannung die Platten voneinander. Diesmal nimmt die auf die Kugel wirkende Kraft ab, und zwar umgekehrt proportional mit der Entfernung. Ziehen wir die Platten auf doppelten Abstand auseinander, sinkt die Kraft auf die Hälfte usw.

Verändern wir Spannung und Abstand gleichzeitig, ist die auslenkende Kraft dem Quotienten aus Plattenspannung und Plattenabstand proportional:

$$F \sim \frac{U}{d}$$

Dieser Quotient stellt aber nichts anderes dar als das „Spannungsgefälle" entlang einer Feldlinie, d. h. die Spannung, die auf einen Zentimeter Feldlinienlänge entfällt. Er bekommt den

Namen „elektrische Feldstärke“ $E$. Für das homogene elektrische Feld gilt also:

$$\boxed{E = \frac{U}{d}}$$

Als Einheit benutzt man V/m, V/cm, kV/cm, kV/mm usf.
Unsere Schreibweise „$E$“ ist nur für den Sonderfall des homogenen Feldes richtig. Allgemein schreibt man für die Feldstärke „$\mathfrak{E}$“, um deutlich zu machen, daß es sich um einen Vektor handelt, d. h. um eine Größe, zu deren Kennzeichnung nicht nur ein Betrag, sondern auch eine Richtung angegeben werden muß.

*Beispiel:* Liegt eine Spannung von 50 V an den 5 cm voneinander entfernten, parallelstehenden Platten, so beträgt die Feldstärke:

$$E = \frac{U}{d}$$
$$= \frac{50\,\text{V}}{5\,\text{cm}}$$
$$= 10\,\text{V/cm}$$

Erhöht man die Spannung oder verringert man den Plattenabstand, so wächst die Feldstärke. Sie weist an allen Punkten

| Stoff | Durchschlagsfestigkeit in kV/mm |
|---|---|
| Luft bei 20°C und 760 Torr | 3,2 |
| Papier | 6 bis 8 |
| Hartporzellan | 30 bis 35 |
| Hartgummi | 15 bis 40 |
| Paraffin | 40 |
| Hartglas | 20 bis 50 |
| Polystyrol | 50 bis 55 |
| Polyvinylchlorid | 20 bis 60 |
| Glimmer | 60 |
| Styroflex | 100 |

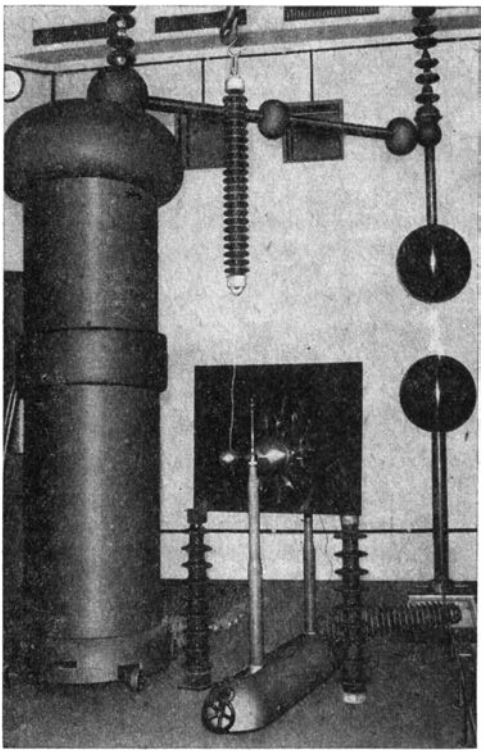


Bild 22
Versuche mit neuen Isolationsmaterialien im Hochspannungslaboratorium des Instituts für Energetik Leipzig

des homogenen Feldes die gleiche Größe und die gleiche Richtung auf.

Eine unbegrenzte Steigerung der Feldstärke ist jedoch nicht möglich. Überschreitet sie einen bestimmten, vom Stoff zwischen den Platten abhängigen Wert, so kommt es zu einem gewaltsamen Ladungsausgleich in Form eines elektrischen Funkens.

Der Wert der Feldstärke, bei dem der „Durchschlag" erfolgt, ist für die Elektrotechnik von großer Bedeutung; denn er gibt an, welche Spannung man einem Isolierstoff bestimmter Dicke höchstens „zumuten" kann. Einige Angaben über die Durchschlagfestigkeit enthält die Tabelle auf S. 74.

Die Zahlen besagen, daß beispielsweise eine Spannung von 3200 V nötig ist, um eine Luftschicht von 1 mm Dicke zu durchschlagen, daß eine 1 mm starke Papierschicht erst von Spannungen zwischen 6000 und 8000 V durchschlagen wird usf.

In nichthomogenen elektrischen Feldern sind die Verhältnisse ungleich komplizierter. In ihnen stimmen Feldlinienlänge und Abstand der Ladungen nicht mehr überein, außerdem verlaufen die Feldlinien weder parallel noch gleichmäßig dicht. Daher hat die elektrische Feldstärke im inhomogenen Feld im allgemeinen von Punkt zu Punkt einen anderen Wert und eine andere Richtung.

Es läßt sich nachweisen, daß die Feldstärke dort größer ist, wo die Feldlinien dichter zusammenrücken. Wie Feldlinienbilder zeigen, ist das besonders an Spitzen, Kanten oder Rundungen mit kleinen Krümmungshalbmessern der Fall. An diesen Stellen tritt daher eine besonders hohe Feldstärke auf. Es kann zur sogenannten „Spitzenwirkung" kommen: Die Luft in unmittelbarer Nähe der Kante oder Spitze wird teilweise elektrisch leitend, und elektrische Ladung strömt an diesen Stellen vom Körper in den Raum.

Die Spitzenwirkung ist in der Technik häufig unerwünscht. So wird bei Hochspannungsfernleitungen stets ein gewisser Energiebetrag durch den „Koronaeffekt" (es ist dies nichts anderes als der an Drähten auftretende Spitzeneffekt) in den Raum abgegeben und ist somit für die Energieübertragung verloren. Spitzen und Kanten von Geräten, die unter Hochspannung stehen, sind aus dem gleichen Grunde bevorzugte Stellen für Funkeneinschläge oder -überschläge. Bei starker elektrischer Aufladung der Atmosphäre ist die Spitzenwirkung mitunter an Metallspitzen, an Ästen oder Masten als feinverzweigtes „St.-Elms-Feuer" zu beobachten.

Andererseits bewährt sich der Spitzeneffekt gut, wenn man Flugstaub aus Rauchgasen entfernen will. Man leitet die Rauchgase durch einen senkrecht stehenden, geerdeten Metallzylinder. In der Mitte des Hohlzylinders ist ein Draht ausgespannt, der sorgfältig gegen die Zylinderwand isoliert wird. Zylinder und Draht werden mit den Anschlüssen einer Hochspannungsquelle verbunden. In unmittelbarer Drahtnähe verlaufen die Feldlinien sehr dicht. Es tritt eine sehr hohe Feldstärke auf. Infolgedessen

werden Elektronen aus dem Draht „gerissen". Sie fliegen in radialer Richtung nach außen und laden dabei die vorbeifliegenden Schmutzteilchen negativ auf. Die mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbundene Zylinderwand zieht die Teilchen an. Sie prallen auf die Wand, geben ihre Ladung ab und fallen zu Boden.

### Der Kondensator

Beginnen wir diesen Abschnitt, indem wir für die aus zwei einander isoliert gegenüberstehenden Platten bestehende Anordnung einen neuen Namen einführen: Wir nennen sie *Kondensator*.

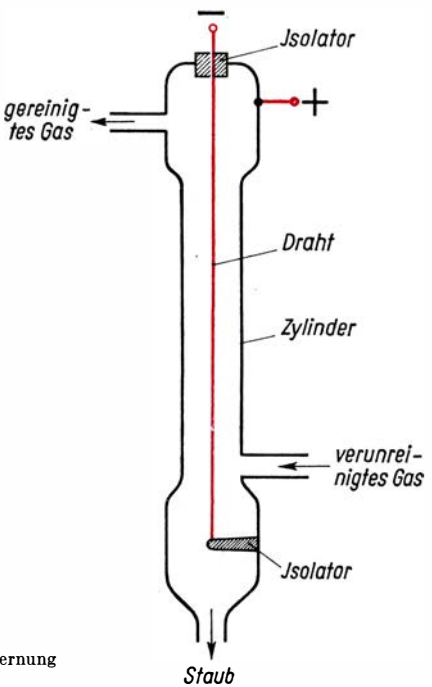



Bild 23 Elektrostatische Entfernung von Flugstaub

Seine wichtigste Eigenschaft ist, daß er eine gewisse Elektrizitätsmenge zu speichern vermag. Verbinden wir die Platten mit einer Spannungsquelle, fließt für kurze Zeit ein „Ladestrom" in den Kondensator. Trennen wir die Spannungsquelle ab, bleibt die Ladung auf dem Kondensator. Die ungleichnamigen Ladungen auf beiden Platten halten sich gewissermaßen gegenseitig fest. Verbinden wir später die Platten durch einen Leiter, wird der Kondensator entladen, die Ladung gleicht sich durch einen „Entladestrom" aus.

Die Elektrizitätsmengen, die ein Kondensator speichern kann, sind allerdings sehr gering, verglichen mit den Elektrizitätsmengen, die durch elektrische Geräte fließen. Ein Kondensator kann daher auf keinen Fall einen „Ersatz" für einen Akkumulator abgeben.

Er bewährt sich dagegen durchaus für „stoßartige" Entladungen, das heißt dort, wo für eine sehr kurze Zeitspanne eine verhältnismäßig große elektrische *Leistung* zur Verfügung stehen muß. Sie wird zum Beispiel benötigt, um ein Elektronenblitzgerät aufleuchten zu lassen.

Von welchen Größen hängt aber die Ladungsmenge ab, die auf einem Kondensator Platz findet?

Erhöhen wir die Spannung, wandert zusätzlich Ladung in den Kondensator; erniedrigen wir die Spannung, fließt Ladung vom Kondensator ab. Es besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen der Ladung eines Kondensators und der an ihm liegenden Spannung.

Die auf jeder Kondensatorplatte befindlichen elektrischen Ladungen stoßen einander ab. Dieser Abstoßung setzt die Spannung einen „Druck" entgegen. Im geladenen Kondensator herrscht Gleichgewicht. Erhöht man die Spannung, werden die Ladungen „zusammengedrängt"; infolgedessen finden weitere Ladungen auf den Kondensatorplatten Platz. Sinkt dagegen die Spannung, so überwiegen die abstoßenden Kräfte; es werden Ladungen von den Kondensatorenplatten „verdrängt".

Die Ladungsmenge $Q$, die ein Kondensator speichert, und die angelegte Spannung $U$ sind einander proportional. Der Proportionalitätsfaktor $C$, der beide Größen miteinander verbindet, hat für jeden Kondensator einen festen, nur von der Kon-

struktion des Kondensators abhängigen Wert. Wir können also schreiben:

$$Q = C \cdot U$$

oder

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

Da der Proportionalitätsfaktor Auskunft gibt, ob ein Kondensator bei einer bestimmten Spannung eine größere oder kleinere Ladungsmenge aufnehmen kann, bezeichnet man ihn als „Kapazität" des Kondensators.

Einheit der Kapazität ist das *Farad* (F), so genannt nach *Michael Faraday* (1791 bis 1867). Ein Kondensator hat eine Kapazität von 1 F, wenn ihn eine Elektrizitätsmenge von 1 As auf eine Spannung von 1 V lädt. Es gilt also die Einheitengleichung:

$$1\ \mathrm{F} = \frac{1\ \mathrm{As}}{1\ \mathrm{V}}$$

Für technische Zwecke ist diese Einheit jedoch zu groß. Deshalb hat man Untereinheiten eingeführt:

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

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

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

Vergrößern wir die Platten, so läßt sich auf ihnen naturgemäß eine größere Elektrizitätsmenge unterbringen. Die Kapazität steigt demnach mit der Plattengröße. Verringern wir den Plattenzwischenraum, nimmt die Kapazität ebenfalls zu. Umgekehrt sinkt bei einer Vergrößerung des Plattenabstandes die Kapazität.

Von entscheidender Rolle ist ferner der zwischen den Platten befindliche Stoff, das Dielektrikum. Füllt man zum Beispiel den ganzen Plattenzwischenraum eines Kondensators mit Papier aus, so verdoppelt sich seine Kapazität. Wählt man als Dielektrikum Glimmer, steigt die Kapazität auf das Siebenfache. Ursache dieser Kapazitätssteigerung sind Wechselwirkungen zwischen dem elektrischen Feld des Kondensators und den

Molekülen des Dielektrikums. Wir wollen auf diese Erscheinungen jedoch nicht näher eingehen.

Man kann für jedes Dielektrikum eine Stoffkonstante, die sogenannte „relative Dielektrizitätskonstante", ermitteln. Sie gibt an, wievielmal größer die Kapazität eines gegebenen Kondensators wird, wenn wir die Luft (genauer das Vakuum) des Plattenzwischenraumes durch das betreffende Dielektrikum ersetzen:

$$\varepsilon_r = \frac{\text{Kapazität mit Dielektrikum}}{\text{Kapazität ohne Dielektrikum}}$$

$$\boxed{\varepsilon_r = \frac{C_{diel}}{C_{vak}}}$$

Relative Dielektrizitätskonstante $\varepsilon$ einiger Isolierstoffe

| | |
|---|---|
| Luft bei 20°C und 760 Torr | 1 |
| Papier | 2 |
| Quarz | 4,5 |
| Glas, Porzellan | 5 |
| Condensa F | 80 |
| Epsilan | bis 10000 |

Die in den beiden letzten Zeilen aufgeführten Werkstoffe wurden speziell für die Konstruktion von Kondensatoren entwickelt. Der Kondensator ist nämlich für viele Aufgaben der Fernmelde- und der Funktechnik, aber auch der Elektronik, unentbehrlich. Das hat dazu geführt, daß im Laufe der Zeit zahlreiche verschiedene Arten und Bauformen von Kondensatoren entstanden. Wir können hier nur eine kleine Auswahl vorstellen.

In Funkempfängern werden Kondensatoren benötigt, deren Kapazität sich stetig verändern läßt. Man baut sie als sogenannte Drehkondensatoren. Statt zweier großer Platten werden zwei aus mehreren kleineren Platten bestehende Plattenpakete benutzt, die kammartig ineinandergreifen und durch Luft getrennt sind. Die Plattenpakete können mehr oder weniger ineinandergeschwenkt werden, wodurch sich die Kapazität verändert.

Will man größere Kapazitäten (bis zu mehreren Mikrofarad) auf möglichst engem Raum unterbringen, benutzt man sogenannte Papierkondensatoren. Sie bestehen aus zwei Metallfolienstreifen, die durch eine Lage Spezialpapier gegeneinander isoliert sind und zu einem Wickel zusammengerollt werden.
Bei Metallpapierkondensatoren sind die Metallfolien durch extrem dünne Metallbeläge ersetzt, die von beiden Seiten auf das Papier gedampft werden. Bei einem Durchschlag verdampft das Metall um die Durchschlagstelle sofort, sie wird isoliert und „heilt sich selbst". Bessere elektrische Eigenschaften weisen Kunststoffoliekondensatoren auf, bei denen eine Kunststoffolie an die Stelle des als Dielektrikum wirkenden Papiers tritt.
Kapazitätswerte bis zu einigen 10 000 Picofarad lassen sich in „Keramikkondensatoren" unterbringen. Als Dielektrikum dient hier ein dünnwandiger keramischer Körper, etwa eine Scheibe oder ein Röhrchen, auf dessen beide Seiten Silberbeläge gebrannt werden.
Werden große Kapazitätswerte – bis zu Tausenden Mikrofarad – benötigt, greift man zum „Elektrolytkondensator". Seine „Platten" bestehen aus einer Aluminiumfolie und aus einem Elektrolyten, also einer Flüssigkeit (häufig von einer Papierfolie aufgesaugt). Beide sind durch eine mikroskopisch dünne Aluminiumoxidschicht getrennt. Wegen der geringen Stärke und der hohen Dielektrizitätskonstante dieser Schicht kommt man auch bei geringen „Plattenflächen" auf sehr hohe Kapazitäten. Da das Aluminiumoxid nur in einer Richtung als Isolator wirkt, in der anderen aber Strom hindurchläßt, darf der Elektrolytkondensator nur mit ganz bestimmter Polung an eine Spannungsquelle angeschlossen werden. Bei falscher Polung wird er zerstört.
„Tantalkondensatoren" sind Elektrolytkondensatoren, deren eine Elektrode aus Tantalpulver gesintert ist, während als Dielektrikum eine Tantalpentoxidschicht dient. Tantalkondensatoren zeichnen sich durch gute elektrische Eigenschaften und besonders geringe Abmessungen aus, kommen daher den Bedürfnissen der modernen Elektronik besonders entgegen.

# Magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes

## Der Magnet und das Magnetfeld

Seit Jahrtausenden weiß man von der Eigenschaft des Magneteisenerzes, Eisen anzuziehen; viele Sagen, Überlieferungen und Legenden berichten davon.
Seit langem ist auch bekannt, daß man Stahl „magnetisieren" kann, indem man ihn mit Magneteisenerz streicht. Stahl wird dabei zu einem Magneten, genauer zu einem „Dauermagneten"; denn seine magnetischen Eigenschaften nehmen im Laufe der Zeit kaum ab.
Hängt man einen magnetisierten Stahlstab, einen „Stabmagneten", so auf, daß er sich leicht um eine vertikale Achse drehen kann, so stellt er sich stets annähernd in die Nord-Süd-Richtung. Selbst wenn man den Stabmagneten um 180° wendet, nimmt er seine ursprüngliche Nord-Süd-Richtung wieder ein.
Wir schließen daraus, daß beide „Magnetpole" eine verschiedene Qualität haben, und nennen das nach Norden gerichtete Ende Nordpol, das nach Süden zeigende Südpol des Magneten.
Nähern wir zwei Stabmagneten einander, so ist zu erkennen, daß ihre beiden Nordpole und ihre beiden Südpole einander abstoßen, während ein Nord- und ein Südpol sich anziehen. Es gilt die Regel:

> Gleichnamige Magnetpole stoßen sich ab,
> ungleichnamige Magnetpole ziehen sich an.

Bringt man ein Stück Weicheisen in die Nähe eines Magneten, wird es gleichfalls magnetisch. Dieser Magnetismus verschwindet bis auf einen geringfügigen Rest, wenn Magnet und Weicheisen wieder voneinander entfernt werden.
Diese Erscheinung heißt *magnetische Influenz*. Sie ruft im Weicheisen stets einen Nordpol gegenüber dem Südpol des Magneten hervor, gegenüber dem Südpol stets einen Nordpol. Daraus

erklärt sich, warum Weicheisen von beiden Polen eines Magneten angezogen wird: Stets stehen sich ungleichnamige Magnetpole – im Magneten und im Eisen – gegenüber.
Teilt man einen Magneten, so stellt jeder Teil wieder einen vollständigen Magneten mit Nord- und Südpol dar. Setzt man die Teilung fort, erhält man stets nur kleiner werdende vollständige Magneten, niemals aber einen einzelnen Nord- oder Südpol.

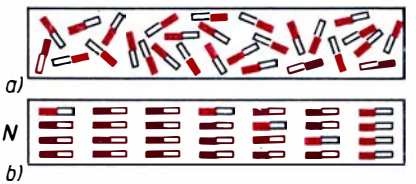



Bild 24 Elementarmagneten
a) im unmagnetischen und
b) im magnetischen Eisen

Man stellt sich vor, daß ein Eisen- oder Stahlstück aus einer sehr großen Zahl winzig kleiner Magneten, sogenannter „Elementarmagneten", zusammengesetzt ist. Sie liegen im unmagnetischen Werkstoff regellos durcheinander. Streicht man ein Stück Stahl mit einem anderen Magneten oder mit Magneteisenerz, so werden die Elementarmagneten allmählich ausgerichtet. Infolgedessen können die magnetischen Wirkungen nunmehr auch nach außen hin in Erscheinung treten. In Stahl behalten die Elementarmagneten, die hier schwer „drehbar" sind, ihre Stellung bei. In Weicheisen, in dem sich die Elementarmagneten leicht ausrichten lassen, fallen sie nach dem Aufhören der magnetischen Influenz erneut durcheinander; der Magnetismus verschwindet wieder.
Diese Theorie läßt sich auf verschiedene Weise experimentell bestätigen. Setzt man einen Dauermagneten für längere Zeit heftigen Erschütterungen aus, wird er teilweise entmagnetisiert, weil zahlreiche Elementarmagneten aus ihrer durch das frühere Magnetisieren erhaltenen Vorzugsrichtung „gestoßen" werden. Durch eine spezielle Versuchsanordnung läßt sich das „Umklappen" der Elementarmagneten beim Magnetisieren eines Stahlstabes hörbar machen.
Zwei bekannte Erscheinungen werden ebenfalls durch die Theorie elementarer Magneten erklärt: Entfernen wir einen

Weicheisenstab aus dem Bereich eines Magneten, verschwindet der durch Influenz hervorgerufene Magnetismus nicht restlos, weil stets einige Elementarmagneten ausgerichtet bleiben. Umgekehrt ist es nicht möglich, die magnetischen Wirkungen eines Stahlstabes beliebig zu steigern. Sind nämlich nahezu alle Elementarmagneten ausgerichtet, wird eine weitere Magnetisierung unmöglich, der Stahl ist „magnetisch gesättigt".
Den Raum, in dem um einen Magneten Kraftwirkungen auftreten, nennt man *magnetisches Feld*. Auch hier wieder verwendet man den Hilfsbegriff der magnetischen Feldlinien, die in jedem Punkte eines Magnetfeldes die Richtung der wirkenden Kraft angeben.

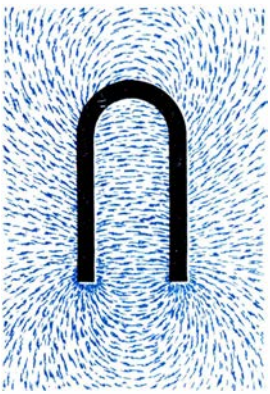


Bild 25 Feld eines Hufeisenmagneten

Jedermann weiß, daß man ein anschauliches Bild dieser Feldlinien und damit des magnetischen Feldes erhalten kann, indem man einen Magneten mit einem Kartonblatt bedeckt, auf das Eisenfeilspäne gestreut werden. Klopft man leicht an das Blatt, so formen sich die Eisenteilchen zu charakteristischen Linien und Ketten. Sie entstehen, weil die Eisenteilchen durch magnetische Influenz gerichtet und „aneinandergehängt" werden. Würden wir statt der Eisenteilchen zahlreiche kleine Magnetnadeln aufstellen, erhielten wir ein ähnliches Bild.
Die Feldlinienbilder scheinen anzudeuten, daß die Feldlinien an einem Magnetpol beginnen und am anderen enden. Im Gegen-

satz zu den elektrischen Feldlinien, die an Ladungen begannen und endeten, ist das jedoch nicht der Fall. Die magnetischen Feldlinien sind vielmehr geschlossene Linien, die wir uns auch im Innern eines Magneten fortgesetzt denken müssen. Nord- und Südpol eines Magneten sind also nur Austritts- bzw. Eintrittsstellen der Feldlinien, nicht aber Anfangs- und Endpunkte.

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, auch den magnetischen Feldlinien einen bestimmten Richtungssinn zuzusprechen. Man hat willkürlich festgelegt, daß die Feldlinien außerhalb des Magneten vom Nordpol zum Südpol verlaufen. Der Nordpol einer kleinen, leicht drehbaren Magnetnadel, die wir in das Feld eines Magneten bringen, weist demnach in Feldlinienrichtung, sofern die Stärke des „künstlichen" Magnetfeldes groß gegenüber der Stärke des „natürlichen" Magnetfeldes der Erde ist.

Die Tatsache, daß die Feldlinien sich niemals überschneiden und sich voneinander entfernen, können wir auch diesmal wieder dahingehend deuten, daß quer zur Feldlinienrichtung ein „Druck" besteht. Umgekehrt weist die Anziehung zwischen ungleichnamigen Magnetpolen auf einen „Zug" in Richtung der Feldlinien hin.

### Das magnetische Feld des elektrischen Stromes

Dem dänischen Physiker *Hans Christian Oersted* (1777 bis 1851) verdanken wir eine Entdeckung, die für die Technik von größter Bedeutung werden sollte. Oersted beobachtete, daß eine Kompaßnadel jedesmal zur Seite schwang, wenn durch einen in der Nähe befindlichen Draht elektrischer Strom floß. Diese Wirkung war unabhängig vom Material, aus dem der Draht bestand, änderte sich aber mit der Stromstärke.

Nähere Untersuchungen ergaben: Jeder elektrische Strom ruft um seinen Leiter ein magnetisches Feld hervor. Man kann es mit Hilfe von Eisenfeilspänen sichtbar machen und erkennt, daß die Feldlinien in diesem Fall geschlossene, konzentrische Kreise sind.

Magnetpole im uns bekannten Sinne fehlen hier völlig. Der Richtungssinn der Feldlinien dagegen bleibt erhalten; denn

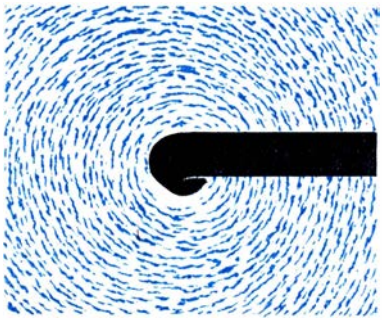


Bild 26 Magnetfeld eines stromdurchflossenen Drahtes

immer weist eine kleine Magnetnadel in diesem Feld in ganz bestimmte Richtungen, und jeder Versuch, sie um 180° zu drehen, führt zu einem Mißerfolg. Beim Umkehren der Stromrichtung dagegen erfolgt diese 180°-Drehung. Stromrichtung und Feldlinienrichtung hängen also voneinander ab, und zwar nach der Regel:

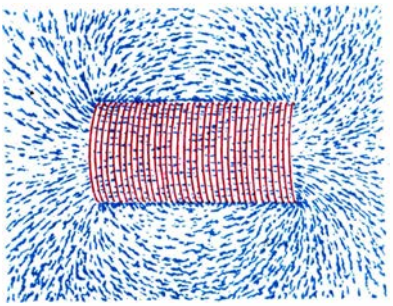
> Für einen in Richtung des Stromes blickenden Beobachter verlaufen die Feldlinien im Uhrzeigersinn.

Man kann diese Gesetzmäßigkeit auch anders ausdrücken:

> Umschließt man den Leiter so mit der rechten Hand, daß der Daumen in die Stromrichtung zeigt, so weisen die Fingerspitzen in die Richtung der Feldlinien.

Von jedem einzelnen, noch so kleinen Drahtstück gehen magnetische Feldlinien aus. Wickelt man den Draht zu einer Spule zusammen, so setzen sich die einzelnen Magnetfelder der Drahtstückchen und Spulenwindungen zu einem resultierenden Feld zusammen, das die im Bild 27 gezeigte Form hat. Das Bild dieses Feldes entspricht dem eines Stabmagneten. Ist die Länge der Spule groß gegenüber ihrem Durchmesser, verlaufen die Feldlinien im Spuleninnern parallel und gleichmäßig dicht. Das Spulenfeld im Innern ist homogen.

Bild 27 Magnetfeld einer Spule



Hängt man eine stromdurchflossene Spule so auf, daß sie sich leicht um eine senkrechte Achse drehen kann, stellt sie sich in die Nord-Süd-Richtung ein. Richtungsumkehr des Stromes verursacht eine Spulendrehung um 180°.
Die beiden Spulenenden sind die *Pole* des entstandenen Elektromagneten. Die Lage von Nord- und Südpol läßt sich mit Hilfe folgender Regel ermitteln:

> Ein auf die Stirnseite der Spule blickender Beobachter steht vor einem Südpol, wenn der Strom die Spulenwindungen im Uhrzeigersinn durchfließt. Fließt der Strom im Gegen-Uhrzeigersinn, steht der Beobachter vor dem Nordpol.

Selbstverständlich kann man sich auch beim magnetischen Feld nicht damit begnügen, es nur qualitativ zu beschreiben. Da magnetische Felder elektrischer Ströme in der Elektrotechnik eine überaus wichtige Rolle spielen, muß man sie exakt berechnen und ihre Daten bei Konstruktionen vorherbestimmen können.
Eine wichtige Grundgröße des magnetischen Feldes ist die magnetische Feldstärke. Wir untersuchen sie wieder mit Hilfe der Kraftwirkungen, die im magnetischen Feld auftreten. Dabei wollen wir uns auf ein homogenes Feld beschränken, wie es etwa im Innenraum einer langgestreckten Spule auftritt.
Man hängt eine Magnetnadel an einem dünnen Draht in das Innere der Spule und stellt die Nadel bei stromloser Spule so ein,

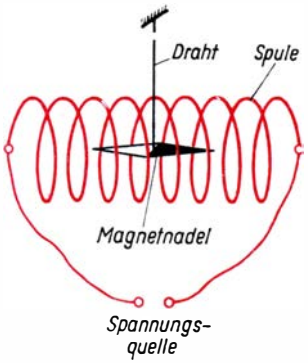



Bild 28 Messung der magnetischen Feldstärke mit Hilfe einer Magnetnadel

daß sie rechtwinklig zur Spulenachse steht. Fließt Strom durch die Spule, suchen die auftretenden Kräfte die Nadel parallel zu den Feldlinien im Innenraum zu stellen. Es entsteht ein Drehmoment, das durch entsprechende Verdrillung des Aufhängedrahtes kompensiert werden kann. Die notwendige Verdrillung des Drahtes gibt ein Maß für das Drehmoment und damit zugleich für die Feldstärke im Innenraum der Spule.

Versuche mit verschiedenen Stromstärken, Spulen verschiedener Windungszahl und Länge zeigen: Die Feldstärke wächst mit der Windungszahl und der Stromstärke. Vervierfachung der Stromstärke und Verdreifachung der Windungszahl (bei gleicher Spulenlänge) hat ebenso zwölffache Feldstärke zur Folge wie Versechsfachung der Stromstärke und Verdopplung der Windungszahl. Das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl spielt eine entscheidende Rolle. Man nennt es „Amperewindungszahl". Eine Spule von 500 Windungen, die von einem Strom von 2 A durchflossen wird, hat 1000 „Amperewindungen".

Läßt man Stromstärke und Windungszahl unverändert und vergrößert man statt dessen die Spulenlänge, indem man die Spulenwindungen auseinanderzieht, sinkt die Feldstärke, und zwar umgekehrt proportional mit der Spulenlänge. Wir können daher für die Feldstärke den Ausdruck ansetzen:

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

Setzt man die Stromstärke in A, die Spulenlänge in cm ein, so erhält man die magnetische Feldstärke $H$ in „Amperewindungen je Zentimeter", abgekürzt als A/cm (die Windungszahl hat keine Maßbezeichnung).

*Beispiel:* In einer Spule von 250 Windungen und 4 cm Länge herrscht bei einer Stromstärke von 1,5 A eine Feldstärke von

$$H = \frac{1{,}5\ \text{A} \cdot 250}{4\ \text{cm}}$$

$$= 93{,}6\ \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

In einem inhomogenen magnetischen Feld kann – ebenso wie im inhomogenen elektrischen Feld – die Feldstärke jeweils nur für einen Punkt angegeben werden. Da die magnetische Feldstärke wie die elektrische ein Vektor ist, schreibt man „$\mathfrak{H}$", sofern es nicht nur auf den Betrag der Feldstärke ankommt.

### Stoffe im magnetischen Feld

In der Formel für die Feldstärke wird das Magnetfeld durch seine Ursache charakterisiert: durch den Strom, der einen Leiter

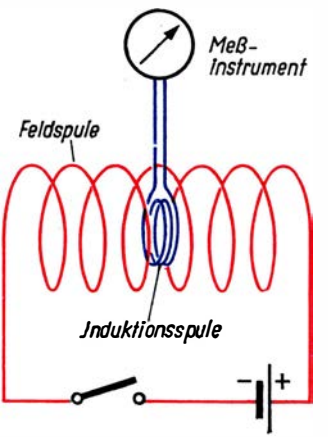



Bild 29 Versuchsanordnung zum Nachweis der Induktion

bzw. eine Spule durchfließt. Wir können aber für das Magnetfeld auch eine Maßgröße gewinnen, indem wir seine Wirkungen untersuchen. Das führt zum Begriff der *magnetischen Induktion.*
Bringen wir in das Innere einer Spule, der *Feldspule,* eine Drahtschleife, die *Induktionsspule,* deren Enden wir mit einem empfindlichen Meßinstrument verbinden, so zeigt das Instrument jedesmal einen Ausschlag, wenn der Strom durch die Feldspule ein- oder ausgeschaltet wird. In der Induktionsspule wird ein kurzer *Spannungsstoß* hervorgerufen, *induziert.* Seine Größe ist durch das Produkt aus Spannung und Zeit bestimmt und wird in *Voltsekunden* (Vs) gemessen. Wir werden später (vgl. S. 116) auf diese äußerst wichtige Erscheinung ausführlich eingehen. Hier genügt es zu wissen, daß man mit Hilfe dieses Spannungsstoßes ein Magnetfeld quantitativ beschreiben kann. Allerdings muß dabei auch die Fläche der Induktionsspule berücksichtigt werden, so daß wir als Einheit der magnetischen Induktion ($\mathfrak{B}$) $\frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$ erhalten. Auch die magnetische Induktion ist ein Vektor; ein Magnetfeld läßt sich mit Hilfe der *Induktionslinien* darstellen.

Den Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke $\mathfrak{H}$ und magnetischer Induktion $\mathfrak{B}$ stellt die Beziehung her:

$$\boxed{\mathfrak{B} = \mu_0 \cdot \mathfrak{H}}$$

$\mu_0$ ist die *Induktionskonstante:*

$$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{A} \cdot \text{cm}}$$

Das Zustandekommen ihres Zahlenwertes ist hier unwichtig; die Maßbezeichnung von $\mu_0$ erhalten wir leicht, indem wir die Einheiten für $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B}$ einsetzen.
Die magnetischen Wirkungen einer stromdurchflossenen Spule werden vervielfacht, wenn wir einen Eisenkern in die Spule einführen. Der Kern wirkt ebenso, als habe man die Amperewindungszahl der Spule erhöht.
Das wird verständlich, wenn wir auf die Theorie der Elementarmagneten zurückgreifen und annehmen, daß auch in diesen der

Magnetismus durch kreisende „Elementarströme" hervorgerufen wird. Sie werden durch den Spulenstrom so ausgerichtet, daß sie parallel zu diesem fließen (vgl. S. 109). Im Innern des Eisenkerns heben sie sich teilweise gegeneinander auf, außen dagegen verstärken sie den Spulenstrom.

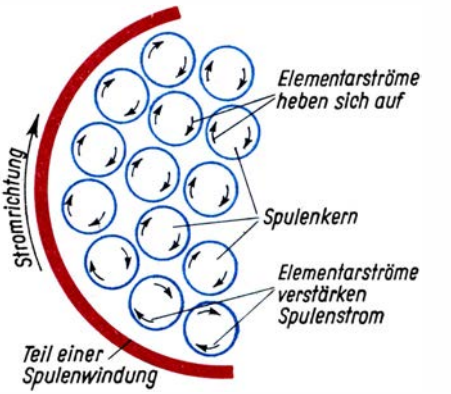



Bild 30
Gerichtete Elementarströme verstärken die magnetischen Wirkungen

Die magnetische Induktion einer „eisengefüllten" Spule ist demnach viel größer als die der „luftgefüllten" Spule. Um den Einfluß des Kerns zahlenmäßig angeben zu können, führte man den Begriff der „(relativen) Permeabilität" $\mu_r$ ein:

$$\mu_r = \frac{\text{Induktion der gefüllten Spule}}{\text{Induktion der leeren Spule}}$$

$\mu_r$ ist eine unbenannte Zahl und hat für das Vakuum (und praktisch auch für Luft) den Wert 1.
Für den Zusammenhang zwischen Feldstärke und magnetischer Induktion erhalten wir nunmehr den allgemeinen Ausdruck:

$$\mathfrak{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathfrak{H}$$

Stoffe, bei denen $\mu_r$ wesentlich über 1 liegt, die sich also ähnlich wie Eisen verhalten, nennt man *ferromagnetisch*. Es sind neben dem Eisen Nickel, Kobalt und Gadolinium (ein Metall aus der

Gruppe der seltenen Erden). Dazu kommen ferner zahlreiche Legierungen, die speziell für die Zwecke der Elektrotechnik entwickelt wurden. Man erreicht mit ihnen Werte von $\mu_r > 100000$.

Aber auch alle übrigen Stoffe haben, wenn auch meistens sehr geringe, magnetische Eigenschaften. Ihre relative Permeabilität liegt sehr nahe 1. „Paramagnetische" Stoffe ($\mu_r > 1$), zum Beispiel Hartgummi, verhalten sich wie Eisen, wenn auch in ungleich schwächerem Maße. Sie werden in ein Magnetfeld hineingezogen. Diamagnetische Stoffe ($\mu_r < 1$), zum Beispiel Wasser und Kupfer, suchen dem Magnetfeld auszuweichen.

Bei ferromagnetischen Stoffen ist die relative Permeabilität keine bloße Materialkonstante. Sie hängt auch von der Feldstärke ab. Würde man für einen ferromagnetischen Stoff die Induktion in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke darstellen, so müßte sich im Falle unveränderlicher Permeabilität eine Gerade ergeben. In Wirklichkeit verlaufen jedoch die „Magnetisierungskurven" ganz anders: Sie steigen zunächst steil an, biegen dann aber um und laufen viel flacher aus. Die Gründe für diese Erscheinung haben wir bereits erwähnt: Sind alle Elementarmagneten bzw. Elementarströme ausgerichtet, so ist das Material magnetisch „gesättigt".

Wird Eisen im Magnetfeld magnetisiert und schaltet man das Magnetfeld ab, so verschwindet der Magnetismus des Eisens nicht restlos, da nicht alle Elementarströme wieder „durcheinanderfallen". Das hat weitreichende praktische Folgen.

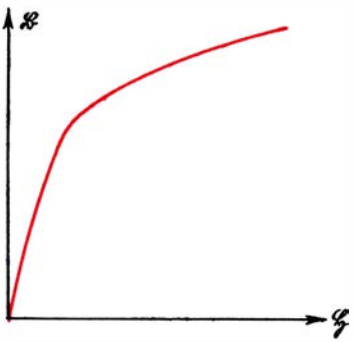



Bild 31 Magnetisierungskurve

Steigern wir die Feldstärke in unmagnetischem ferromagnetischem Werkstoff, erhalten wir für die Induktion die uns bereits bekannte Magnetisierungskurve. Wir nennen sie hier „Neukurve", und zwar deshalb, weil sie nur dann durchlaufen wird, wenn das Material vorher noch nicht magnetisiert war.
Senken wir die Feldstärke wieder, nimmt auch die Induktion ab. Mißt man die zusammengehörenden Feldstärke- und Induktionswerte, erhält man allerdings eine andere Kurve. Bei der Feldstärke Null ist immer noch eine erhebliche magnetische Induktion vorhanden. Der Abschnitt vom Nullpunkt bis zum Schnitt der $+\mathfrak{B}$-Achse mit der Kurve gibt diese verbleibende Induktion an. Dieses Stück ist ein Maß für den Restmagnetismus, für die „Remanenz". Erst wenn wir eine bestimmte „negative", das heißt umgekehrt gerichtete Feldstärke wirken lassen, erreicht die Induktion den Wert Null. Diese notwendige negative Feldstärke nennt man „Koerzitivkraft". Bei weiter ins Negative erhöhter Feldstärke nimmt auch die Induktion negative Werte an.
Läßt man die Feldstärke erneut in positiver Richtung steigen, hinkt die Induktion gleichfalls wieder nach: Bei der Feldstärke Null bleibt eine Restinduktion, und erst bei einer gewissen positiven Feldstärke schlägt die Induktion von negativen zu positiven Werten um.

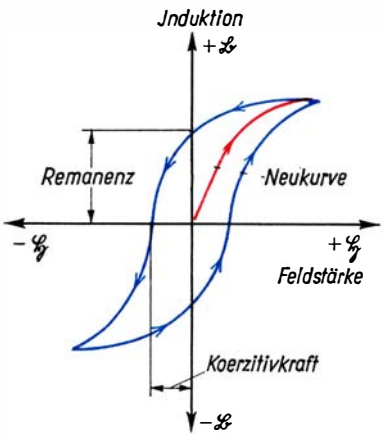



Bild 32 Die Hystereseschleife

Wir erhalten einen in sich geschlossenen Kurvenzug, die *Hystereseschleife.* Die von ihr eingeschlossene Fläche entspricht dem Energiebetrag, der zum Ummagnetisieren des Werkstoffes erforderlich ist. Diese „Hystereseverluste" spielen besonders in der Wechselstromtechnik eine wichtige Rolle.
Die Hystereseverluste sind um so geringer, je kleiner die von der Schleife begrenzte Fläche ist. Für weiches Eisen zum Beispiel erhält man eine sehr schmale Hystereseschleife, die Hystereseverluste sind gering.
Materialien mit breiter Hystereseschleife dagegen erfordern zum Ummagnetisieren einen weit höheren Energieaufwand. Sie sind daher vor allem für Dauermagneten geeignet.

## Die magnetischen Wirkungen elektrischer Ströme in der Technik

Von den Wirkungen elektrischer Ströme erlangten die magnetischen Erscheinungen mit weitem Vorsprung die größte Bedeutung. Sie werden in zahllosen Geräten, Apparaturen und Maschinen genutzt und haben die Gewinnung, Fortleitung und Verwendung elektrischer Energie überhaupt erst in größerem Umfange ermöglicht.
Bereits Oersteds Beobachtung, daß eine Magnetnadel durch den elektrischen Strom abgelenkt wird, führte zur Konstruktion von Meßinstrumenten für den elektrischen Strom. Sie bestehen in einfachster Ausführung aus einer Spule, in deren Innenraum

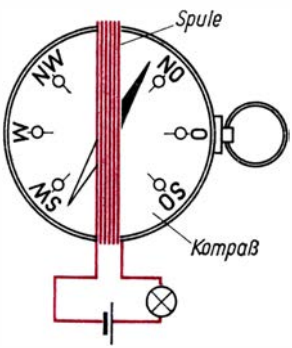



Bild 33 Kompaß als Galvanoskop

sich eine Kompaßnadel befindet. Dieses *Galvanoskop* wird so gedreht, daß die Magnetnadel parallel zu den Spulenwindungen steht. Fließt Strom durch die Spule, sucht das Magnetfeld die Nadel senkrecht zu den Windungen, das heißt in die Feldlinienrichtung, zu drehen, während das magnetische Erdfeld die Nadel in ihrer Anfangsstellung zu halten sucht. Die Nadel nimmt eine Zwischenstellung ein, wobei der Drehwinkel von der Stärke des Stromes durch die Spule abhängt. In verbesserten Ausführungen des Galvanoskops, mit denen sich auch schwächste Ströme noch nachweisen lassen, wird die Wirkung des Erdfeldes ausgeschaltet, und die Nadel dreht sich gegen eine mechanische Hemmkraft.

Robuste und relativ billige Meßinstrumente für den elektrischen Strom sind die *Dreheiseninstrumente.* Liegen im Innenraum einer Spule zwei Streifen aus Weicheisen, so werden sie magnetisiert, sobald Strom durch die Spule fließt. Da an gleichliegenden Enden des Eisens Nord- bzw. Südpole entstehen, stoßen sich die Streifen ab. Im Dreheiseninstrument ist ein Eisenplättchen fest angebracht, das andere kann eine Drehbewegung ausführen und dabei gegen eine Federkraft einen Zeiger über eine Skale führen. Kehrt man die Stromrichtung durch die

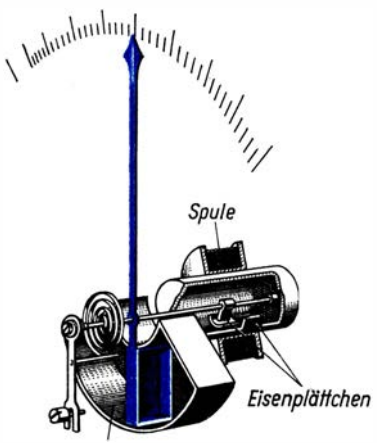



Bild 34 Dreheiseninstrument

Spule um, wechseln die Magnetpole in beiden Plättchen ihre Plätze. Die Plättchen stoßen sich nach wie vor ab. Deshalb kann man das Dreheiseninstrument nicht nur für Gleichstrom-, sondern auch für Wechselstrommessungen benutzen.

Elektromagneten werden in der Technik für mannigfache Aufgaben eingesetzt. Das hat mehrere Gründe: Zunächst lassen sich mit Hilfe von Elektromagneten weit höhere Anziehungskräfte hervorrufen als mit Dauermagneten. Diese Anziehungskräfte aber haben nicht, wie die eines Dauermagneten, stets den gleichen Wert. Sie lassen sich vielmehr durch Verändern der Stromstärke in der Spule des Magneten in weiten Grenzen regulieren. Man kann außerdem, was bei keinem Dauermagneten möglich ist, die Anziehungskraft nach Bedarf durch Ein- oder Ausschalten des Magneten zum Wirken oder zum Verschwinden bringen. Endlich kann ein Elektromagnet über entsprechende Verbindungsleitungen auch aus großer Entfernung bedient werden.

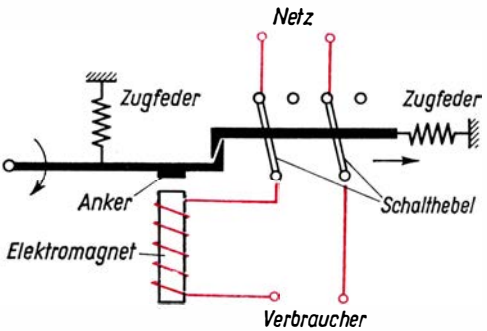
Die Ausführungsform der Elektromagneten richtet sich nach dem Verwendungszweck. Neben Stab- und Hufeisenmagneten finden wir zahlreiche Sonderformen.

Hubmagnete haben sich hervorragend bewährt, um ferromagnetische Materialien zu transportieren. Besonders lose oder sperrige Eisenteile – etwa Schrott – lassen sich ohne Transportgefäße oder andere Hilfseinrichtungen leicht mit Hubmagneten befördern. Weit geringere Anziehungskräfte genügen, um Ventile, Schieber oder Absperrhähne elektromagnetisch zu betätigen. Besonders in Anlagen, die fernbedient werden sollen, haben derartige magnetisch betätigte Steuereinrichtungen weite Verbreitung gefunden.

Das langwierige Einspannen ferromagnetischer Werkstücke, die auf einer Werkzeugmaschine bearbeitet werden sollen, läßt sich vereinfachen und beschleunigen, indem man sogenannte elektromagnetische Spannplatten einsetzt, auf denen die Werkstücke durch mehrere entsprechend verteilte Elektromagneten festgehalten werden.

Die elektromagnetische Betätigung von Weichen und Signalen hat im Verkehrswesen die komplizierten mechanischen, störanfälligen Kraftübertragungen mit Seilzügen bereits an vielen Stellen abgelöst.

Bild 35
Elektromagnetischer Überstromschalter




Zum Schutz elektrischer Anlagen vor Kurzschlüssen oder vor zu starken Strömen werden Überstromschalter benutzt. Sie enthalten ebenfalls einen Elektromagneten als wichtigsten Bestandteil. In Bild 35 ist dicht vor einem Pol eines Elektromagneten ein ferromagnetischer Anker angebracht, der durch eine Zugfeder in gewissem Abstand vom Magnetpol gehalten wird. In dieser Stellung verriegelt der Anker einen Schalthebel, der in einem Stromkreis mit der Magnetspule liegt. Überschreitet die Stromstärke einen bestimmten kritischen Wert, werden die Anziehungskräfte so stark, daß sie die Kraft der Zugfeder überwinden. Der Schalthebel wird entsperrt, und eine zweite Zugfeder reißt ihn zurück, wobei der Stromkreis unterbrochen wird. Die in Wohnungen verwendeten *Sicherungsautomaten* funktionieren nach dem gleichen Prinzip.

Ähnlich arbeitet die elektrische Klingel. Wird der Klingelknopf gedrückt, fließt Strom durch den Elektromagneten. Infolge-

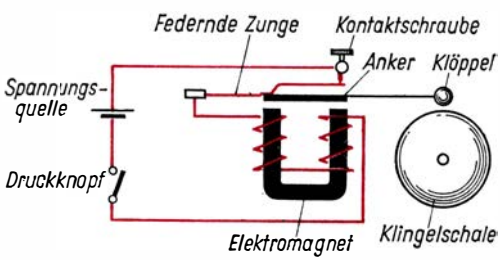



Bild 36
Die elektrische Klingel

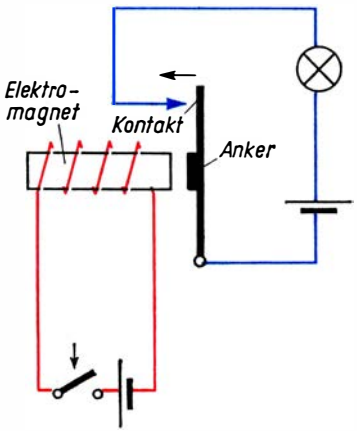



Bild 37
Relais in Arbeitsstromschaltung

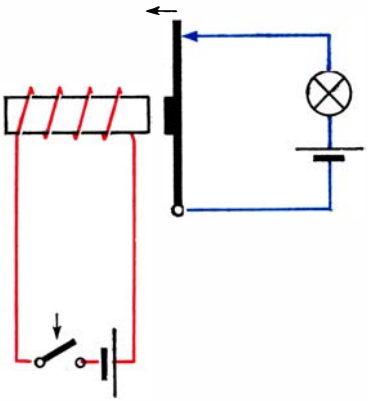
dessen wird ein federnder Anker angezogen, der den Stromfluß unterbricht. Die Anziehungskraft setzt aus, der Anker schwingt zurück und schließt den Stromkreis erneut, worauf sich das Spiel wiederholt. Am Ende des Ankers ist ein Klöppel angebracht, der beim Hin- und Herschwingen an eine Klingelschale schlägt.

Ein wichtiges Bauelement der Elektrotechnik ist das *Relais*. Mit seiner Hilfe ist es möglich, durch schwache Ströme stärkere Ströme schalten oder Umschaltvorgänge auslösen zu lassen.

Eine Magnetspule, die mitunter viele Tausende Windungen dünnen Drahtes enthält, wird vom schwachen *Steuerstrom* durchflossen. Sie zieht dabei einen Anker an, der seinerseits Schaltkontakte betätigt. Relais werden in *Arbeitsstromschaltung* und in *Ruhestromschaltung* betrieben. Bei der Arbeitsstromschaltung wird vom Anker ein Stromkreis immer dann eingeschaltet, wenn Steuerstrom durch die Magnetspule fließt. Diese Schaltung finden wir meistens dort, wo schwache Ströme dazu dienen, starke Ströme zu schalten. Das ist unter anderem in vielen modernen Wohnungen der Fall, wo die Lichtstromkreise über Relais ein- und ausgeschaltet werden, die mit Hilfe einfacher Schwachstromdruckknöpfe bedient werden.

Bei der Ruhestromschaltung dagegen wird vom Relais ein Stromkreis jedesmal eingeschaltet, wenn der Strom durch die

Bild 38
Relais in Ruhestromschaltung



Relaisspule unterbrochen wird. Ein typisches Anwendungsbeispiel hierfür sind Alarmanlagen: Wird ein dünner Draht zerrissen oder ein Lichtstrahl unterbrochen, setzt der Stromfluß durch die Relaisspule aus. Sein Anker fällt ab und schließt einen zweiten Stromkreis, in dem eine Alarm- oder Schutzvorrichtung liegt.
Da der Anker mehrere Schaltkontakte gleichzeitig betätigen kann, lassen sich mit Hilfe eines Relais auch komplizierte Schaltvorgänge auf einfache Weise auslösen.

## Telegraf und Telefon

Versuche, Elektromagneten bei der Nachrichtenübermittlung einzusetzen, gehen bis in die erste Hälfte des vorigen Jahrhunderts zurück. Dem Amerikaner *Samuel Morse* (1791 bis 1872) verdanken wir den ersten Telegrafen, der sich allgemein durchsetzen konnte und noch heute hier und da benutzt wird.
Der Anker eines kräftigen Elektromagneten ist als Schreibhebel ausgeführt und drückt jedesmal, wenn er von den Magnetpolen angezogen wird, ein mit Tinte befeuchtetes *Farbrädchen* gegen einen schmalen Papierstreifen, der von einem Uhrwerk oder von einem Elektromotor langsam am Farbrädchen vorbeigezogen wird. Schaltet man den Strom im Rhythmus von Morsezeichen

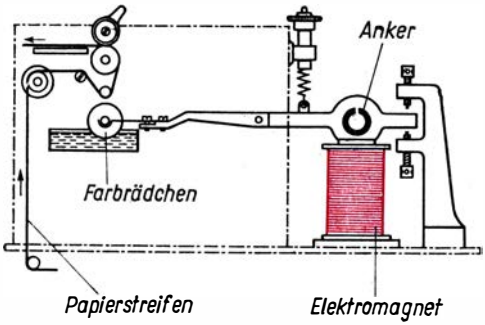



Bild 39 Aufbau des Farbschreibers

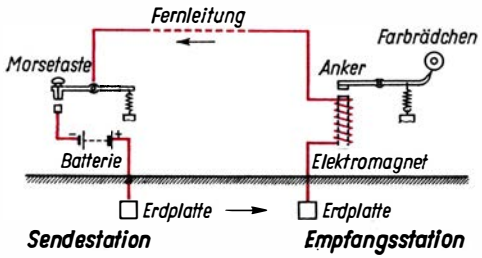



Bild 40 Ersetzen einer Fernleitung durch das Erdreich

ein und aus, schreibt das Farbrädchen diese Zeichen als Punkte und Striche auf den Papierstreifen.

Der Morsetelegraf wurde ständig verbessert; auch seine Betriebsweise erfuhr manche Veränderung. So bedeutete es eine wesentliche Vereinfachung und Verbilligung, als man den einen der beiden Leitungsdrähte durch die elektrisch leitende Erde ersetzte. Später gelang es, auf einer Leitung in beiden Richtungen gleichzeitig mehrere Telegramme zu übermitteln. Durch die Einführung des Relais und die Verlegung von Unterseekabeln wurde es möglich, auch größte Entfernungen telegrafisch zu überbrücken.

Vor allem zwei Nachteile des Morsetelegrafen aber ließen sich nicht beseitigen: Seine Arbeitsgeschwindigkeit blieb relativ gering, und es war in jedem Falle nötig, ein Telegramm zunächst

in Morsezeichen und am Bestimmungsort wieder in Buchstaben zu verwandeln.

Sehr früh bemühte man sich daher um *Typendrucktelegrafen*, das heißt um Telegrafen, bei denen an der absendenden Stelle Druckbuchstaben eingegeben wurden, während der Empfänger unmittelbar Druckbuchstaben niederschrieb. Im Laufe der Zeit entstanden zahlreiche Geräte, die diese Aufgabe mehr oder weniger gut erfüllten. Heute hat sich allgemein die Fernschreibmaschine durchgesetzt.

Wir können ihre Arbeitsweise nur andeuten: Beide Partner verfügen über je eine Fernschreibmaschine. Sie dient zum Senden und zum Empfangen und hat einen Typensatz und eine Tastatur wie eine Schreibmaschine. Sobald beim „Sender" ein Typenhebel gedrückt wird, verstellen sich sogenannte Wählschienen. Sie lösen eine Kombination von Stromstößen aus, die



Bild 41
TELEX-Endstelle

über die Fernleitung zur „Empfängermaschine" gelangen. Jedem Buchstaben und jedem Zeichen entspricht eine derartige Kombination.

In der Empfängermaschine werden mit Hilfe der Stromstöße von einem Elektromagneten ähnliche Schienen eingestellt. Sie lösen diesmal jedoch keine Stromstöße aus, sondern bringen den der Impulskombination entsprechenden Typenhebel zum Anschlagen. Beim Sender und vom Empfänger werden also die gleichen Buchstaben geschrieben.

Die Bedienung der Fernschreibmaschine erfordert keine besonderen Fachkenntnisse. Man kann daher, wie es in den meisten Ländern üblich ist, ein Fernschreibnetz – TELEX-Netz genannt – aufbauen, in dem jeder Teilnehmer mit jedem anderen unverzüglich in Fernschreibverbindung treten kann. Mit Zusatzgeräten lassen sich Fernschreiben in Form gelochter Papierstreifen für beliebige Wiederholungen oder für eine Durchgabe in verkehrsschwachen Zeiten speichern.

Nach einem anderen, etwas einfacheren Prinzip arbeitet der sogenannte Hellschreiber. Auch bei ihm wird eine Impulskombination gesendet. Sie steuert beim Empfänger einen Elektromagneten, der im Impulsrhythmus eine *Schreibspirale* gegen einen sich bewegenden Papierstreifen drückt. Impulse, Schreibspirale und Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine sind so aufeinander abgestimmt, daß beim Empfänger Blockbuchstaben niedergeschrieben werden.

Auch der Fernsprecher wäre ohne Elektromagneten kaum vorstellbar. Um fernzusprechen, braucht man zunächst nicht mehr als eine Gleichspannungsquelle, die Fernleitung, ein Mikrofon und einen Fernhörer.

Das Mikrofon besteht aus einer mit Kohle ausgekleideten Kapsel, die teilweise mit Kohlekörnern gefüllt ist. Nach vorn wird die Kapsel durch eine elastische Membran abgeschlossen.

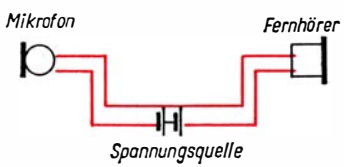



Bild 42 Prinzip des Fernsprechers

Wird gegen die Membran gesprochen, drückt sie die Kohlekörner im Takt der Schallwellen mehr oder weniger zusammen. Infolgedessen schwankt der Berührungswiderstand der Körner im Schallwellenrhythmus. Schickt man Gleichstrom durch die Mikrofonkapsel, so verändert er seine Stärke gleichfalls im Rhythmus der Widerstandsschwankungen und damit der Schallwellen.

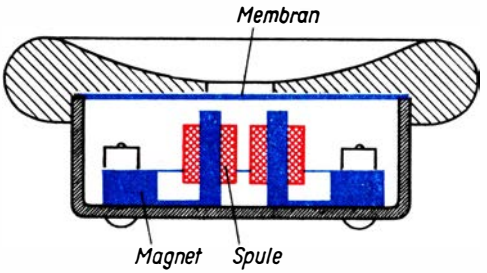



Bild 43 Schnitt durch einen Fernhörer (vereinfacht)

Im Fernhörer werden die Stromschwankungen in Schallwellen zurückverwandelt. Zu diesem Zweck läßt man den schwankenden Strom durch eine Magnetspule fließen, deren Feld entsprechend verstärkt oder geschwächt wird. Dicht vor der Spule sitzt eine dünne Eisenmembran. Sie wird im Rhythmus des Spulenstromes angezogen oder losgelassen und versetzt dabei die Luft in entsprechende Schwingungen. So entstehen wieder Schallwellen, die unser Ohr aufnehmen kann.

Mit zwei Mikrofonen, zwei Fernhörern, einer Spannungsquelle und dem entsprechenden Leitungsmaterial läßt sich eine Fernsprechverbindung aufbauen, mit der in beiden Richtungen gesprochen werden kann. Sie wäre jedoch nur zur Demonstration des Prinzips, nicht aber für einen praktischen Fernsprech-

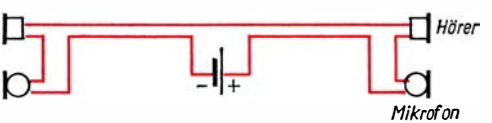



Bild 44 Einfachste zweiseitige Fernsprechverbindung

verkehr geeignet. Dazu mußten vorher noch zahlreiche Verbesserungen und Ergänzungen erdacht werden.

So war zum Beispiel das Problem des „Anrufens" zu lösen. Schon frühzeitig wurde beim Fernsprechen allgemein der „Wecker", eine elektrische Klingel, eingeführt. Sie wird mit Hilfe eines selbsttätigen Schalters, der beim Auflegen und beim Abheben des Hörers betätigt wird, immer dann mit der Fernleitung verbunden, wenn kein Gespräch über die Leitung geführt wird.

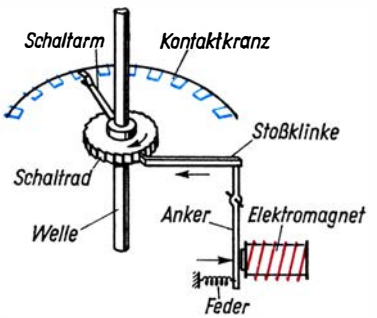
Sollte der Fernsprecher größere Bedeutung erlangen, durfte man sich außerdem mit einer Verbindung zwischen zwei bestimmten Partnern nicht begnügen. Es war erforderlich, ein Fernsprechnetz aufzubauen, an das sämtliche Fernsprechteilnehmer angeschlossen waren und in dem jeder Teilnehmer alle anderen erreichen konnte.

In den ersten Jahren der Fernsprechtechnik gab es nur die „Handvermittlung". Von sämtlichen Fernsprechteilnehmern führten Leitungen zu einer zentralen „Vermittlung", von der aus später auch die Stromversorgung aller angeschlossenen Fernsprechteilnehmer erfolgte. Wollte der Fernsprechteilnehmer telefonieren, so hob er den „Handapparat" ab, in dem Mikrofon und Hörer vereint waren. In der Fernsprechvermittlung fiel eine dem Fernsprechteilnehmer zugeordnete „Klappe", oder es leuchtete ein Lämpchen auf. Der Angestellte in der Vermittlung fragte den Teilnehmer nach der gewünschten Verbindung und stellte sie her, indem er durch eine mehradrige Leitungsschnur die Anschlußbuchsen des anrufenden mit den Anschlußbuchsen des gewünschten Teilnehmers verband. Ein Schlußzeichen zeigte das Auflegen des Hörers am Gesprächsende an.

Das Verfahren, das bei kleinen Anlagen auch heute noch benutzt wird, konnte nicht mehr genügen, sobald die Zahl der Fernsprechteilnehmer und der von ihnen geführten Gespräche zunahm. Schon sehr früh versuchte man daher, die Handvermittlung so zu automatisieren, daß der Fernsprechteilnehmer den gewünschten Partner selbst wählen und erreichen konnte.

Dieses Ziel wird durch Stromstöße, durch Stromimpulse, erreicht, die der Fernsprechteilnehmer zum „Amt" schickt. Die beiden wichtigsten technischen Vorrichtungen, die dabei benötigt werden, sind der *Nummernschalter* und die *Wähler*.

Bild 45 Prinzip des Drehwählers




Mit dem Nummernschalter gewinnen wir Stromimpulse, deren Zahl und Gruppierung der Rufnummer des gewünschten Teilnehmers entsprechen. Drehen wir die „Fingerlochscheibe" bis zum Anschlag und lassen wir sie anschließend durch Federkraft zurücklaufen, wird eine „Stromstoßscheibe" in Bewegung gesetzt. Der gewählten Ziffer entsprechend unterbricht sie mehrmals einen Kontakt. Ein über diesen Kontakt fließender Strom wird „zerhackt". Es entstehen Stromstöße. Wählen wir eine mehrziffrige Rufnummer, werden mehrere Impulsgruppen erzeugt. Sie sind jeweils durch eine kurze Pause voneinander getrennt, die zum erneuten Drehen der Fingerlochscheibe benötigt wird.

Die Impulse gehen über die Leitung zum Amt und steuern dort „Wähler". Lernen wir ihre Wirkungsweise am einfachsten Wähler, dem *Drehwähler*, kennen. Ein Elektromagnet zieht, sobald er von einem Stromstoß durchflossen wird, einen beweglichen Anker kurzzeitig an. Dieser greift dabei mit einer Stoßklinke in ein Schaltrad und dreht es um einen Zahn weiter. Mit dem Zahnrad ist ein Schaltarm verbunden. Sein Ende gleitet über Kontaktplättchen, die auf einem Kreisbogen angeordnet sind. Empfängt der Elektromagnet drei Stromimpulse, dreht sich der Schaltarm auf das Kontaktplättchen „3" und schließt den zugehörigen Stromkreis. Bei sechs Impulsen läuft der Schaltarm auf den Kontakt „6". An diese Kontakte – in Wirklichkeit sind mehrere Schaltarme und Kontaktkränze übereinander angebracht, die gleichzeitig betätigt werden – sind die Fernsprechteilnehmer angeschlossen. Durch einen tech-

nischen Kunstgriff ist dafür gesorgt, daß der Wähler am Ende eines Gesprächs in seine Ruhestellung zurückkehrt.

Mit einem Drehwähler lassen sich nur zehn Verbindungen herstellen. Durch den *Hebdrehwähler* wird die Wahlmöglichkeit auf 100 erweitert.

Im Hebdrehwähler sind zehn Zehnerreihen von Kontakten übereinander angebracht. Durch die erste eintreffende Impulsgruppe – etwa eine 3 – wird der *Hebmagnet* betätigt. Er hebt den Schaltarm schrittweise bis zur dritten Kontaktebene. Die folgenden Impulse wirken auf den *Drehmagneten* und drehen den Schaltarm nunmehr in waagerechter Richtung. Beim Wählen der „67" zum Beispiel vollführt der Wähler erst 6 Schritte in senkrechter und anschließend 7 Schritte in waagerechter Richtung. Am Gesprächsende läuft der Schaltarm in die Nullstellung zurück.

Ein Nachteil wäre, daß man jedem Fernsprechteilnehmer einen der verhältnismäßig komplizierten Hebdrehwähler zuordnen müßte. Da jedoch von diesen Wählern immer nur wenige (etwa 6 bis 10 %) gleichzeitig in Betrieb wären, kommt man mit einer weit geringeren Zahl aus, wenn man jedem Fernsprechteilnehmer zunächst nur einen einfachen Drehwähler als „Vorwähler" zuweist. Dieser Vorwähler sucht beim Abheben des Handapparates selbsttätig einen „freien" Hebdrehwähler aus, der dann für die Gesprächsvermittlung benutzt wird. Bei mehr als 100 Teilnehmern werden mehrere Hebdrehwähler „hintereinander" geschaltet.

In jüngster Zeit werden die Wähler zunehmend durch *Koordinatenschalter* ersetzt, deren Arbeitsprinzip die Kontaktgabe an den Kreuzungspunkten entsprechend angeordneter, mit den Leitungen verbundener Kontaktschienen ist.

Sinn des Fernsprechers ist es nicht nur, möglichst viele Teilnehmer erreichen zu können, sondern auch mit Teilnehmern in großer Entfernung sprechen zu können. Dabei zeigte sich jedoch sehr bald, daß die *Sprechströme* auf langen Leitungswegen zu sehr geschwächt wurden, um noch eine Verständigung zu ermöglichen. Erst durch die Erfindung der *Verstärkerröhre* (vgl. S. 142) fiel die Entfernungsgrenze.

Ein weiteres Problem war es, daß die vorhandenen Fernleitungen dem Bedarf der Teilnehmer bald nicht mehr genügen

konnten. Lange Wartezeiten bei Gesprächen über große Distanzen machten den Nutzen des Fernsprechers teilweise wieder zunichte. Die Trägerfrequenztechnik, die es mit der Funktechnik entlehnten Methoden ermöglichte, zahlreiche Ferngespräche gleichzeitig über einen Leitungsweg zu führen, beseitigte auch diese Schwierigkeit. Sie war auch die Voraussetzung für die bereits weit vorangeschrittene Einführung des Selbstwählbetriebes im Fernsprechfernverkehr.

### Magnetfelder wirken aufeinander

Dauermagneten ziehen sich an oder stoßen sich ab, je nachdem, ob wir ungleichnamige oder gleichnamige Pole einander nähern. Da es gleichgültig ist, ob ein Magnetfeld von Dauermagneten oder von einem elektrischen Strom verursacht wird, sind ähnliche Erscheinungen auch bei fließenden Strömen zu erwarten.

Spannen wir zwei leicht bewegliche Drähte einander parallel und lassen wir sie von Strömen gleicher Richtung durchfließen (die aus einer oder aus verschiedenen Spannungsquellen stammen können), so nähern sich die Drähte einander. Es tritt zwischen ihnen eine Anziehungskraft auf.

Haben die Ströme in zwei parallelen Leitern einander entgegengesetzte Richtungen, stoßen sich die Leiter ab.

Die Anziehung und Abstoßung ist mit Hilfe der Feldlinienbilder leicht zu erklären. Bei parallelen, gleichgerichteten Strömen laufen die Feldlinien zwischen den Leitern gegeneinander, das Feld wird geschwächt. Außerhalb der Leiter verlaufen die Feldlinien gleichsinnig und verstärken das Feld. Deshalb werden die Leiter aneinandergedrängt. Bei parallelen Leitern, aber entgegengesetzten Strömen verlaufen die Feldlinien

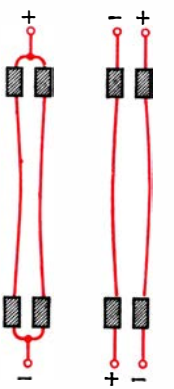



Bild 46 Anziehung und Abstoßung zwischen stromdurchflossenen Leitern

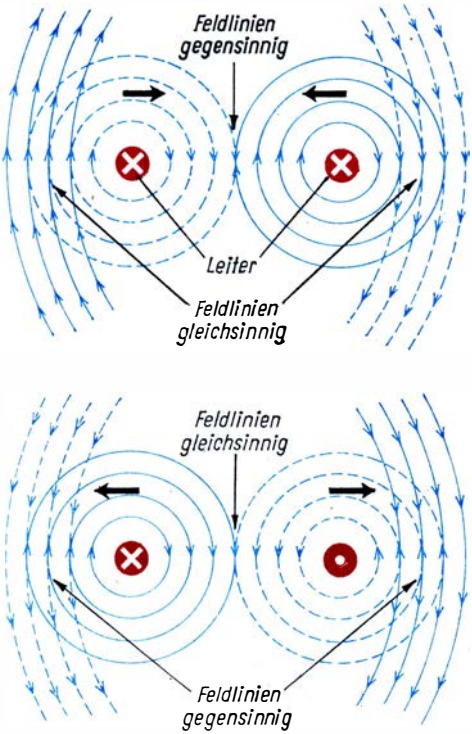



Bild 47 Verlauf der magnetischen Feldlinien in Bild 46

zwischen den Leitern parallel und verstärken dort das magnetische Feld. Außerhalb der Leiter dagegen kommt es zu einer Feldschwächung. Die Folge ist, daß die Leiter einander ausweichen.

Die Kräfte zwischen parallelen, stromdurchflossenen Leitern haben auch praktische Bedeutung. So können bei Kurzschlüssen in parallel verlegten Leitern unter Umständen wegen der hohen Stromstärke erhebliche mechanische Kräfte auftreten. Auch müssen die Windungen von Spulen, die von sehr starken Strömen durchflossen werden, sorgfältig festgelegt werden, um

durch die zwischen den Windungen auftretenden Kräfte nicht aus ihrer Lage gebracht zu werden.
Schließlich ist heute die Einheit der Stromstärke, das Ampere, durch die zwischen zwei parallelen Leitern auftretende Anziehungskraft gesetzlich definiert.

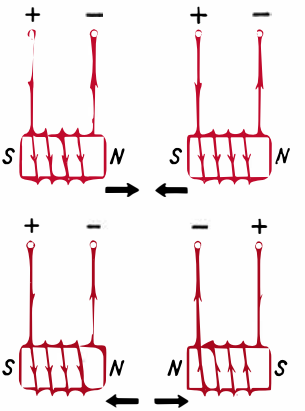



Bild 48 Anziehung und Abstoßung zwischen stromdurchflossenen Spulen

Untersuchen wir die Verhältnisse nunmehr bei zwei Spulen. Da ihre Magnetfelder mit dem eines Stabmagneten fast vollständig übereinstimmen, ziehen sich zwei Enden der stromdurchflossenen Spulen an, wenn an ihnen ungleichnamige Pole entstehen. Sie stoßen sich ab, wenn sich gleichnamige Pole bilden. Da aber die Lage der Magnetpole vom Umlaufsinn des Stromes abhängt, können wir sagen: Zwei Spulen ziehen einander an, wenn beide gleichsinnig vom Strom durchflossen werden. Sie stoßen einander ab, wenn sie gegensinnig vom Strom durchflossen werden.
Bringt man eine der beiden Spulen nicht verschiebbar, sondern drehbar an, so versuchen die Spulen, sich parallel zu stellen, und zwar so, daß die Ströme die Spulen in gleichem Sinne umfließen.
Das zwischen zwei Spulen wirksame Drehmoment wird in den *dynamometrischen* Meßwerken für Strom-, Spannungs- und Leistungsmessungen ausgenutzt. Sie bestehen aus einer festen

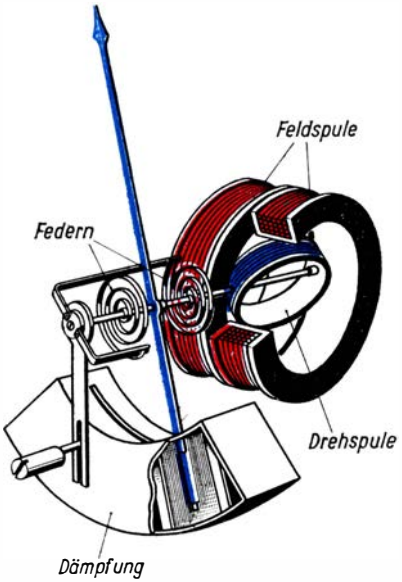
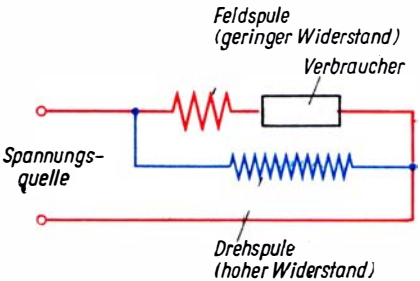



Bild 49
Dynamometrisches Meßwerk

Feldspule, in der sich eine bewegliche Drehspule befindet. Sie wird durch Federn in einer Ruhelage quer zur Stellung der Feldspule gehalten. Werden beide Spulen, die hintereinander oder parallel geschaltet sein können, von Strom durchflossen, so sucht sich die Drehspule parallel zur Feldspule zu stellen. Da sie durch die Federn an dieser Drehung gehindert wird, ist der Ausschlag des mit der Drehspule verbundenen, über einer Skale spielenden Zeigers ein Maß für die Stromstärke.
Wird die Stromrichtung umgekehrt, wechseln beide magnetische Felder ihre Richtung, das Drehmoment bleibt erhalten. Daher kann man dynamometrische Meßinstrumente auch für Wechselstrommessungen benutzen.
Das an der Drehspule auftretende Drehmoment ist dem Produkt der Stromstärken in Feld- und Drehspule proportional. Wenn man beiden Spulen getrennte, voneinander unabhängige Ströme zuführt, kann das Instrument benutzt werden, um das Produkt aus zwei Stromstärken anzuzeigen.

Bild 50 Schaltung eines dynamometrischen Meßwerks zur Leistungsmessung




Die elektrische Leistung zum Beispiel ist das Produkt aus Stromstärke und Spann ng. Schaltet man ein dynamometrisches Meßwerk so an einen Stromverbraucher, wie Bild 50 zeigt, so fließt durch die Feldspule der vom Gerät aufgenommene Strom. Ist der Widerstand der Drehspule hoch, das heißt, wickelt man sie aus vielen Windungen dünnen Drahtes, so liegt an der Drehspule praktisch die am Verbraucher auftretende Spannung, die nach dem Ohmschen Gesetz einen entsprechend starken Strom durch die Drehspule treibt. Somit ist das Drehmoment dem Gerätestrom nd der am Gerät liegenden Spannung proportional. Die Skale des dynamometrischen Meßwerks kann unmittelbar in Leist ngseinheiten geeicht werden.

Auf ein geradliniges Leiterstück werden mechanische Kräfte ausgeübt, wenn wir es in das Innere eines konstanten Magnetfeldes bringen nd von einem elektrischen Strom durchfließen lassen. Auch diese Erscheinung erklärt sich aus dem Zusammenwirken zwischen dem festen Magnetfeld nd dem Magnetfeld des beweglichen Leiters. Wir erkennen, daß auf der einen Seite die Feldlinien beider Felder die gleiche Richtung aufweisen. Dort wird das Gesamtfeld „verdichtet". Auf der anderen Seite des Leiters dagegen laufen die Feldlinien gegeneinander, das Gesamtfeld wird geschwächt. Infolgedessen entsteht eine Druckkraft, die den Leiter vom „dichteren" zum weniger dichten Teil des Feldes zu treiben sucht. Die Größe der Kraft hängt von der Stärke des festen Magnetfeldes, von der Länge des Leiters im Magnetfeld und von der Stärke des fließenden Stromes ab.

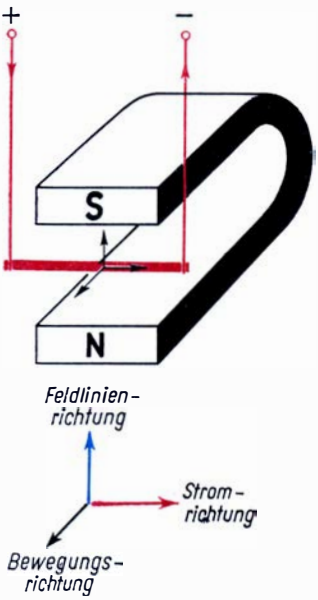



Bild 51 Leiterstück
im Feld eines Dauermagneten

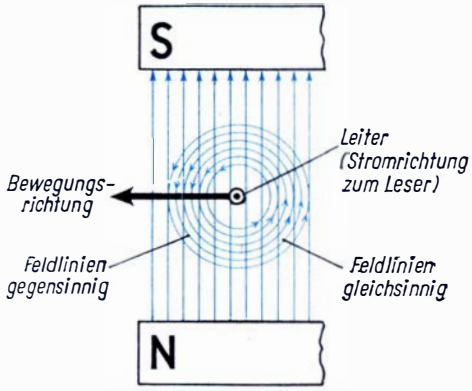



Bild 52
Feldlinienverlauf
in Bild 51

Dieser Kraftwirkung verdanken wir sämtliche Elektromotoren. Daher nennt man die Regel, mit deren Hilfe sich in einem gegebenen Fall die Bewegungsrichtung des Leiters feststellen läßt, auch die *Motorregel* oder, da bei ihr die linke Hand als Merkhilfe dient, die *Linke-Hand-Regel*. Sie lautet:

> Hält man die linke Hand so, daß die Feldlinien in die Handfläche eintreten und die ausgestreckten Finger in die Stromrichtung weisen, so zeigt der abgespreizte Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an.

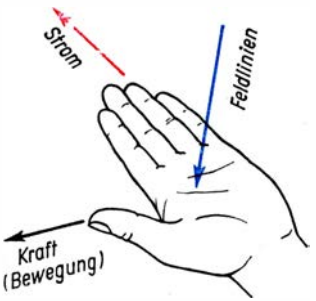



Bild 53 Die „Linke-Hand-Regel"

Als Demonstrationsgerät für die im Magnetfeld an stromdurchflossenen Leitern auftretenden Kräfte galt lange Zeit das *Barlowsche Rad*. Es besteht aus einem leicht drehbaren Metallrad, dem durch die Achse elektrischer Strom zugeführt wird.

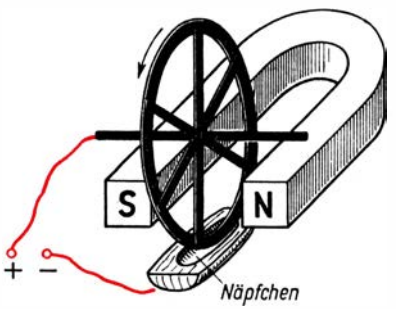



Bild 54 Das Barlowsche Rad

Das Rad taucht mit einem Teil seines Umfangs in ein Näpfchen mit elektrisch leitender Flüssigkeit, über das der Strom abfließt. Ein Teil des Rades dreht sich zwischen den Polen eines kräftigen Dauermagneten. Sobald der Strom eingeschaltet wird, tritt eine mechanische Kraft an der jeweils im Magnetfeld befindlichen Speiche auf, die diese Speiche zur Seite drückt. Infolgedessen beginnt sich das Rad zu drehen. Die Drehrichtung kann wieder mit der Motorregel bestimmt werden.

In jüngster Zeit versucht man, das Barlowsche Rad zu einem brauchbaren Elektromotor weiterzuentwickeln. Versuche in dieser Richtung verliefen recht erfolgreich. Motoren, die nach diesem Prinzip gebaut sind, zeichnen sich durch besondere Einfachheit aus. Ihr drehbarer Teil, der *Läufer*, kann aus einer Isolierstoffplatte bestehen, der Metallbahnen als Speichen aufgedruckt werden. Die Magneten, für die selbstverständlich auch Elektromagneten verwendet werden können, lassen sich ebenfalls sehr raumsparend ausführen. Die Motoren ähneln äußerlich einer flachen, runden Schachtel.

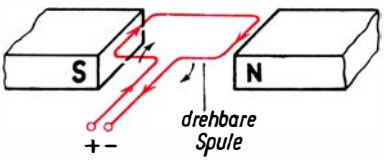


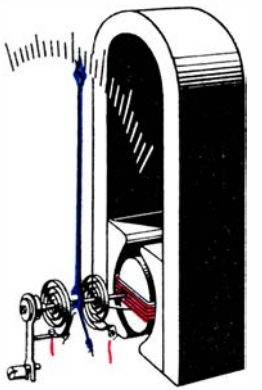

Bild 55
Drehung einer Leiterschleife im Magnetfeld

Technisch besonders wichtig ist das Verhalten einer drehbaren Spule im konstanten Magnetfeld. In unserer Skizze wird, wie sich durch Anwenden der Motorregel sofort ergibt, für die linke Spulenseite eine Auslenkung nach oben, für die rechte eine Auslenkung nach unten hervorgerufen. Es wirkt ein Drehmoment auf die Spule, dessen Größe, wenn alle anderen Maße unverändert bleiben, von der Stärke des Spulenstromes abhängt.

Die im Magnetfeld drehbare Spule kehrt in den Elektromotoren wieder. Wir werden an anderer Stelle ausführlich darauf eingehen.

Die Spulendrehung wird auch in einem weit verbreiteten Maßinstrument, dem *Drehspulinstrument*, genutzt. Zwischen den

Bild 56 Drehspulinstrument



Polen eines Dauermagneten sitzt eine leicht drehbare Spule, die von dem zu messenden Strom durchflossen wird. Auf die Spulenwindungen wird ein Drehmoment ausgeübt, das von der Stromstärke abhängt. Zwei Spiralfedern suchen die Spule so zu drehen, daß der mit ihr verbundene Skalenzeiger seine Nullstellung einnimmt. Infolgedessen zeigt das Instrument einen der Stromstärke entsprechenden Ausschlag.
Wird die Stromrichtung umgekehrt, wechselt auch die Drehrichtung der Spule, nicht aber die des konstanten Magnetfeldes. Ein Drehspulinstrument kann daher nur in bestimmter Polung angeschlossen werden. Es ist ohne besondere Zusatzeinrichtungen nur für Gleichstrommessungen zu verwenden.

## Spannungserzeugung durch Induktion

Der vorangegangene Abschnitt hat gezeigt, wie mit Hilfe eines Magnetfeldes und eines elektrischen Stromes Bewegungen verursacht werden können. Es liegt nahe, die Umkehrung zu versuchen, das heißt durch Bewegungsvorgänge und durch ein magnetisches Feld elektrische Spannungen bzw. Ströme hervorzurufen. Bereits *Michael Faraday* (1791 bis 1867) befaßte sich mit diesem Problem und deckte die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der *elektromagnetischen Induktion*, der Spannungserzeugung mit Hilfe eines Magnetfeldes, auf. Induktionserscheinungen bilden heute in der ganzen Welt die Grundlage der Elektroenergieerzeugung.

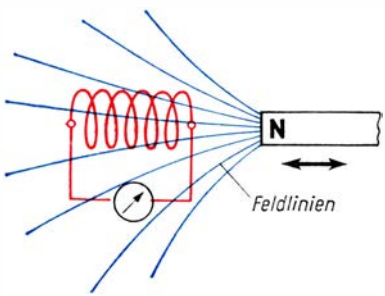



Bild 57 Grundversuch zur elektromagnetischen Induktion

Verbinden wir die Enden einiger Drahtwindungen mit einem empfindlichen Spannungsmesser, so schlägt sein Zeiger aus, sobald wir den Drahtwindungen einen Magneten nähern. Auch beim Entfernen des Magneten zeigt das Instrument eine Spannung an, die aber jetzt die umgekehrte Richtung hat. Ruht der Magnet, entsteht keine Spannung, gleichgültig, in welcher Entfernung von der Spule er sich befindet.

Halten wir den Magneten fest und entfernen oder nähern wir die Spule, ist der gleiche Effekt zu beobachten. Das ist auch der Fall, wenn wir den Dauermagneten durch einen Elektromagneten, im einfachsten Fall also durch eine stromdurchflossene Spule, ersetzen. Selbst wenn wir diese beiden Spulen, die den Magnetstab ersetzende *Feldspule* und die *Induktionsspule*, gegeneinander verdrehen, tritt eine Spannung auf.
Es scheint auf den ersten Blick, als sei die Bewegung ausschlaggebend für das Zustandekommen der Induktionsspannung. Man kann sich jedoch leicht davon überzeugen, daß dies nicht der Fall ist. Stehen nämlich beide Spulen fest und wird der Strom in der Feldspule ein- oder ausgeschaltet, ist an der Induktionsspule ebenfalls das Auftreten einer Spannung zu beobachten.

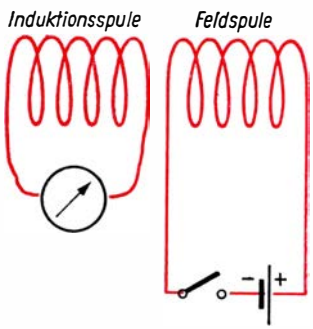



Bild 58 Elektromagnetische Induktion bei zwei benachbarten Spulen

Aus diesen Versuchen folgt, daß die Bewegung nicht das Kriterium für das Zustandekommen einer Induktionsspannung sein kann. Um es zu finden, müssen wir festzustellen suchen, was allen Versuchen gemeinsam ist. Bereits die Bilder 57 und 58 lassen es erkennen: Beim Annähern oder Entfernen des Magnetstabes bzw. der Spule ändert sich die Zahl der Feldlinien, die von der Spule „umfaßt" werden. Sie nimmt beim Annähern zu, sie sinkt beim Entfernen.
Auch bei den übrigen Versuchen ändert sich die Zahl der umfaßten Feldlinien: Schalten wir die Feldspule ein oder aus, wird

die vorher von Feldlinien „leere“ Spule plötzlich von Feldlinien durchflossen, die beim Ausschalten wieder verschwinden.
Die Größe der induzierten Spannung hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die umfaßte Feldlinienzahl ändert. Je größer diese Geschwindigkeit ist, desto höher ist auch die induzierte Spannung. Durch Versuche mit wechselnden Geschwindigkeiten und Magnetfeldern verschiedener Stärke läßt sich dieser Satz leicht bestätigen.
Bei gleicher Änderungsgeschwindigkeit der Feldlinienzahl wächst die Spannung im gleichen Maße wie die Windungszahl der Induktionsspule, da sich die in den einzelnen Windungen entstehenden Spannungen addieren. Man kann durch eine entsprechende Windungszahl also sehr hohe Spannungen erhalten. Auch ein Eisenkern in Induktionsspule und Feldspule verstärkt die Induktionswirkung erheblich. Das ist, wie wir noch erfahren werden, für die Technik nicht ohne Bedeutung.
Eine Induktionsspannung ist auch festzustellen, wenn wir ein geradliniges Leiterstück so „quer“ durch ein Magnetfeld ziehen, wie Bild 59 es zeigt. Wir benutzen dieses Bild gleichzeitig dazu, das Entstehen der Induktionsspannung zu erklären.
Bewegen wir den Leiter im Magnetfeld nach „hinten“, so müssen die in ihm befindlichen Leitungselektronen diese Be-

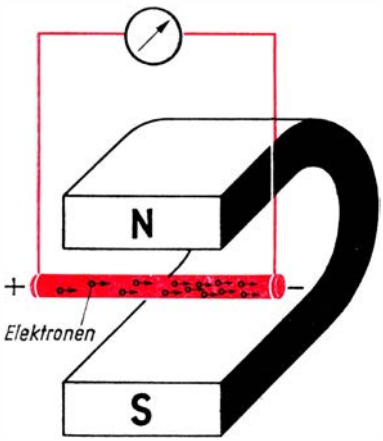



Bild 59 Zur Entstehung der Induktionsspannung

wegung mitmachen. Die mit dem Leiter nach „hinten" bewegten Elektronen unterliegen dabei Kräften, wie wir sie bei jedem stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld kennenlernten. Nach der „Motorregel" ergibt sich, daß die Elektronen nach rechts gedrückt werden. Die linke Seite des Leiters verarmt an Elektronen, während am rechten Leiterende ein Elektronenüberschuß auftritt. Das bedeutet aber, daß zwischen den Leiterenden eine elektrische Urspannung auftritt. Sie kann einen Strom zum Fließen bringen.

Um die Richtung des entstehenden Stromes festzustellen, brauchen wir nicht jedesmal den Entstehungsvorgang zu „rekonstruieren". Es ist einfacher, sich eine weitere Regel zu merken, die *Generatorregel* oder *Rechte-Hand-Regel*. Sie lautet:

> Hält man die rechte Hand so, daß die Feldlinien in die Handfläche eintreten und der Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters angibt, so zeigen die ausgestreckten Finger die Stromrichtung an.

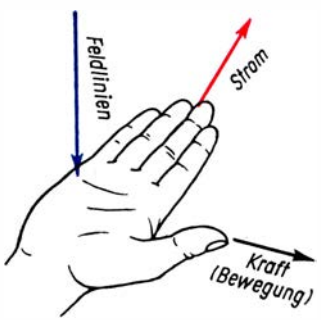



Bild 60
Die „Rechte-Hand-Regel"

Der entstehende Induktionsstrom kann wie jeder Strom Arbeit leisten. Sie entstammt der mechanischen Arbeit, die zum Bewegen des Leiters erforderlich ist. Es zeigt sich nämlich, daß bei dieser Bewegung ein mechanischer Widerstand zu überwinden ist. Er kommt dadurch zustande, daß auch der im bewegten Leiter fließende Induktionsstrom ein Magnetfeld aufbaut. Es ist – in Wechselwirkung mit dem bereits vorhandenen Magnetfeld – stets so gerichtet, daß es die Bewegung des Leiters

zu hemmen sucht, in dem der Induktionsstrom fließt. Wir begegnen hier zum erstenmal einer für den ganzen Bereich der Induktionserscheinungen wichtigen Regel, die von dem Physiker *Heinrich Friedrich Emil Lenz* (1804 bis 1865) aufgestellt wurde.

Diese „Lenzsche Regel" besagt:

> Jeder Induktionsstrom ist so gerichtet, daß sein Feld die Ursache seines Entstehens zu verhindern sucht.

Einfacher ausgedrückt:

> Der Induktionsstrom wirkt seiner Ursache stets entgegen.

In unserem Fall ist die Bewegung des Leiterstückes Ursache des Induktionsstromes. Sein Feld ist daher so gerichtet, daß im Wechselspiel mit dem Feld des Dauermagneten die Bewegung durch eine Gegenkraft behindert wird. Es ist Energie erforderlich, um den Leiter trotz dieser Gegenkraft zu bewegen, und diese Energie findet sich als Elektroenergie in der Arbeitsleistung des Induktionsstromes wieder.

Man kann die Gültigkeit der Lenzschen Regel durch einen einfachen Versuch demonstrieren: Nähert man einem Kupfer- oder Aluminiumring, der am Ende eines leicht drehbaren Hebelarmes sitzt, einen kräftigen Magneten, so weicht der Ring vor dem Magneten zurück. Durch das Annähern entsteht im Ring ein Induktionsstrom. Sein Feld sucht der Induktionsursache entgegenzuwirken, indem es den Abstand zum Magneten wieder

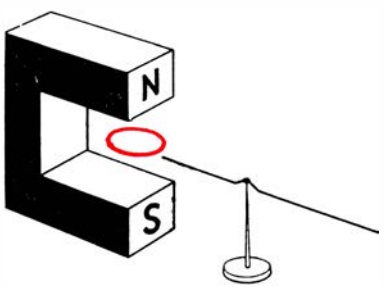



Bild 61
Ein leitender Ring wird vom Magnetfeld „mitgenommen"

zu vergrößern bestrebt ist. Führt man umgekehrt den Ring zwischen die Magnetpole, um den Magneten anschließend wegzuziehen, folgt der Ring dem Magneten. Nunmehr ist die sich vergrößernde Entfernung Ursache der Induktion. Diese Ursache kann nur dadurch aufgehoben werden, daß der Ring sich mit dem Magneten bewegt.

### Einige Anwendungen der Induktionserscheinungen

Wie wir schon erwähnten, haben die Induktionserscheinungen ihre wichtigste Anwendung bei der Gewinnung und Verteilung von Elektroenergie gefunden. Wir werden diesen Anwendungsbereich erst später behandeln. Induktionserscheinungen spielen jedoch auch an anderer Stelle eine Rolle. Eine Auswahl dieser Möglichkeiten wollen wir hier kennenlernen.

Läßt man ein Dauermagnet-Plättchen dicht vor einer Spule vorbeigleiten, entsteht in ihr ein Spannungsstoß. Man kann ihn ausnutzen, um andere Vorgänge auszulösen. Soll zum Beispiel der hin- und hergehende Schlitten einer Werkzeugmaschine oder die Laufkatze eines Werkstattkranes am Ende ihres Weges selbsttätig angehalten oder umgesteuert werden, so kann man neben elektromechanischen *Endschaltern* auch Vorrichtungen einsetzen, die auf dem Induktionsprinzip beruhen. Am Schlitten der Werkzeugmaschine bzw. an der Laufkatze wird ein Plättchen aus dauermagnetischem Material so angebracht, daß es im Augenblick, da eine Umschaltung erwünscht ist, vor einer Induktionsspule vorbeigleitet. Der induzierte Spannungsstoß

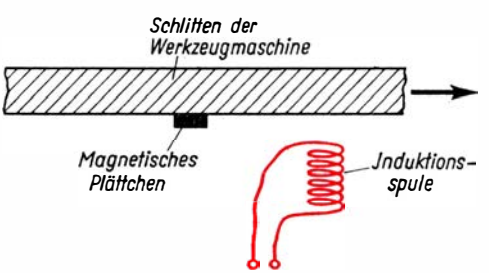



Bild 62
Prinzip des Steuerns und Schaltens durch elektromagnetische Induktion

steuert ein Relais oder ein elektronisches Gerät, das die Bewegungsrichtung des Schlittens umkehrt oder die Laufkatze anhält.

Um die Größe oder Änderungen des magnetischen Feldes der Erde zu bestimmen, benutzt man den sogenannten Erdinduktor. Er ist nichts anderes als eine Spule, die um eine waagerechte oder senkrechte Achse drehbar ist und mit einem geeigneten Meßinstrument verbunden wird. Die Spule wird von den Feldlinien des magnetischen Erdfeldes durchsetzt. Wird die Spule geschwenkt, so ändert sich die umfaßte Feldlinienzahl. Man kann aus der induzierten Spannung die Daten des magnetischen Erdfeldes ermitteln. Die Drehung um eine waagerechte Achse ergibt dabei die vertikale, die Drehung um eine senkrechte Achse die horizontale Komponente des Magnetfeldes.

Bringt man ein Dauermagnet-Plättchen an einer umlaufenden Welle so an, daß es bei jeder Umdrehung an einer Induktionsspule vorbeiläuft, werden Spannungsstöße induziert, deren Größe und Folgegeschwindigkeit von der Umlaufgeschwindigkeit der Welle abhängen. Man kann sie ausnutzen, um die Drehzahl zu messen und in beliebiger Entfernung von der umlaufenden Welle anzuzeigen.

Als unentbehrliche Bestandteile des Fernsprechers nannten wir Fernhörer und Mikrofon. In den ersten Fernsprechern allerdings gab es kein Mikrofon. In ihnen wurde der Hörer zum Empfangen *und* zum Sprechen benutzt. Sprechen wir gegen die Membran eines Fernhörers, so schwingt sie im Rhythmus der Schallwellen. In gleichem Rhythmus wird das Feld der im Hörer enthaltenen Dauermagneten verändert. Es werden Spannungen induziert, die ein Bild der ursprünglichen Schallschwingungen sind. Sie sind verhältnismäßig gering, und dies ist auch der Grund, weswegen man das Mikrofon beim Fernsprechen einführte.

Erst mit dem Aufkommen der Rundfunktechnik kehrte man zu dem *elektrodynamischen* Prinzip der Umwandlung von Schallschwingungen in elektrische Spannungen zurück. So schuf man das sogenannte Bändchenmikrofon. Eine geriffelte, leicht bewegliche Metallfolie wird zwischen den Polen eines kräftigen Dauermagneten ausgespannt. Spricht man gegen die Folie, beult sie sich im Rhythmus der Schallwellen aus, das heißt, sie bewegt

sich im Magnetfeld. Es werden Spannungen induziert, die den Schallwellen entsprechen.
Die Spannung des Bändchenmikrofons ist sehr gering. Weit größere Spannungen liefert das nach dem gleichen Prinzip konstruierte *dynamische* oder *Tauchspulenmikrofon.* Durch die Schallschwingungen wird eine leichte, bewegliche Spule mehr oder weniger in ein magnetisches Feld getaucht. Es entstehen Induktionsspannungen, die verstärkt werden können.
Bereits um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts wurden die Induktionserscheinungen zum Bau von *Funkeninduktoren* benutzt, mit denen es gelang, sehr hohe elektrische Spannungen zu erzeugen.
Auf einem unterteilten Weicheisenkern (vgl. S. 126) finden wir zwei Wicklungen: die aus wenigen Windungen dicken Drahtes bestehende *Primärwicklung* und eine *Sekundärwicklung,* die viele Tausende Windungen dünnen Drahtes aufweist. Die

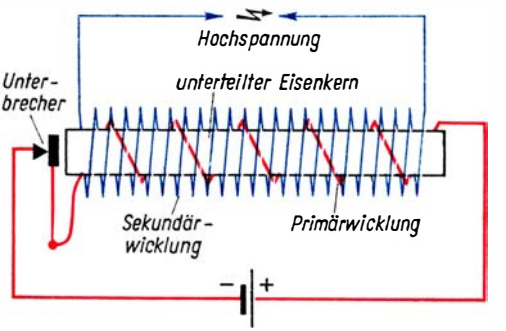



Bild 63
Aufbau eines Funkeninduktors

Primärwicklung wird mit einer Spannungsquelle und einem *Unterbrecher* zu einem Stromkreis zusammengeschaltet. Dieser Unterbrecher ist häufig nichts anderes als der Mechanismus einer elektrischen Klingel (vgl. S. 97), der einen Strom periodisch ein- und ausschaltet.
Im Eisenkern des Funkeninduktors wird daher ein Magnetfeld rhythmisch sehr schnell auf- und wieder abgebaut. In der Sekundärspule entstehen sehr hohe Induktionsspannungen.

Die verbreitetste Anwendung hat der Funkeninduktor in der Zündanlage der Kraftfahrzeuge gefunden. Mit Hilfe des Unterbrechers wird in der Zündspule ein von der Wagenbatterie gelieferter Strom rhythmisch unterbrochen und eingeschaltet. Die Sekundärwicklung der Zündspule erzeugt infolgedessen eine hohe Spannung (bis 20 kV), die über den Zündverteiler an die Zündkerzen gelegt wird. Dort springen Funken über, die das Brennstoffgemisch zünden.

Auch in der Magnetbandtechnik werden die Induktionserscheinungen genutzt. Das Magnetband besteht aus Plastmaterial, das mit einer dünnen Schicht ferromagnetischen Stoffes belegt ist. Bei der Bandaufnahme bewegt sich das Magnetband an einem *Aufnahmekopf* vorbei. Dies ist ein Elektromagnet, der von Strömen durchflossen wird, die den aufzunehmenden Schallschwingungen entsprechen. Das Band wird während seiner Bewegung in Rhythmus der Schallschwingungen magnetisiert.

Soll das Band abgespielt werden, läuft es am Wiedergabekopf vorbei. Er ist ähnlich gebaut wie der Aufnahmekopf. Diesmal jedoch werden in seiner Spule durch die auf dem Band magnetisch gespeicherten Schallschwingungen Spannungen induziert. Man verstärkt sie und leitet sie den Lautsprechern zu.

Die Magnetbandtechnik hat nicht nur in der Fernmeldetechnik und beim Rundfunk die bisher üblichen, recht umständlichen Schallkonservierungsverfahren ersetzt. Sie wird seit einigen Jahren auch zur Aufzeichnung von Fernsehsendungen benutzt und kann vielleicht eines Tages die derzeit gebräuchlichen Methoden der Filmaufnahme und -wiedergabe ablösen. Auch in der Automatisierungs- und Rechentechnik hat sich das Magnetband ein weites Anwendungsfeld erobert. Man kann auf ihm in Form der Magnetisierung komplizierte Steuerprogramme oder Daten speichern. Durch ein magnetisches Wechselfeld läßt sich der einem Band aufgeprägte Inhalt „löschen", so daß das Band zur Aufnahme anderer Informationen frei wird. Es ist außerdem möglich, Magnetbänder zu zerschneiden und wieder zusammenzukleben, so daß die verschiedensten Kombinationsmöglichkeiten für die Speicherung von Informationen gegeben sind.

## Wirbelströme

Induktionswirkungen treten nicht nur bei Drähten auf, sondern in jedem Leitermaterial, das von einer sich ändernden Zahl von Feldlinien durchsetzt wird. Man kann das mit einem einfachen Versuch zeigen:
Lassen wir ein Pendel, dessen Körper aus einem Blech besteht, zwischen den Polen eines Elektromagneten schwingen. Solange der Strom nicht eingeschaltet ist, schwingt das Pendel frei. Schaltet man dagegen den Strom ein, wird das Pendel in seiner Bewegung gehemmt. Es bewegt sich zwischen den Polen des Elektromagneten wie in einer zähen Flüssigkeit und kommt meistens schon bei der ersten Schwingung zur Ruhe.
Wie ist dieser Effekt zu erklären? Das Magnetfeld induziert Spannungen im vorbeigleitenden Blech. Diese Spannungen bringen im Blech selbst Ströme hervor, die wegen des großen Leiterquerschnittes erhebliche Stärken erreichen können und das Blech erwärmen. Man nennt sie *Wirbelströme*. Nach der Lenzschen Regel ist das Magnetfeld der Wirbelströme so gerichtet, daß es seine Ursache, die Bewegung des Blechs, aufzuheben

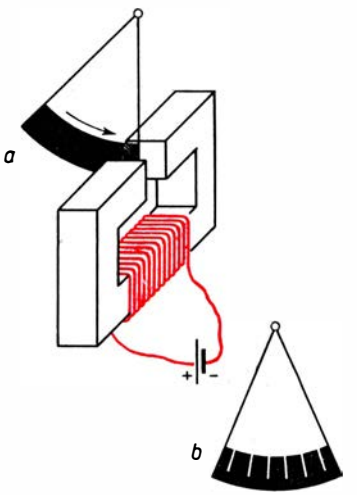



Bild 64 Pendel a
wird im Magnetfeld stark,
Pendel b wird nur wenig gebremst

trachtet. Daraus erklärt sich die Verzögerung der Bewegung im Magnetfeld.

Wirbelströme sind in der Technik meistens sehr unerwünscht. Sie treten in allen leitenden Maschinenteilen auf, die sich im Inneren oder in der Nähe von Spulen befinden, deren Magnetfeld sich ändert. Das ist zum Beispiel, wie wir noch im einzelnen erfahren werden, bei allen Spulen der Fall, durch die Wechselstrom fließt. Auch in metallischen Maschinenteilen, die in einem Magnetfeld rotieren, treten Wirbelströme auf. Die von ihnen entwickelte Wärme erhöht die Temperatur der Maschinen oder Anlagen. Außerdem verschlechtert sie den Wirkungsgrad der Geräte; denn die in Wärme verwandelte Energie muß von der dem Gerät zugeführten Energie mit aufgebracht werden.

Man ist daher meistens bestrebt, Wirbelstromverluste möglichst niedrig zu halten. Die am nächsten liegende Lösung, die Massen elektrischer Geräte zu verringern, ist immer nur in gewissem Maße durchführbar. Der Pendelversuch weist aber auf eine andere Möglichkeit hin, die Wirkungen der Wirbelströme zu vermindern.

Bringen wir in dem Blech zahlreiche parallele Schlitze an, so schwingt es auch bei eingeschalteten Elektromagneten nahezu ungehindert. Durch die Schlitze werden die Strombahnen verlängert. Ihr Widerstand wächst, und infolgedessen erreicht die Stärke der Wirbelströme nur einen geringen Wert. Bei elektrischen Maschinen und Geräten hilft man sich, indem man die von Feldlinien durchsetzten Teile „blättert". Sie werden aus dünnen, gegeneinander isolierten Blechen zusammengesetzt, wobei man außerdem noch Werkstoffe mit nicht zu niedrigem spezifischem Widerstand bevorzugt.

Nicht selten werden Wirbelströme jedoch bewußt hervorgerufen und angewandt. Der Zeiger von Meßinstrumenten würde häufig lange pendeln, ehe er sich auf den endgültigen Meßwert einstellte. Man vermeidet das durch Anbringen einer *Wirbelstromdämpfung.* Bei der Bewegung des Zeigers wird ein Blechsegment zwischen zwei dicht beieinanderstehenden Magnetpolen hindurchgezogen. Infolge der entstehenden Wirbelströme bremst es den Zeiger rasch ab.

Um die Leistung von Maschinen zu bestimmen, kann man einen Elektromagneten über den Rand des Schwungrades greifen

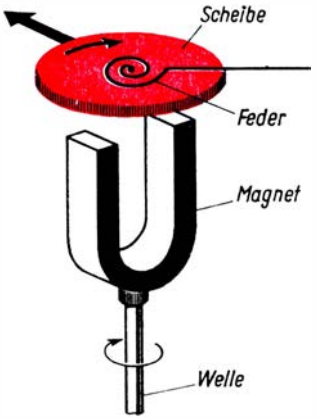



Bild 65 Zur Arbeitsweise des Wirbelstromtachometers

lassen. Er sitzt an einem beweglichen Hebelarm. Infolge der auftretenden Wirbelströme versucht das Schwungrad, den Magneten „mitzunehmen" (vgl. S. 120). Daraus kann man Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der Maschine ziehen.
In ähnlicher Weise funktioniert das *Wirbelstromtachometer* zur Drehzahlmessung: Vor einer drehbaren Metallscheibe rotiert ein mit der zu kontrollierenden Welle verbundener Dauermagnet. Nach der Lenzschen Regel suchen die Wirbelströme die Scheibe mitzunehmen. Das ist aber nicht ohne weiteres möglich, weil die Drehbewegung der Scheibe durch eine Feder behindert wird. Die Scheibe dreht sich daher nur um einen bestimmten Winkel. Er ist ein Maß für die Umlaufgeschwindigkeit der Welle und wird an einer Skale angezeigt.

## Selbstinduktion

Schaltet man einen Stromkreis aus, in dem Eisenkernspulen mit vielen Windungen – also zum Beispiel ein Elektromagnet – liegen, so tritt am Schalter ein kräftiger *Öffnungsfunke* auf, der den Verschleiß der Schalterkontakte beschleunigt. Umgekehrt ist beim Einschalten festzustellen, daß der Strom nicht plötzlich

und in voller Stärke einsetzt, sondern seinen Betriebswert nur allmählich erreicht.
Beide Erscheinungen haben die gleiche Ursache, die sogenannte Selbstinduktion. Betrachten wir Bild 66: Wenn wir den Strom

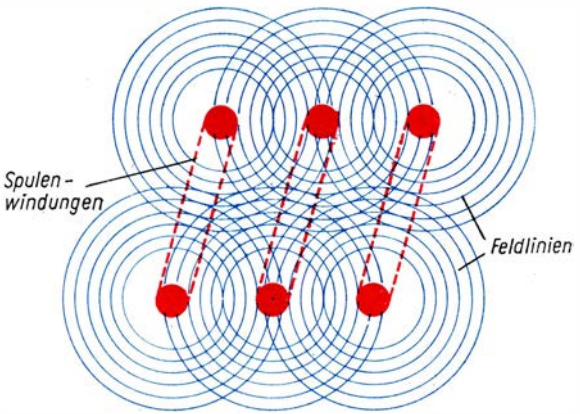



Bild 66 Zur Entstehung der Selbstinduktion

einschalten, beginnt der Aufbau eines Magnetfeldes. Aus jedem Drahtstückchen, aus jeder Spulenwindung „quellen" gewissermaßen magnetische Feldlinien. Sie treffen in der Spule auf die anderen Windungen und rufen in diesen gleichfalls eine Induktionsspannung hervor. Jede Windung induziert so in jeder anderen eine Spannung. Wollen wir wissen, wie diese Spannung sich verhält, müssen wir wiederum die Lenzsche Regel anwenden. Beim Einschalten muß die Selbstinduktionsspannung so gerichtet sein, daß sie ihrer Ursache, dem das Magnetfeld aufbauenden Strom, entgegenwirkt. Wir haben daher beim Einschalten eine *Gegenspannung* zu erwarten. Sie vermindert die an der Spule wirksame Spannung. So kommt es, daß der Strom nur allmählich anwächst und seinen durch das Ohmsche Gesetz bestimmten Wert erst erreicht, wenn das Magnetfeld „fertig" aufgebaut ist.

Beim Ausschalten kehren sich die Verhältnisse um. Das Magnetfeld „bricht zusammen", es verschwindet. Dabei werden die Spulenwindungen wiederum von Feldlinien „geschnitten", was eine Selbstinduktionsspannung verursacht. Sie muß nach der Lenzschen Regel ihrer Ursache entgegenwirken, sucht daher das verschwindende Magnetfeld aufrechtzuhalten. Die Selbstinduktionsspannung beim Ausschalten hat daher die gleiche Richtung wie die an der Spule liegende Spannung. Diese Selbstinduktionsspannung ruft den Öffnungsfunken hervor.

Ersetzen wir den Schalter durch einen Widerstand, mit dem sich die Stromstärke verändern läßt, so können wir die Selbstinduktionswirkung ebenfalls beobachten. Die Stromstärke durch die Spule „hinkt" der Widerstandsänderung nach.

Zusammenfassend können wir sagen: Die Selbstinduktion wirkt jeder Stromstärkeänderung entgegen.

Daß die Größe der Selbstinduktionsspannung von der Schnelligkeit der Stromstärkeänderung abhängt, ist leicht zu verstehen; denn diese Änderungsgeschwindigkeit bestimmt ja auch die Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Feldes.

Daneben zeigt sich aber auch, daß die Spule selbst an den Induktionswirkungen maßgebenden Anteil hat. Zunächst ist klar, daß die Selbstinduktionsspannung mit der Windungszahl einer Spule zunimmt. Sie wird aber auch davon bestimmt, welchen Durchmesser und welche Form die Spule hat und ob sie mit einem Eisenkern versehen ist oder nicht.

Aus der Berücksichtigung dieser Spulendaten erhält man einen konstanten Faktor, mit dem man die Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke multiplizieren muß, um die Selbstinduktionsspannung zu ermitteln. Diesen Faktor nennt man die *Induktivität* der Spule. Ihre Einheit ist das *Henry* (H), so benannt nach dem amerikanischen Physiker *Joseph Henry* (1797 bis 1878).

Eine Spule hat die Induktivität von 1 H, wenn eine Stromstärkeänderung von 1 A/s in ihr eine Spannung von 1 V induziert:

$$1\,\mathrm{H} = \frac{1\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{A/s}} = \frac{1\,\mathrm{Vs}}{1\,\mathrm{A}}$$

Da diese Einheit für praktische Zwecke meistens sehr groß ist, führte man die Untereinheiten *Millihenry* (mH) und *Mikrohenry* (μH) ein:

$$1\ \text{H} = 1000\ \text{mH}$$

$$1\ \text{H} = 1000000\ \mu\text{H}$$

Die Selbstinduktion wirkt sich besonders dort aus, wo Spulen von Wechselstrom durchflossen werden. Wir werden auf die dann geltenden Verhältnisse auf S. 166 noch zurückkommen.

# Der elektrische Strom im Vakuum, in Gasen und Halbleitern

## Die Glühemission

Das Vakuum leitet den elektrischen Strom nicht, es ist ein Isolator; denn es gibt im Vakuum keine Ladungsträger, die die Elektrizität transportieren. Soll trotzdem elektrischer Strom durch einen luftleeren Raum fließen, muß man ihm Elektronen von außen „injizieren". Das ist verhältnismäßig einfach, und die Bewegung von Elektronen im Vakuum hat in den letzten Jahrzehnten für die Technik allergrößte Bedeutung erlangt.

Die einfachste Methode, Elektronen in ein Vakuum zu bringen, ist die *Glühemission*. Die in einem Leiter befindlichen Elektronen führen ständig unregelmäßige *Wärmebewegungen* aus, bleiben aber zunächst im Leiter „eingesperrt", weil sie von den Metallatomen, denen sie entstammen, angezogen werden. Bei steigender Temperatur jedoch können die rückhaltenden Kräfte von den schnellsten Elektronen überwunden werden. Es werden Elektronen aus dem Draht geschleudert. Dazu ist ein gewisser Energieaufwand erforderlich, die *Austrittsarbeit*. Sie hängt vom Leitermaterial ab. Es gibt Stoffe, zum Beispiel Bariumverbindungen, die bereits bei Temperaturen unter 1000 °C zahlreiche Elektronen freisetzen, und man kennt Materialien, zum Beispiel Wolfram, die erst in Weißglut geraten müssen, ehe sie eine nennenswerte Zahl von Elektronen abgeben.

Die ausgetretenen Elektronen umhüllen den Draht wie eine Art Wolke. Es bildet sich eine *negative Raumladung*, die auf weitere, den Leitungsdraht verlassende Elektronen abstoßend wirkt. Durch einen Kunstgriff gelingt es, diese Wolke aufzulockern:

Man bringt in einem evakuierten Glaskolben nahe dem Elektronen aussendenden Draht ein Metallplättchen an. Es ist an den positiven Pol einer Spannungsquelle angeschlossen, deren negativer Anschluß mit dem Emissionsdraht verbunden wird. Die Elektronen der Raumladung werden von dem positiven

Plättchen, der Anode, angezogen. Die Raumladung wird aufgelockert, und aus dem mit dem negativen Anschluß verbundenen Emissionsdraht, der Katode, treten ständig weitere Elektronen aus.
In der Anordnung nach Bild 67 fliegen somit ständig Elektronen von der Katode zur Anode. Da aber Elektronenbewegung elektrischen Strom bedeutet, können wir sagen: Im Inneren des Glaskolbens fließt ein *Elektronenstrom*. Elektronen, die die Anode erreichen, werden von der Spannungsquelle zwischen Anode und Katode wieder zur Katode zurückgepumpt, so daß ein ständiger Kreislauf aufrechterhalten bleibt.

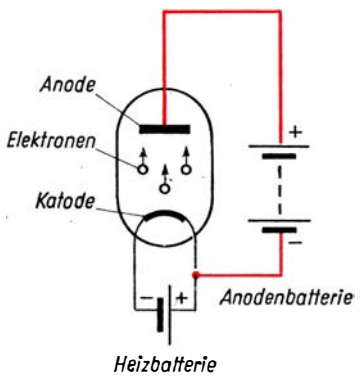



Bild 67 Elektronenstrom durch das Vakuum
(Prinzip der Diode)

Die Elektronenbewegung im Inneren der *Röhre* ist beschleunigt. Die Elektronen fallen gewissermaßen zur Anode. Die Geschwindigkeit, mit der sie die Anode treffen, hängt nur von der Spannung zwischen Katode und Anode, nicht aber von dem Abstand dieser beiden Elektroden ab. Bereits bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen erreichen die Elektronen die Anode mit sehr großer Geschwindigkeit.

Es gilt zum Beispiel:

| | |
|---|---|
| $U = 1$ V | $v = 595$ km/s |
| $U = 10$ V | $v = 1885$ km/s |
| $U = 100$ V | $v = 5950$ km/s |
| $U = 1000$ V | $v = 18850$ km/s |

Infolge dieser hohen Geschwindigkeit erlangen die Elektronen eine nicht unerhebliche Bewegungsenergie. Sie wird beim Aufprallen auf die Anode zum größten Teil in Wärme verwandelt.

Vertauschen wir die Anschlüsse der im Anodenkreis liegenden Batterie, fließt kein Strom durch das Innere des Kolbens; denn es werden keine Elektronen von der Anode angezogen. Die Anode selbst aber emittiert, da sie die Emissionstemperatur nicht erreicht, keine Elektronen. Die Röhre wirkt demnach wie ein Ventil, das den elektrischen Strom nur in einer Richtung hindurchfließen läßt. Ersetzen wir die Batterie im Anodenkreis durch eine Wechselspannungsquelle, so kann immer nur dann Strom über die Katoden-Anoden-Strecke fließen, wenn die Anode gegenüber der Katode positiv ist. Die andere „Halbwelle" wird von der Röhre abgesperrt.

Diese Erscheinung nutzt man aus, um Wechselspannungen und Wechselströme in Gleichspannungen oder Gleichstrom zu verwandeln. Aus Rundfunk- und Fernsehempfängern sind uns die „Gleichrichterröhren" hinlänglich bekannt. Sie können Wechselspannungen und -ströme bis zu den höchsten Frequenzen verarbeiten. Allerdings ist die Stromstärke, die durch eine solche Röhre fließen kann, verhältnismäßig gering. In der Nachrichtentechnik jedoch haben sich diese Gleichrichterröhren – wegen ihrer zwei Elektroden nennt man sie „Dioden" – ausgezeichnet bewährt.

Nicht die gesamte kinetische Energie der Elektronen wird beim Auftreffen auf ein Hindernis in Wärme umgesetzt. Ein kleiner Teil verwandelt sich in sehr kurzwellige elektromagnetische Strahlung, in *Röntgenstrahlung* (*Wilhelm Conrad Röntgen*, 1845 bis 1923).

Wir brauchen hier auf die vielfältigen Anwendungen, die die Röntgenstrahlung in Medizin, Wissenschaft und Technik gefunden hat, nicht weiter einzugehen. Sie sind allgemein

bekannt. Erwähnt sei lediglich, daß eine Röntgenröhre im Prinzip ebenso aufgebaut ist wie eine Gleichrichterröhre. Eine leistungsfähige Katode setzt einen dichten Elektronenstrom frei, der von einer sehr hohen, zwischen Katode und Anode liegenden Spannung zur Anode beschleunigt wird. Beim Aufprall löst er Röntgenstrahlen aus. Die Anode ist so geformt, daß die Strahlung bevorzugt nach einer Seite austritt.

An der Anode wird eine erhebliche Wärmemenge entwickelt. Man kann sie durch eine Wasserkühlung abführen. Auch ist es üblich, die Anode mit Hilfe eines Elektromotors ständig rotieren zu lassen. Es werden dabei stets andere Stellen der Anode von den Elektronen getroffen, so daß eine Überhitzung vermieden wird.

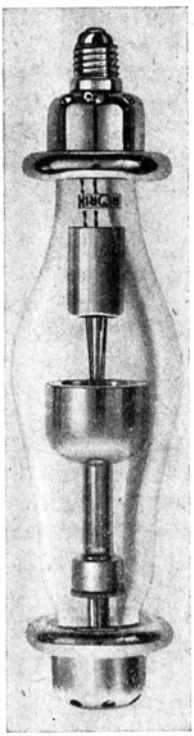


Bild 68
Gleichrichterröhre für hohe Spannungen

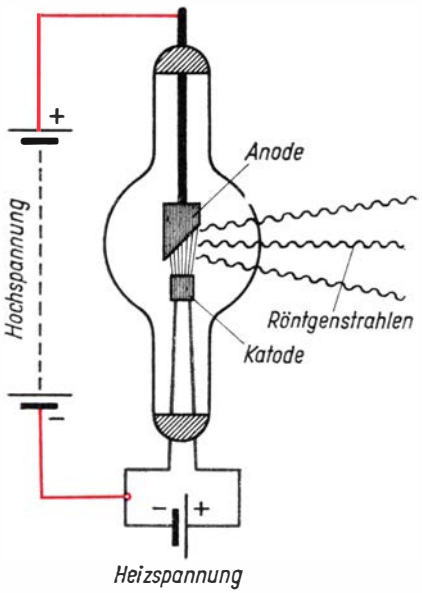



Bild 69 Röntgenröhre

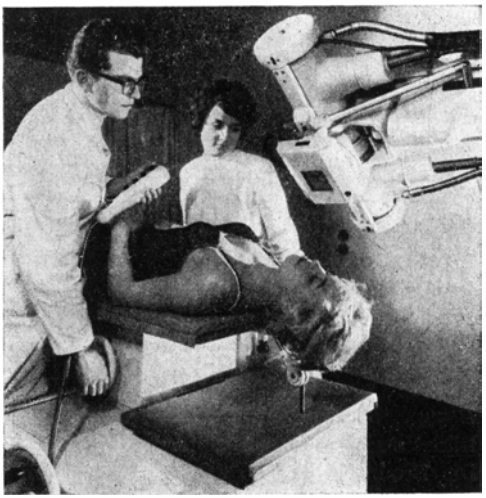


Bild 70 Bewegungsbestrahlungsgerät

## Elektronen auf vorgeschriebenen Flugbahnen

In der Diode fliegen die Elektronen auf kürzestem Wege von der Katode zur Anode. Es bereitet jedoch keinerlei Schwierigkeiten, die Flugbahn der Elektronen zu verändern.
„Schießen" wir zum Beispiel ein Elektron von der Seite her zwischen zwei Platten, an denen Spannung liegt, so wird das Elektron, solange es sich zwischen den Platten befindet, von der einen Platte angezogen, von der anderen dagegen abgestoßen. Es beschreibt ein Stück eines Parabelbogens, genau wie ein Stein,

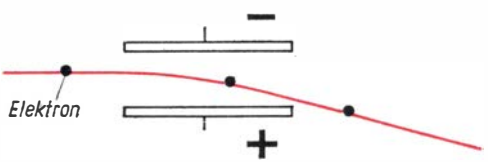



Bild 71 Ablenkung eines Elektrons im elektrischen Feld

der waagerecht oder schräg geworfen und während seines Fluges durch die Schwerkraft nach unten beschleunigt wird.
Auch im Magnetfeld wird ein Elektron abgelenkt. Es verhält sich hier, wie die Motorregel es festlegt. Dabei beschreibt es den Teil einer Kreisbahn. Schießt man das Elektron schräg zu den Feldlinien ein, kann man erreichen, daß es Schraubenbahnen oder Schleifen durchläuft.
Die Wissenschaft hat vor Jahrzehnten die Ablenkung von Elektronen im elektrischen und magnetischen Feld benutzt, um erstmals Geschwindigkeit und Masse der Elektronen zu bestimmen.
Später haben sich aus der Elektronenablenkung zahlreiche technische Anwendungen ergeben, die heute unentbehrlich sind. Eine der ersten war die *„Braunsche Röhre"* (*Karl Ferdinand Braun*, 1850 bis 1918), deren weiterentwickelte Form uns als Bildröhre des Fernsehempfängers bekannt ist.
Die Braunsche Röhre wurde erdacht, um schnelle elektrische Vorgänge sichtbar machen zu können. Ihr Grundgedanke ist es, den „trägen" Zeiger eines elektrischen Meßinstruments durch einen trägheitslosen „elektronischen Zeiger" zu ersetzen.

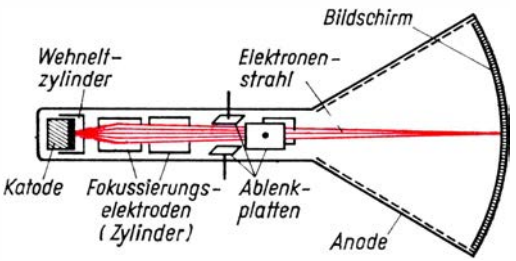



**Bild 72** Braunsche Röhre mit elektrostatischer Ablenkung

Dieser Zeiger ist in der Braunschen Röhre ein schmales Elektronenbündel, ein *Elektronenstrahl*. Man gewinnt ihn, indem man die aus einer Katode austretenden Elektronen durch Zylinder laufen läßt, die an bestimmter elektrischer Spannung liegen, oder indem man sie durch Magnetfelder bestimmter Form

schickt (vgl. auch S. 139). Durch eine Anode, die meistens als metallischer Belag auf die Innenseite des konisch erweiterten Röhrenkolbens aufgetragen ist, werden die Elektronen beschleunigt. Die „Spitze" des Elektronenstrahls trifft auf den flachen oder schwach nach außen gewölbten *Bildschirm*. Er enthält Substanzen, die die Eigenschaft haben, aufzuleuchten, wenn sie von schnellfliegenden Elektronen getroffen werden. Solche Stoffe stehen heute in so reicher Auswahl zur Verfügung, daß es praktisch möglich ist, jeden gewünschten Farbton zu erzielen.

Oftmals soll der Elektronenstrahl mehr oder weniger „abgeblendet" oder „aufgedreht" werden. Zu diesem Zweck finden wir in der Röhre den „*Wehneltzylinder*" (*Arthur Wehnelt*, 1871 bis 1944). Es ist ein kleines, am „Boden" durchbohrtes Blechtöpfchen, das über die Katode der Braunschen Röhre gestülpt wird. Zwischen Wehneltzylinder und Katode wird eine einstellbare Gleichspannung so gelegt, daß der Wehneltzylinder gegenüber der Katode negativ ist. Er stößt infolgedessen, je nach der Höhe der Spannung, die Elektronen mehr oder weniger ab, das heißt, er drosselt den Elektronenstrom. Wählt man die Spannung genügend hoch, wird der Elektronenstrahl völlig abgeriegelt, die entsprechende Stelle des Bildschirms, die jetzt nicht mehr von Elektronen getroffen wird, bleibt dunkel.

Dort, wo die „Spitze" des Elektronenstrahls den Schirm trifft, entsteht ein leuchtender Fleck. Soll er elektrische Vorgänge wiedergeben, muß er auf dem Schirm „schreiben", also sich über die ganze Schirmfläche bewegen können. Das erreicht man, indem man die Elektronen auf ihrem Wege zwischen Katode und Anode elektrischen oder magnetischen Feldern aussetzt.

Man kann zum Beispiel im Inneren der Röhre *Ablenkplatten* vorsehen. Das sind einander gegenüberstehende Metallplättchen, die mit einer elektrischen Spannungsquelle verbunden werden können. Meistens sind zwei Paare solcher Ablenkplatten eingebaut, die um 90° gegeneinander versetzt stehen.

Legen wir zunächst eine Spannung an die waagerecht liegenden Ablenkplatten. Wird dabei die obere Platte positiv, die untere negativ, so ziehen die elektrischen Kräfte den Elektronenstrahl nach oben. Der Leuchtfleck wandert auf den Bildschirm in senkrechter Richtung. Polen wir die Spannungsquelle um, wird

der Elektronenstrahl nach unten ausgelenkt. Um wieviel er abgelenkt wird, hängt von der an den Platten liegenden Spannung, der *Ablenkspannung*, ab. Weil die Elektronen mit sehr hoher Geschwindigkeit zum Bildschirm fliegen, wirkt sich jede noch so schnelle Spannungsänderung an den Ablenkplatten fast verzögerungsfrei auf den auswandernden Leuchtfleck aus. Legt man zum Beispiel eine Wechselspannung an die Platten für die Vertikalablenkung, so werden die Platten abwechselnd positiv und negativ, wobei die Spannung zwischen den Extremwerten ständig steigt bzw. fällt. Der Leuchtfleck wandert stetig in senkrechter Richtung von unten nach oben und von oben nach unten über den Leuchtschirm. Bei höherer Frequenz der Wechselspannung ist unser Auge zu träge, um die einzelnen Bewegungsphasen zu unterscheiden. Es sieht einen leuchtenden Strich. Unterstützt wird dieser Effekt dadurch, daß das Bildschirmmaterial nach dem Auftreffen von Elektronen für eine bestimmte Zeit nachleuchtet.

Legen wir eine Spannung an das senkrecht stehende Plattenpaar, können wir den Elektronenstrahl in waagerechter Richtung nach rechts oder links ablenken.

Wenn Spannungen gleichzeitig an den Platten für die Vertikal- und Horizontalablenkung liegen, wird der Leuchtfleck in waagerechter und senkrechter Richtung verschoben. Durch entsprechende Wahl der „Ablenkspannungen" läßt sich der Leuchtfleck an jeden beliebigen Punkt des Bildschirms führen. Kombiniert man die Spannungen in bestimmter Weise, kann man erreichen, daß zu untersuchende oder zu messende elektrische Vorgänge vom Elektronenstrahl auf dem Bildschirm aufgezeichnet werden.

Geräte, in denen die Braunsche Röhre das leistet, heißen *Elektronenstrahloszillographen*. Ihre Anwendung beschränkt sich nicht auf die elektrische Prüf- und Meßtechnik. Auch akustische und mechanische Schwingungsvorgänge oder elektrische Spannungen, die am Herzen oder im Nervensystem von Lebewesen auftreten, werden auf diese Weise untersucht. In Fernseh- und Radargeräten ist die Braunsche Röhre das wichtigste Bauelement.

Die Ablenkung der Elektronen durch elektrische oder magnetische Felder hat es gestattet, *elektronische Linsen* zu kon-

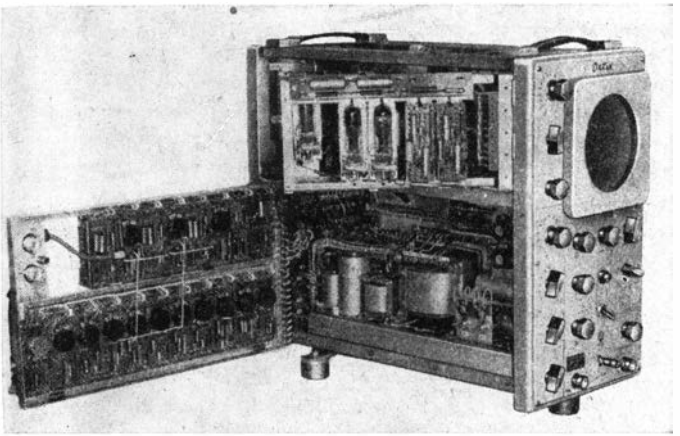


Bild 73 Fehlerortungsgerät mit Anzeige durch Braunsche Röhre

struieren. In ihnen wird ein Elektronenstrahl ähnlich geführt wie ein Lichtstrahl in Glaslinsen.

Elektronenlinsen bestehen entweder aus Metallblenden, die in der Mitte durchbohrt, in gewissem Abstand voneinander angeordnet und an verschieden hohe Spannungen gelegt werden, oder aus Magnetspulen, durch deren Innenraum der Elektronenstrahl läuft. Man unterscheidet dementsprechend zwischen *elektrostatischen* und *elektromagnetischen* Elektronenlinsen.

Elektronenlinsen können Elektronenstrahlen sammeln und zerstreuen, und sie können vergrößerte oder auch verkleinerte „Bilder" von Gegenständen entwerfen, die entweder selbst Elektronen aussenden oder einen Elektronenstrahl je nach ihrer Dichte mehr oder weniger gut hindurchtreten lassen.

Die bekannteste Anwendung der Elektronenlinsen ist das *Elektronenmikroskop*. Seine Vergrößerung übertrifft die des Lichtmikroskops um das rund Hundertfache.

Im Elektronenmikroskop wird mit Hilfe einer elektrisch geheizten Katode ein kräftiger Elektronenstrom erzeugt und durch eine elektromagnetische Linse, den *Kondensor*, zu einem

parallelen Strahlenbündel geformt. Dieses Strahlenbündel trifft auf das elektronenmikroskopische Präparat. Die Elektronen werden, ähnlich wie Licht von einem Diapositiv, mehr oder weniger zurückgehalten oder zur Seite abgelenkt. Hinter dem Präparat finden wir eine weitere Elektronenlinse, das *Objektiv*. Es entwirft ein vergrößertes Bild des zu untersuchenden Präparats, das durch eine dritte Linse nochmals vergrößert wird. Auf einem Bildschirm oder auch auf einer Fotoplatte oder einem Film entsteht das endgültige Bild. Statt der elektromagnetischen können auch elektrostatische Linsen zum Aufbau eines Elektronenmikroskops Verwendung finden.

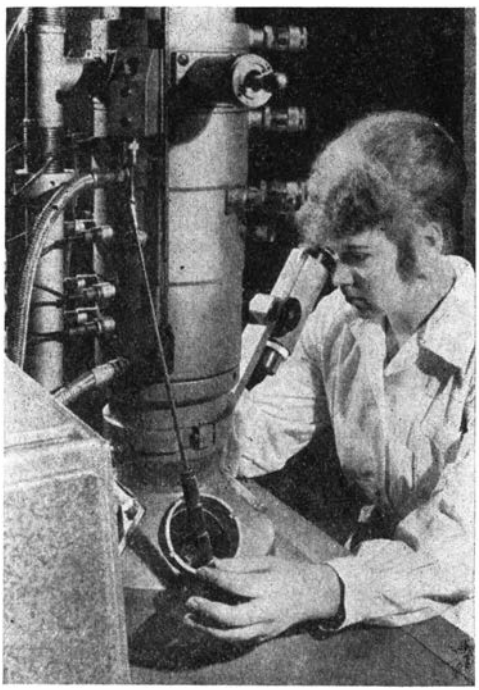


Bild 74 Arbeit an einem Elektronenmikroskop

Da Elektronenstrahlen nur im Vakuum eine größere Entfernung überbrücken können, muß der Innenraum des Elektronenmikroskops ständig evakuiert sein. Auch die zu untersuchenden Präparate müssen in diesen luftleeren Raum eingeschleust werden. Das macht nicht nur eine leistungsfähige Pumpenanlage und den Einbau besonderer Vakuumschleusen erforderlich, sondern zwingt auch zu einer ganz neuartigen Technik der Vorbereitung der zu untersuchenden Präparate.
Elektronenmikroskope sind daher teure und komplizierte Geräte. Trotzdem machen sie sich rasch „bezahlt". Nicht nur die Medizin und die Biologie, sondern auch die Werkstoffkunde und die chemische Industrie haben durch den Einsatz von Elektronenmikroskopen wertvollste neue Erkenntnisse gewonnen.
Daß Elektronen ein Hindernis erwärmen, auf das sie treffen, ist in vielen Fällen unangenehm; denn man muß diese Wärme abführen. In jüngster Zeit jedoch haben sich gerade der durch den „Elektronenbeschuß" von Werkstoffen entstehenden Wärme weite Anwendungen erschlossen.
In vielen technischen Disziplinen werden sehr „reine" Werkstoffe benötigt. Müssen sie im Laufe ihrer Verarbeitung geschmolzen werden, ist bei den herkömmlichen Schmelzverfahren eine Verunreinigung des Materials durch Verbrennungsgase oder durch die atmosphärische Luft nur sehr schwer zu vermeiden. Deswegen schmilzt man derartige Stoffe gern im Vakuum.
Dabei bewährt sich besonders der *Elektronenstrahlofen*, der seit einigen Jahren in unserer Republik hergestellt und eingesetzt wird. Bei seiner Entwicklung kommen dem Forschungsinstitut Manfred von Ardenne in Dresden besondere Verdienste zu. Das stangenförmige Schmelzgut wird in eine Kammer geschoben, die durch ein Pumpenaggregat evakuiert wird. Auf das Werkstoffende wird ein leistungsstarker Elektronenstrahl gerichtet. Das Schmelzgut wird erwärmt, schmilzt und tropft in einen Tiegel. Eine Verunreinigung des Schmelzgutes durch Verbrennungsgase oder durch Luft ist ausgeschlossen. Außerdem entweichen während des Schmelzvorganges alle im Werkstoff eingeschlossenen Gasreste. Sie werden fortlaufend abgepumpt.
Selbst hitzebeständigste Werkstoffe können im Elektronenstrahl geschmolzen werden. Auch neuartige Schweißmethoden er-

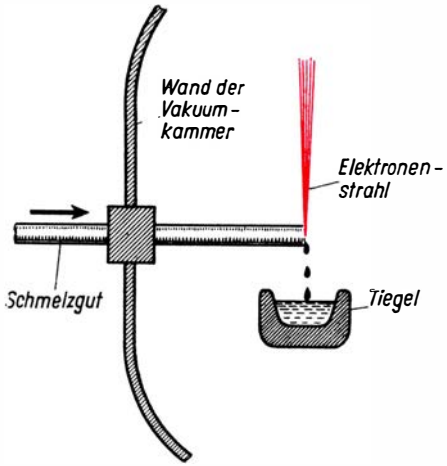



Bild 75 Prinzip des Elektronenstrahlofens

öffnen sich durch die Anwendung von Elektronenstrahlen. Feinste Bohrungen, Schnitte usw. sind in einem Bruchteil der bisher erforderlichen Zeit zu erzielen.

**Die Verstärkerröhre**

Ein Relais kann mit Hilfe schwacher Ströme stärkere Ströme ein- oder ausschalten; es kann jedoch mit Hilfe schwacher, sich verändernder Ströme die Stärke anderer Ströme nicht stetig steuern. Gerade das wird aber in der Technik häufig verlangt. Als der Fernsprecher eingeführt wurde, stellte es sich zum Beispiel heraus, daß die Sprechströme auf Fernleitungen so geschwächt wurden, daß sie nicht mehr kräftig genug waren, einen Hörer ansprechen zu lassen. Man mußte sie *verstärken*, und dazu war ein *Telefonrelais* nötig, das die den Schallschwingungen entsprechenden Strom- und Spannungsschwankungen vergrößerte. Versuche, ein mechanisches Telefonrelais zu konstruieren, schlugen fehl. Erst die *Elektronenröhre*, die *Verstärkerröhre*, brachte die Lösung dieses Problems.
Ihr Prinzip kennen wir bereits: In der Elektronenstrahlröhre drosselt der Wehneltzylinder den Elektronenstrom mehr oder

weniger ab. In der Elektronenröhre tritt an die Stelle des Wehneltzylinders ein *Steuergitter*. Es ist z. B. eine Drahtwendel, die zwischen der Katode und der zylinderförmigen Anode einer Diode angeordnet wird. Man nennt eine solche Röhre, die nunmehr drei Elektroden enthält, *Triode*. Ihr Aufbau ist in Bild 76 vereinfacht dargestellt.

Wird zwischen Anode und Katode der Triode eine Spannungsquelle in richtiger Polung geschaltet, so fließt, wie bei jeder Diode, *Anodenstrom*. Allerdings müssen die Elektronen jetzt zwischen den Gitterwindungen hindurchfliegen. Zwischen Gitter und Katode wird nunmehr eine weitere Spannungsquelle geschaltet, die *Gitterbatterie*. Diese Spannungsquelle beeinflußt den Anodenstrom, je nachdem, wie sie gepolt ist und wie hoch ihre Spannung ist.

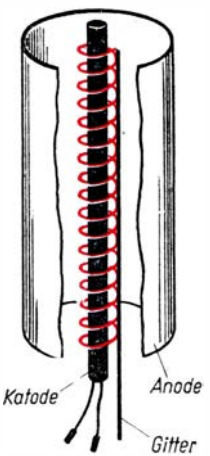



Bild 76 Triode

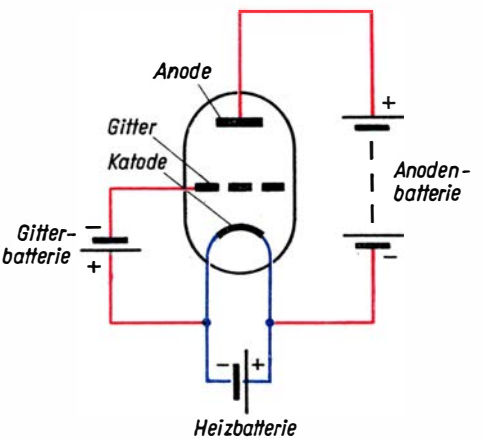



Bild 77 Die Triode und ihre Spannungsquellen

Schließen wir die Gitterbatterie so an, daß ihr negativer Pol am Gitter, ihr positiver an der Katode liegt, wird der Anodenstrom vermindert; denn das negative Gitter bremst die gleichfalls negativen Elektronen ab. Erhöhen wir die Spannung am Gitter, wird der Anodenstrom immer schwächer; schließlich läßt das

Gitter überhaupt keine Elektronen mehr passieren; der Anodenstrom ist unterbrochen. Umgekehrt würde ein gegenüber der Katode positives Gitter den Anodenstrom wegen der zusätzlichen Anziehung stark erhöhen. Daher ist dieser Fall bei üblichen Verstärkerschaltungen unerwünscht; wir brauchen ihn nicht näher zu erörtern.

Man kann also mit der zwischen Gitter und Katode liegenden Spannung den Anodenstrom steuern. Diese Steuerwirkung beschränkt sich nicht, wie beim Relais, auf das Ein- oder Ausschalten, sondern kann stetig erfolgen. Sie arbeitet außerdem wegen der hohen Elektronengeschwindigkeit fast trägheitslos.

Spannungsänderungen am Gitter folgt der Anodenstrom unmittelbar. Weil das Gitter dicht vor der Katode angebracht ist, in einem Gebiet also, in dem die Elektronen noch keine allzu große Geschwindigkeit erlangt haben, rufen bereits geringfügige Änderungen der Gitterspannung kräftige Änderungen des Anodenstromes hervor. Das ist das Arbeitsprinzip des elektronischen Verstärkers.

Leiten wir beispielsweise die schwachen Sprechströme vom Ende einer Fernsprechleitung den Klemmen A und B in Bild 78 zu, durchfließen sie den Widerstand $R_1$. Nach dem Ohmschen Gesetz entsteht an diesem Widerstand ein *Spannungsabfall*, der

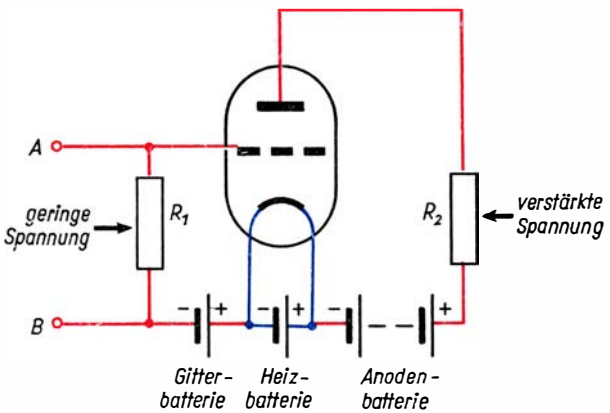



Bild 78 Die Triode als Verstärker

gleichzeitig als *Steuerspannung* zwischen Gitter und Katode der Triode liegt. Die Spannung zwischen Gitter und Katode ändert sich also fortwährend, das Gitter kann aber wegen der gleichfalls eingeschalteten Gitterbatterie niemals positiv gegen die Katode werden.

Die Steuerspannung, die ein Bild der Sprechströme und damit der ursprünglichen Schallschwingungen ist, beeinflußt den Anodenstrom. Dieser wird gezwungen, einen Widerstand $R_2$ zu durchfließen. Auch an diesem Widerstand tritt daher ein Spannungsabfall auf. Er verändert sich im Rhythmus des Anodenstromes, gibt also ebenfalls ein Bild der Schallschwingungen.

Der Anodenstrom ist aber von vornherein viel stärker als der schwache Sprechstrom, der den Widerstand $R_1$ durchfließt. Außerdem hängt seine Stärke nicht von den Eigenschaften der Fernleitung, sondern vor allem von der Konstruktion der Röhre und von der Leistungsfähigkeit der Spannungsquelle im Anodenkreis ab. Der Anodenstrom ruft daher am Widerstand $R_2$ einen entsprechend höheren Spannungsabfall hervor, die am Gitterwiderstand auftretende geringe Spannung wird „verstärkt".

Man kann auf diese Weise ohne weiteres eine mehr als hundertfache Spannungsverstärkung erzielen. Reicht eine Röhre nicht aus, kann man die an $R_2$ auftretende verstärkte Spannung in einer zweiten Röhre weiterverstärken usf. Dabei ergibt sich die Gesamtverstärkung durch Multiplikation der Verstärkung der einzelnen Stufen.

Wechselspannungen mit Frequenzen bis zu vielen Millionen Hertz lassen sich mit Elektronenröhren verstärken. Daher rührt die große Bedeutung der Röhren für die Funktechnik, für den Rundfunk und das Fernsehen. Aber auch industrielle Elektronik, Tonfilm- und Verstärkertechnik, Radar und Funknavigation, Elektromedizin und zahlreiche Prüf- und Meßverfahren wären ohne die Verstärkerröhre kaum vorstellbar. Erst die Halbleitertechnik stellte Bauelemente zur Verfügung, die die Elektronenröhre auf manchen Gebieten ablösten, an anderer Stelle wirkungsvoll ergänzen.

Im Laufe der Zeit wurden zahlreiche Röhrentypen entwickelt. So enthalten heute die meisten Röhren eine *indirekt geheizte*

Katode. Der Heizstrom erhitzt einen dünnen Draht, der seinerseits die Wärme an ein dünnes Röhrchen weitergibt. Erst dieses Röhrchen trägt die Schicht, die Elektronen aussendet. Man kann so nicht nur leistungsfähigere Katoden herstellen, sondern es wird auch möglich, die Röhren mit dem fast überall verfügbaren Wechselstrom zu heizen.
Auch hat es sich als zweckmäßig erwiesen, Röhren nicht nur mit einem, sondern mit mehreren Gittern auszustatten. So enthält beispielsweise die Pentode, ein besonders häufig angewendeter Röhrentyp, drei Gitter.

**Entladungserscheinungen in Gasen**

Sowohl die Diode als auch die Triode werden evakuiert. Ganz andere elektrische Erscheinungen sind zu beobachten, wenn wir den Innenraum einer Röhre mit einem unter niedrigem Druck stehenden Gas füllen. Solange die zwischen Katode und Anode liegende Spannung niedrig bleibt, ist kein nennenswerter Stromfluß festzustellen. Steigert man die Spannung jedoch allmählich, so schnellt bei einer bestimmten Spannung die Stromstärke in die Höhe. Gleichzeitig beginnt der Innenraum des Röhrenkolbens zu leuchten. Die Farbe der Lichterscheinung hängt vom jeweiligen Füllgas ab. Helium leuchtet gelbrosa, Argon violett, Neon rötlich, eine Natriumdampffüllung ergibt intensives gelbes Licht.
Wie im Vakuum werden auch jetzt Elektronen von der Katode zur Anode beschleunigt. Dabei stoßen sie immer wieder mit Atomen des Füllgases zusammen, die im Röhrenkolben unregelmäßige Wärmebewegungen ausführen. Hat ein Elektron – und das ist bei einer bestimmten „Zündspannung" der Fall – zwischen zwei Zusammenstößen genügend Bewegungsenergie erlangt, so kann es beim nächsten Zusammenprall ein Elektron aus dem getroffenen Atom schlagen. Auch dieses Elektron fliegt in Richtung der Anode und „befreit" unterwegs weitere Elektronen. Infolge dieser Stoßionisation schwillt der Strom lawinenartig an. Er würde die Röhre zerstören, wenn man nicht besondere Maßnahmen zur Strombegrenzung vorsähe. Gleichzeitig werden zahlreiche Atome „angeregt", sie nehmen Energie auf, ohne zu Ionen zu werden, und geben sie als Licht-

blitz wieder ab. Dieser Vorgang spielt sich an vielen Stellen gleichzeitig ab und läßt das Füllgas aufleuchten.

Eine Anwendung dieser Erscheinungen ist die gasgefüllte Gleichrichterröhre, die *Gasdiode*. Da die Bewegungsrichtungen von Elektronen und Ionen durch die Anziehung von Katode und Anode bestimmt werden, kann auch eine gasgefüllte Röhre zur Gleichrichtung von Wechselspannungen benutzt werden. Es lassen sich mit ihr sogar weit stärkere Ströme gleichrichten als mit einer Röhre, deren Kolben evakuiert ist. Auch für die Funktion der *Quecksilberdampfgleichrichter*, mit denen sich sehr starke Ströme gleichrichten lassen, sind Ionisierungsvorgänge verantwortlich.

Bringt man zwischen Katode und Anode einer Gasdiode ein Gitter an, erhält man eine Gastriode. Als Verstärkerröhre ist sie allerdings nicht geeignet. Wir können durch die am Gitter liegende Spannung nur die Zündspannung verändern, das heißt dafür sorgen, daß die Röhre bei höherer oder niedrigerer Spannung zwischen Katode und Anode zündet. Nach dem Zünden verliert das Gitter seine Steuerwirkung. Es wird von positiven Ionen eingehüllt, die seine Steuerwirkung „abfangen". Trotzdem ist die Gastriode, auch Stromtor oder Thyratron genannt, zu einem wichtigen Bauelement der industriellen Elektronik geworden.

An vielen Stellen der modernen Industrie steht man vor der Aufgabe, die Leistung von Motoren oder anderen elektrischen Geräten und Anlagen stufenlos und möglichst verlustfrei zu regeln, wobei oft noch eine Fernbedienung über große Distanzen verlangt wird. Hierbei hilft das Thyratron.

Betrachten wir ein Thyratron, dessen Anode und Katode über einen Verbraucher mit einer Wechselspannungsquelle verbunden werden. Liegt zwischen Gitter und Katode des Thyratrons eine solche Spannung, daß das Thyratron zündet, fließt durch die Röhre und durch den Verbraucher Strom. Das Thyratron kann aber immer nur bei der Halbwelle (vgl. S. 133) zünden, bei der die Anode positiv und die Katode negativ ist. Gegen Ende der Halbwelle, bei der *Löschspannung*, wird der Stromfluß unterbrochen, um bei der nächsten „positiven" Halbwelle wieder einzusetzen. Auch das Thyratron wirkt also als Gleichrichter; in seinem Anodenkreis fließt ein aus Strom-

schüben und dazwischenliegenden Pausen zusammengesetzter Gleichstrom, mit dem man beispielsweise einen Gleichstrommotor speisen kann.

Mit der Gitterspannung können wir die Zündspannung verschieben. Wird die Gitterspannung negativer, zündet das Thyratron erst bei relativ hoher Spannung; verschieben wir die Gitterspannung in positiver Richtung, zündet die Röhre eher. Diese Veränderung der Gitterspannung läßt sich über große Entfernung durchführen, und es fallen dabei nur niedrige Installationskosten an, da zum Steuern am Gitter eine geringe Spannung ausreicht.

Durch das Verschieben des Zündpunktes wird ein mehr oder weniger großer Teil der Stromschübe unterdrückt. Die Pausen zwischen den Stromschüben werden länger, die Stromschübe selbst kürzer. Die mittlere Stromstärke im Anodenkreis des Thyratrons sinkt oder steigt in Abhängigkeit von der Gitterspannung. Ein Motor, der von diesem Strom durchflossen wird, kann – zum Beispiel in seiner Drehzahl – geregelt werden. Weil dazu nur eine Spannungsänderung am Thyratrongitter erforderlich ist, lassen sich Thyratronsteuerungen leicht so ausführen, daß die Regelung selbsttätig erfolgt bzw. der Motor ein bestimmtes Arbeitsprogramm einhält.

Neben dem Thyratron wurden noch andere Typen von „Ionenröhren" entwickelt. Wir müssen es uns versagen, näher auf sie einzugehen.

Daß das Gas in einer Ionenröhre leuchtet, ist eine Nebenerscheinung. Gerade dieses Leuchten hat aber seit vielen Jahrzehnten die Aufmerksamkeit erregt, da es nicht die bei anderen Lichtquellen unvermeidliche starke Wärmeentwicklung mit sich bringt.

Die ersten Röhren dieser Art waren die in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts aufgekommenen *„Geißlerschen Röhren"* (*Heinrich Geißler*, 1814 bis 1879). Legt man an eine längliche Glasröhre, die ein stark verdünntes Gas und zwei Blechplättchen als Elektroden enthält, eine Spannung von mehreren Tausenden Volt, so beginnt die Röhre auch ohne erhitzte oder besonders präparierte Katode zu leuchten. Es gibt in der Röhre von vornherein stets einige Ladungsträger, die sich in Bewegung setzen und infolge der hohen Spannung so viel Bewegungs-

energie gewinnen, daß sie die *Ladungsträgerlawine* auslösen können.

Versuche, Geißlersche Röhren für die Allgemeinbeleuchtung einzusetzen, schlugen fehl. Ihre Helligkeit reichte nicht aus, die Farbzusammensetzung war für das Auge nicht günstig. Auch störte die hohe Betriebsspannung dieser Röhren, die besondere Isolierungsmaßnahmen erforderlich machte. Als Werbeleuchtröhren dagegen werden Geißlersche Röhren, die sich zu fast jeder beliebigen Form biegen lassen, häufig eingesetzt.

Nachkommen der Geißlerschen Röhren sind die *Leuchtstofflampen*. Sie können im Gegensatz zu Werbeleuchtröhren mit normaler Netzspannung betrieben werden und sind für Beleuchtungszwecke gut geeignet.

Eine Leuchtstofflampe ist ein langgestreckter Glaskörper, der mit Quecksilberdampf unter niederem Druck gefüllt ist. Dieser Dampf sendet in einer Gasentladung nicht nur bläulich-grünes Licht, sondern vor allem unsichtbare ultraviolette Strahlung aus. Gerade diese Strahlung wird bei der Leuchtstofflampe ausgenutzt. Die Innenseite des Glaskolbens trägt ein Stoffgemisch, das die Eigenschaft hat, hell aufzuleuchten, wenn es von ultravioletter Strahlung getroffen wird. Die Farbtönung hängt nicht von der Ultraviolettstrahlung, sondern von der chemischen Zusammensetzung der Leuchtstoffe ab. Sie kann in weiten Grenzen variiert werden.

In der Lampe befinden sich an beiden Enden Wolframwendeln. Sie werden beim Einschalten der Lampe zum Glühen gebracht und setzen eine große Zahl von Elektronen frei. Diese Elektronen

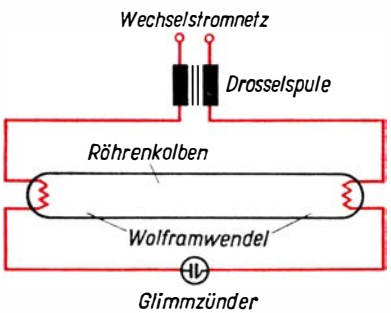



Bild 79 Die Leuchtstofflampe

erleichtern das „Zünden" der Lampe. Nach dem Zünden hält sich die Entladung in der Röhre von selbst aufrecht. Daher werden die Ströme durch die Wendeln nach einigen Sekunden über den sogenannten Glimmzünder selbsttätig abgeschaltet.

Der Leuchtstoffröhre ist außerdem eine *Drosselspule* – einen Eisenkern und viele Drahtwindungen enthaltend – vorgeschaltet (vgl. S. 166). In ihr baut sich ein Magnetfeld auf. Unterbricht der Glimmzünder den Strom durch die Wolframwendeln, verschwindet dieses Magnetfeld plötzlich. Dabei entsteht durch Selbstinduktion ein kräftiger Spannungsstoß, der die Röhre mit Sicherheit zündet. Während des weiteren Betriebes sorgt die Drossel dafür, daß die Stärke des durch die Röhre fließenden Stromes begrenzt bleibt.

Leuchtstofflampen sind zwar teurer als normale Glühlampen. Ihre Wirtschaftlichkeit und ihre Lebensdauer liegen jedoch höher, so daß sich die Anschaffungskosten bald bezahlt machen.

Das Leuchten einer Gasentladung wird auch in „Glimmlampen" ausgenutzt. Ihr Stromverbrauch und ihre Helligkeit sind gering. Deshalb eignen sie sich gut als Signal- und Kontrollampen. Auch in Glimmlampen ist eine Strombegrenzung erforderlich. Man erreicht sie mit Hilfe eines Vorwiderstandes, der häufig unmittelbar im Lampensockel untergebracht ist.

### Halbleiterbauelemente

Die systematische Erforschung der Leitungsvorgänge in Halbleitern, zu denen Stoffe wie Germanium und Silizium, Selen, Blei- und Kadmiumsulfid, Gallium- und Indiumarsenid, Galliumphosphid und viele andere zählen, begann erst, als der Leitungsmechanismus in Metallen, Flüssigkeiten und Gasen längst aufgeklärt war. Wir wollen diese Leitungsvorgänge am Beispiel des für die Halbleitertechnik besonders wichtigen Germaniums untersuchen.

Germanium ist vierwertig. Im Idealfall wäre jedes seiner vier Valenzelektronen an ein Valenzelektron eines Nachbaratoms gebunden. Es gäbe keine Leitungselektronen, Germanium wäre ein Isolator. Doch bereits bei Zimmertemperatur können zahlreiche Elektronen „ihre" Atome verlassen und sich als Leitungs-

elektronen im Kristall bewegen. Ihre Zahl nimmt mit der Temperatur zu, die Leitfähigkeit des Germaniums wächst. (Im Gegensatz dazu hat in metallischen Leitern bereits bei Zimmertemperatur im Mittel jedes Atom ein Elektron „abgegeben"; die Zahl der Leitungselektronen ist also sehr groß.)

Dort, wo ein Elektron ein Atom verließ, entsteht ein „Loch". Es ist durch das Fehlen negativer Ladung charakterisiert und kann daher als positive elektrische Ladung aufgefaßt werden. Wird in der Nähe des Lochs ein anderes Elektron frei, kann es geschehen, daß es das Loch „schließt". Dafür entsteht jedoch ein neues Loch an der Stelle, der das ausfüllende Elektron entstammt. Dieses Loch wieder kann von einem Elektron gefüllt werden, das seinerseits ein Loch hinterläßt usf. Im Germaniumkristall bewegen sich nicht nur Elektronen, sondern auch Löcher, *Defektelektronen*.

Liegt elektrische Spannung an einander gegenüberliegenden Seiten des Germaniumkristalls, suchen die Leitungselektronen dem positiven Pol näherzukommen; die Defektelektronen wandern zum negativen Pol. Außer dem Elektronenstrom fließt ein Defektelektronenstrom in entgegengesetzter Richtung.

An den beschriebenen Vorgängen nehmen nur Germaniumatome mit ihren Elektronen teil. Deshalb spricht man von *Eigenleitung* des Germaniums. Sie ist bei Zimmertemperatur verhältnismäßig gering; erst bei höheren Temperaturen macht sie sich deutlich und häufig sehr störend bemerkbar.

Wichtiger für Germanium und für andere Halbleitermaterialien ist die sogenannte *Störstellenleitung*. Sie tritt auf, wenn in einen Halbleiterkristall Fremdatome als Störstellen „eingebaut" werden. Bereits winzige Mengen solcher „Verunreinigungen" (1 Fremdatom auf mehr als $10^6$ Atome des Grundmaterials) genügen, um die elektrischen Eigenschaften eines Halbleiters gründlich zu verändern.

Nehmen wir an, in das Kristallgitter des Germaniums seien fünfwertige Atome, z. B. Arsen, eingebaut. Von den fünf Valenzelektronen eines Arsenatoms werden durch benachbarte Germaniumatome nur vier gebunden. Das fünfte kann sich als Leitungselektron durch das Germanium bewegen. Gleiches gilt für alle anderen Arsenatome. Wir haben es mit einem Über-

schußhalbleiter zu tun, oder – da die Leitfähigkeit durch einen Überschuß an negativen Elektronen bewirkt wird – mit *n*-leitendem Germanium oder kurz mit *n-Germanium*.

Werden in das Kristallgitter des vierwertigen Germaniums dreiwertige Atome, z. B. Bor-, Indium- oder Aluminiumatome, eingefügt, fehlt an den Störstellen jeweils ein Valenzelektron zur Bindung, es entsteht ein Loch. Es wird sehr bald durch ein Elektron aus einem benachbarten Germaniumatom geschlossen, das seinerseits ein Loch hinterläßt. Unter dem Einfluß einer von außen angelegten Spannung wandern die Löcher. Es fließt ein Defektelektronenstrom.

Diesmal entstand die Leitfähigkeit durch fehlende Elektronen. Man spricht daher von einem Mangelhalbleiter, von *p*-leitendem Germanium (da diesmal die positiven Löcher maßgeblich am Leitungsvorgang beteiligt sind) oder kurz von *p-Germanium*. Beide Arten der Störstellenleitung sind für die Halbleitertechnik wichtig.

Die meisten Halbleiterbauelemente verdanken wir Vorgängen an den Grenzen zwischen Gebieten verschiedenen Leitungstypus. So ist beispielsweise der *p-n*-Übergang, das Grenzgebiet zwischen *p*- und *n*-leitendem Halbleitermaterial, die Grundlage der *Halbleiterdiode*.

Wir wollen ihre Wirkungsweise an einem Germaniumkristall kennenlernen, der einen solchen Übergang aufweist und im *n*-Gebiet ebenso viele „überschüssige" Elektronen enthalten soll wie Defektelektronen im *p*-Gebiet.

Die Atome des Kristalls führen ständig Wärmeschwingungen aus. Leitungs- und Defektelektronen ruhen ebenfalls nicht. Infolgedessen kommt es an der Trennfläche zwischen *p*- und *n*-Gebiet fortwährend zu Grenzübertritten: Aus dem *p*-Gebiet dringen Defektelektronen in das *n*-Gebiet, während Elektronen aus dem *n*-leitenden Teil in das *p*-Gebiet vorstoßen.

Im grenznahen *p*-Gebiet fehlt durch das Abwandern von Defektelektronen positive Ladung. Das bedeutet: Im Grenzgebiet des *p*-leitenden Teils entsteht eine negative Raumladung. Sie wird dadurch noch verstärkt, daß aus dem *n*-Gebiet Elektronen in das *p*-Gebiet drangen.

Im *n*-Gebiet treten entsprechende Erscheinungen mit umgekehrten Vorzeichen auf. Durch Abwandern von Elektronen und

Eindringen von Defektelektronen bildet sich eine positive Raumladung. Sowohl die positive als auch die negative Raumladung stoßen weitere Ladungsträger gleichen Vorzeichens ab. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem keine weiteren Ladungsträger mehr in das jeweilige Raumladungsgebiet vordringen können. Innerhalb der Grenzschicht bildet sich ein dünner, an Ladungsträgern verarmter und infolgedessen schlecht leitender Bereich.

Wir wollen nun eine Spannung an die Begrenzungsflächen des Kristalls legen. Zuerst sei der positive Pol der Spannungsquelle mit dem *n*-Gebiet verbunden. Elektronen werden aus dem *n*-leitenden Grenzgebiet abgesaugt. Sie bewegen sich in Richtung der positiven Elektrode. Die positive Raumladung in Grenznähe wird dadurch noch ausgeprägter. Auf der anderen Seite, im *p*-Gebiet, wandern Defektelektronen zur negativen Elektrode. Die Folge ist eine Vergrößerung der negativen Raumladung in Grenznähe. Durch diese Vorgänge verarmt das Grenzgebiet so an Ladungsträgern, daß es kaum noch Strom zu leiten vermag; es wird zur Sperrschicht.

Es liege nunmehr der positive Batteriepol am *p*-Gebiet, der negative an der *n*-leitenden Seite. Da gleichnamige Ladungen einander abstoßen, „drückt" die positive Elektrode Defektelektronen, die negative Elektronen in das Grenzgebiet. Die Raumladungen werden infolgedessen abgebaut. Außerdem nimmt die Zahl der Ladungsträger im Grenzgebiet zu. Die Leitfähigkeit des Kristalls steigt stark an.

Ein *p*-*n*-Kristall läßt also elektrischen Strom nur in einer Richtung verhältnismäßig ungehindert durch, während er ihn in der Gegenrichtung nahezu sperrt. Der Sperrwiderstand ist vieltausendfach größer als der Flußwiderstand. Aus dieser Ventilwirkung ergibt sich die Möglichkeit, *p*-*n*-Übergänge zur Gleichrichtung zu benutzen. Legt man nämlich Wechselspannung an einen *p*-*n*-Kristall, kommt es nur während der Halbwellen zum Stromfluß, bei denen der positive Pol der Spannungsquelle mit dem *p*-Gebiet verbunden ist. Allerdings fließt auch in umgekehrter Richtung ein schwacher Sperrstrom durch den Halbleitergleichrichter. Er wird durch die stets vorhandene Eigenleitung des Halbleitermaterials hervorgerufen und ist daher temperaturabhängig. Erwärmt sich ein Gleichrichter

im Betrieb zu sehr, geht die Ventilwirkung des *p-n*-Überganges infolge der wachsenden Eigenleitung verloren.
Befindet sich der *p-n*-Übergang im Innern des Halbleitergleichrichters, bezeichnet man diesen als *Flächengleichrichter*. Der *p-n*-Übergang läßt sich jedoch auch an die Kristalloberfläche verlegen, der dann eine feine Drahtspitze aufsitzt. Das ergibt einen Spitzengleichrichter, eine *Spitzendiode*. Sie ist vor allem für die Elektronik und für die Hochfrequenztechnik von Bedeutung.
In der Elektronik wird vor allem der Flächengleichrichter eingesetzt. Er war als Kupfer(I)-oxid- und als Selengleichrichter seit Jahrzehnten bekannt, wird jedoch heute (vor allem im Bereich größerer elektrischer Leistungen) vorwiegend als Siliziumgleichrichter ausgeführt.
Dafür gibt es wichtige technische und ökonomische Gründe: Die Sperrspannung von Siliziumgleichrichtern ist um ein Vielfaches höher als z. B. die eines Selengleichrichters. Man kommt daher auch bei der Gleichrichtung hoher Spannungen mit wenigen Gleichrichterelementen aus, während früher zahlreiche Gleichrichterelemente hintereinandergeschaltet werden mußten. Ähnliches gilt für die Stromstärke: Ein Siliziumgleichrichter kann eine mehr als tausendfach höhere Stromstärke verarbeiten als ein Selengleichrichter gleicher wirksamer Fläche. Infolgedessen beanspruchen Siliziumgleichrichter viel weniger Raum als ihre Vorläufer. Ihr Wirkungsgrad liegt über 95 % und ist damit dem anderer Gleichrichter so weit überlegen, daß sich durch den Einsatz von Siliziumgleichrichter-Anlagen besonders bei Großverbrauchern von Gleichstromenergie, z. B. in der chemischen Industrie, beträchtliche Energieeinsparungen erzielen lassen.
Die Vorzüge der Halbleiterdiode legten es nahe, einen ähnlichen Schritt zu versuchen wie einst von der gleichrichtenden Röhrendiode zur verstärkenden Triode, d. h. ein verstärkendes Halbleiterbauelement zu entwickeln. Diese Überlegungen führten vor rund dreißig Jahren zum *Transistor*, einem der wichtigsten Bauelemente der modernen Elektronik.
In einem Germanium- oder Siliziumeinkristall folgen einander drei Gebiete verschiedenen Leitungstypus: der *Emitter*, die nur wenige Mikrometer dicke *Basis* und der *Kollektor*. Jedes

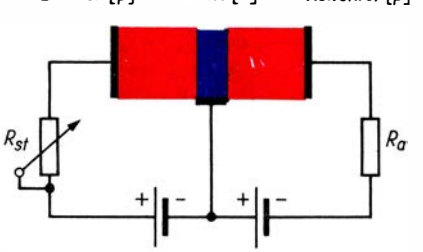



Bild 80 p-n-p-Transistor und seine Stromkreise

Gebiet ist mit einer Anschlußelektrode versehen. Je nachdem, wie die Bereiche verschiedener Leitfähigkeit einander folgen, spricht man von einem „*p-n-p*"- oder einem „*n-p-n*"-Transistor. Beide Arten werden produziert.

In Bild 80 ist ein *p-n-p*-Transistor mit zwei Spannungsquellen von wenigen Volt und zwei Widerständen zusammengeschaltet. Betrachten wir vorerst nur den linken *p-n*-Übergang, können wir in Anlehnung an die Halbleiterdiode feststellen: Er ist in Durchlaßrichtung angeschlossen, aus dem linken *p*-Gebiet werden Defektelektronen in den Grenzbereich und in die Basis gedrückt (daher die Bezeichnung Emitter). Der rechte *p-n*-Übergang dagegen ist in Sperrichtung gepolt; über ihn fließt nur ein schwacher Sperrstrom. Entscheidend für die Funktion des Transistors ist, daß die beiden eingezeichneten Stromkreise über die Basis miteinander verknüpft sind.

Die meisten in die Basis eingedrungenen Defektelektronen fließen nämlich nicht (wie bei einer Halbleiterdiode zu erwarten wäre) zum Basisanschluß, um sich mit Leitungselektronen aufzufüllen, sondern „treiben" zur rechten Grenze der Basis und weiter in das rechte *p*-Gebiet. Sie werden vom Kollektoranschluß angezogen, „aufgesammelt" (daher die Bezeichnung Kollektor). Die Folge ist, daß der Strom im Kollektorkreis nicht mehr ausschließlich durch den Sperrwiderstand des Basis-Kollektor-Übergangs, sondern vor allem durch die von der Basis kommenden Defektelektronen bestimmt wird.

Der Widerstand des auf Durchlaß geschalteten Emitter-Basis-Übergangs ist gering. Deshalb genügen bereits kleine Spannungs-

änderungen, hervorgerufen etwa durch Verstellen des Widerstandes $R_{st}$, um den Emitterstrom verhältnismäßig stark schwanken zu lassen. Diese Schwankungen wirken sich naturgemäß auf die Zahl der die Basis durchquerenden Defektelektronen aus, d. h., der Kollektorstrom schwankt ebenfalls, und zwar im Rhythmus und proportional der Spannungsänderung im Emitterkreis.

Weil der Widerstand des in Sperrichtung betriebenen Basis-Kollektor-Überganges groß ist, außerdem im Kollektorkreis ein Widerstand $R_a$ liegt, rufen Änderungen des Defektelektronenstromes erhebliche Spannungsschwankungen im Kollektorkreis hervor, die an $R_a$ abgenommen werden können. Wenn aber geringe Spannungsschwankungen im Emitterkreis, zu denen auch Wechselspannungen zu zählen sind, vergrößert im Kollektorkreis auftreten, bedeutet das: Der Transistor verstärkt. Für die grundsätzliche Wirkungsweise ist dabei gleichgültig, ob er die Schichtenfolge *p-n-p* oder *n-p-n* aufweist. Wir brauchen im zweiten Fall lediglich in Bild 80 die Batterieanschlüsse zu vertauschen und uns Elektronen statt Defektelektronen zu denken.

Innerhalb weniger Jahre gelang es, zu den meisten Elektronenröhrenschaltungen „transistorisierte Parallelen" zu finden. Darüber hinaus eröffnete der Transistor neue Möglichkeiten für elektronische Geräte und ihre Baustufen. So ergeben sich z. B. durch die Kombination von *p-n-p*- und *n-p-n*-Transistoren Schaltanordnungen, die mit Röhren nicht ausführbar sind; auch stellte man fest, daß der Transistor nicht nur zur Verstärkung, sondern auch als elektronischer Schalter gut geeignet ist.

Die Stromversorgung des Transistors ist einfacher und ökonomischer als die einer Röhre. Er wird nicht geheizt, ist daher stets betriebsbereit und benötigt nur eine niedrige Betriebsspannung. Erwärmung und Leistungsbedarf bleiben gering, gegen mechanische Erschütterungen ist er unempfindlicher als eine Elektronenröhre mit evakuiertem Kolben und zahlreichen Bauteilen, deren gegenseitige Lage sich nicht verändern darf. Vor allem aber bestechen die geringen Abmessungen von Transistoren und anderen Halbleiterbauelementen: Für die Verkleinerung von Elektronenröhren legen wenige Kubikzenti-

meter die Untergrenze fest; Transistoren in der Größe eines Stecknadelkopfes sind dagegen keine Seltenheit.
Die Summe dieser günstigen Eigenschaften wurde von entscheidender Bedeutung für die moderne Elektronik. Datenerfassungs- und -verarbeitungsanlagen, elektronische Signal-, Steuerungs- und Überwachungseinrichtungen enthalten viele Tausende von Bauelementen. Sie sind nur sinnvoll, wenn diese Bauelemente zuverlässig, energiesparsam funktionieren, lange Lebensdauer haben und sich auf engstem Raum zusammendrängen lassen. Ohne die Halbleitertechnik wären solche Anlagen meistens überhaupt nicht ausführbar. Auch gäbe es keine Mikroelektronik; denn die so zukunftsträchtigen Zweige der Dünnfilm- und Halbleiterblocktechnik, auf die einzugehen wir uns versagen müssen, beruhen letzten Endes auf den Ergebnissen und Erfahrungen, die am Transistor gewonnen wurden.
Die ersten Elektronenröhren entstanden als Einzelfertigung im Labor; ehe es gelang, einwandfreie Röhren in großer Stückzahl zu produzieren, mußten zahlreiche Schwierigkeiten überwunden werden. Beim Transistor war es nicht anders. Die ersten Transistoren waren allerdings keine *Flächentransistoren*, deren Aufbauschema wir in Bild 80 kennenlernten, sondern *Spitzentransistoren*, der Spitzendiode im Aufbau ähnlich, jedoch mit zwei Drahtspitzen (Kollektor und Emitter) statt mit einer. Sie erlangten nur vorübergehend Bedeutung.
Aber auch bei der Produktion von Flächentransistoren waren zahlreiche Probleme zu meistern, angefangen von der Gewinnung des extrem reinen Ausgangsmaterials bis zum Anbringen der Anschlußkontakte oder dem Schutz des fertigen Transistors vor Feuchtigkeit, Staub und anderen Luftverunreinigungen.
Die Entwicklung wurde vor allem unter drei Gesichtspunkten vorangetrieben: Es sollten große Serien datentreuer, zuverlässiger Transistoren produziert werden; die vom Transistor bewältigte elektrische Leistung, die anfänglich kaum nach Milliwatt zählte, mußte gesteigert, die Frequenzgrenze, bis zu der ein Transistor arbeitsfähig blieb, zu immer höheren Frequenzen hin verschoben werden. Zahlreiche Transistoren entstanden, mit denen man sich diesen Zielen Schritt für Schritt

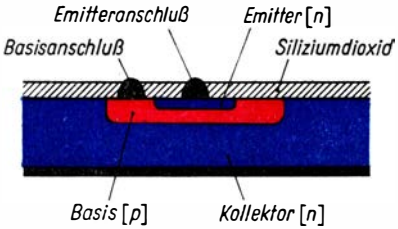



Bild 81 Aufbau eines Planartransistors (schematisch)

näherte: der Legierungstransistor, der Randschichttransistor, der Mesatransistor u. a. Wir können hier nur auf eine der jüngsten und bedeutungsvollsten Entwicklungen eingehen, auf den *Planartransistor* (Bild 81).

Bei seiner Herstellung geht man von einer $n$-leitenden Siliziumscheibe aus, an deren Oberfläche zunächst eine Schicht aus Siliziumdioxid erzeugt wird. Sie ist sehr widerstandsfähig und schützt den Transistor gegen äußere chemische und physikalische Einflüsse, die bei anderen Transistorarten häufig zu mangelhafter Funktion oder zum Versagen geführt hatten. In die Schutzschicht ätzt man ein Fenster und setzt die Scheibe Bordämpfen aus. Boratome diffundieren in das Silizium und bilden die $p$-leitende Basis des Transistors, während das Grundmaterial den Kollektor abgibt. Während des Diffundierens entsteht an der Oberfläche eine neue Siliziumdioxidschicht. Sie schließt das Fenster und schützt die Basis. Um den Emitter zu erhalten, ätzt man erneut ein Fenster, durch das diesmal fünfwertige Atome in das Silizium diffundieren. Auch der Emitter wird durch Siliziumdioxid abgedeckt. Schließlich werden kleine Fenster zur Aufnahme der Anschlüsse von Basis und Emitter angebracht. Alle diese recht komplizierten Arbeitsschritte werden gleichzeitig für mehrere tausend Planartransistoren durchgeführt, die auf einer Siliziumscheibe von wenigen Zentimetern Durchmesser Platz finden. Erst anschließend wird die Scheibe geteilt.

Der Planartransistor arbeitet bis in den Höchstfrequenzbereich und zeichnet sich durch große Zuverlässigkeit und hohe Lebensdauer aus. Eine Weiterentwicklung, der Epitaxialtransistor, hat noch günstigere elektrische Eigenschaften.

Ein sehr aussichtsreiches Transistorbauelement, das nach einem etwas abgewandelten Prinzip arbeitet, ist der Feldeffekttransistor, vor allem als MOS-Feldeffekttransistor (Metall-Oxid-Silizium-Feldeffekttransistor) produziert. Der zu steuernde Strom tritt an einer Elektrode in das Halbleitermaterial, durchfließt in diesem einen „Kanal", der einen anderen Leitfähigkeitstypus als das Grundmaterial aufweist, und verläßt den Halbleiter über eine zweite Elektrode. Der Kanal befindet sich im Wirkungsbereich einer Steuerelektrode. Sie „verdrängt", je nach der an ihr liegenden Spannung, Ladungsträger aus dem Kanal, verändert also gewissermaßen den Kanaldurchmesser. Auf diese Weise kommt die Steuerwirkung zustande.

Die überragende, von Tag zu Tag zunehmende Bedeutung der Halbleitertechnik ist nicht allein der gleichrichtenden Diode und dem verstärkenden Transistor zu verdanken, sondern zahlreichen neuen Forschungsrichtungen, die durch die Beschäftigung mit Halbleitern angeregt wurden und deren Resultate sehr rasch ihren Niederschlag in technischen Anwendungen fanden.

Die Diode z. B. wird, in abgewandelter Ausführung, als *Kapazitätsdiode*, als Varaktor, eingesetzt. Sie verhält sich dann wie ein Kondensator, dessen Kapazität durch Einstellen einer angelegten Gleichspannung veränderbar ist. Das ist nicht nur für zahlreiche Steuerungs- und Regelungsschaltungen nützlich, sondern auch für die Abstimmung von Rundfunk- und Fernsehempfängern. Eine andere Diodenart, die *Z-Diode* (Zenerdiode), hat weite Verbreitung für Schutz- und Stabilisierungsschaltungen gefunden. Die sogenannte *Tunneldiode* wiederum gestattet es, höchste Frequenzen auf einfache Weise zu erzeugen. Die *Fotodiode*, in der Lichtänderungen elektrische Ströme steuern, ist nur eines von mehreren fotoelektrischen Bauelementen, die auf den Leitungsvorgängen in Halbleitern beruhen. Zu ihnen zählen *Fotowiderstände*, die in vielen elektronischen Geräten der Industrie (z. B. in Lichtschranken und Dämmerungsschaltern) zu finden sind, ebenso wie *Fotoelemente*, die vom elektrischen Belichtungsmesser allgemein bekannt sind und in Sonnenbatterien für die Stromversorgung von künstlichen Satelliten und Raumsonden ihre bis heute wichtigste Anwendung gefunden haben. Der *Fototransistor* schließlich ist ein Bauelement, das Lichtänderungen nicht nur in Strom-

schwankungen umsetzt, sondern diese Schwankungen noch zusätzlich verstärkt.

Die unmittelbare Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie, wie sie im Halbleiterthermoelement vor sich geht, wird vorerst in bescheidenem Maße genutzt, z. B. zur Speisung von Funkgeräten oder automatischen Wetterstationen. Schon aber haben vor allem sowjetische Wissenschaftler und Ingenieure nachgewiesen, daß sich durch die Verbindung von Thermoelementen und Kernreaktoren auch größere elektrische Leistungen gewinnen lassen – ein Ergebnis, das deswegen besonders interessant ist, weil der derzeit übliche Weg von der Wärmeenergie bis zur Elektroenergie recht umständlich und verlustreich ist.

Umgekehrt wird der Umgebung Wärmeenergie entzogen, wenn Strom durch Kombinationen aus bestimmten Halbleitermaterialien fließt. *Halbleiterkühlelemente*, die auf diesem Effekt beruhen, existieren seit mehreren Jahren. Sie könnten eines Tages vielleicht die gegenwärtigen aufwendigen Kühlaggregate überflüssig machen.

Für die Steuerung starker Ströme stand zunächst kein Halbleiterbauelement zur Verfügung, das etwa ähnliche Aufgaben wie das Thyratron hätte übernehmen können. Der in den vergangenen Jahren entwickelte *Thyristor* ersetzt das Thyratron nicht nur, er ist ihm auch in wichtigen Eigenschaften überlegen.

Der Thyristor ist ein Silizium-Halbleiterbauelement mit der Schichtenfolge *p-n-p-n*. Der zu steuernde Strom fließt über die äußere *n*- und die äußere *p*-Schicht. Zunächst allerdings sperrt der Thyristor den Stromfluß, und zwar – im Gegensatz zur Diode – in beiden Richtungen. Wird jedoch an die innere *p*-Schicht eine positive Spannung oder ein Spannungsimpuls von wenigen Volt gelegt, läßt der Thyristor in einer Richtung Strom hindurchfließen, ähnlich wie eine Diode. Er arbeitet als Gleichrichter, wobei die Stärke des gleichgerichteten Stromes mittels der inneren *p*-Schicht, der Steuerelektrode, veränderbar ist. Thyristoren können gegenwärtig Ströme von 1000 A und mehr steuern und benötigen nur einen Bruchteil des Raumes früher gebräuchlicher steuerbarer Gleichrichter.

## Wechselstrom und Drehstrom

### Entstehung und Kenngrößen des Wechselstromes

Wir haben den Wechselstrom und seine Bedeutung für die Elektrotechnik bereits mehrfach erwähnt. Wir wollen nunmehr seine Eigenschaften und seine Gesetzmäßigkeiten näher kennenlernen.

In einer Drahtschleife wird eine elektrische Spannung induziert, wenn man die Schleife in einem Magnetfeld so bewegt, daß sich die Zahl der von der Schleife umfaßten Feldlinien ändert. Das ist auch dann der Fall, wenn die Schleife im Magnetfeld rotiert.

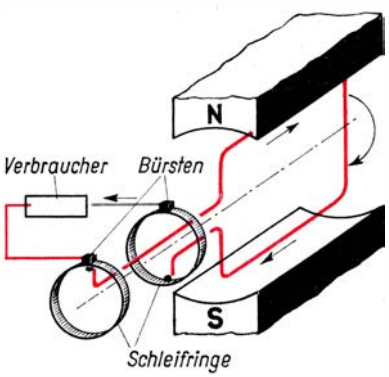



Bild 82 Drehbare Schleife im Magnetfeld; Grundform des Wechselspannungsgenerators

In der Versuchsanordnung nach Bild 82 wird eine Schleife gleichmäßig schnell in einem homogenen Magnetfeld gedreht. Ihre Enden sind an *Schleifringe* geführt. Auf ihnen gleiten metallische *Bürsten*, die mit einem Stromverbraucher verbunden werden.

Beim Drehen der Schleife entsteht eine Induktionsspannung, die durch den Verbraucher Strom fließen läßt. Seine Richtung

ergibt sich mit Hilfe der Generatorregel. In der gezeichneten Stellung der Schleife fließt im oberen Leiterstück, das sich nach rechts bewegt, der Strom nach hinten, im unteren Leiterstück, das sich nach links bewegt, nach vorn. Die induzierten Spannungen in den beiden Leiterstücken sind also so gerichtet, daß sie sich addieren.

Die induzierte Spannung hängt davon ab, wie schnell sich die Zahl der umschlossenen Feldlinien ändert. Diese Zahl ändert sich nicht, wenn die Schleife eine Stellung senkrecht zu den Feldlinien durchläuft. In diesem Augenblick wird daher keine Spannung induziert. Die Änderungsgeschwindigkeit ist am größten, wenn die Schleife eine Stellung parallel zu den Feldlinien durchläuft. In diesem Augenblick wird die größte Spannung induziert.

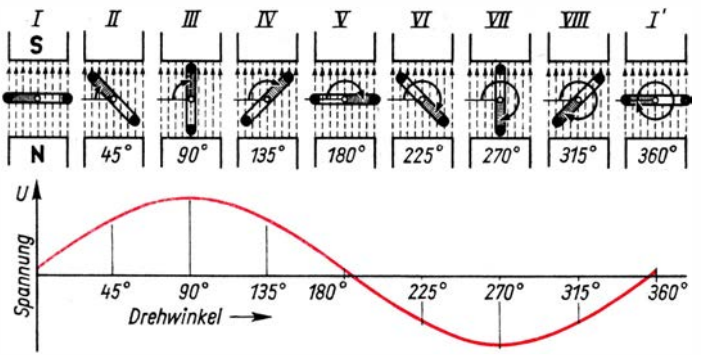



Bild 83 Das Entstehen der Wechselspannungskurve

Bei der Schleifenstellung parallel zu den Magnetpolen geht außerdem die Linksbewegung der Leiterstücke in eine Rechtsbewegung über und umgekehrt. Das bedeutet, daß die Spannung jedesmal beim Durchlaufen der „neutralen Zone" ihr Vorzeichen wechselt.

Untersucht man die Spannung in Abhängigkeit vom Drehwinkel, so ergibt sich die aus der Mathematik und von vielen Schwingungsvorgängen her bekannte Sinuskurve. Sie ist in Bild 83 mit eingezeichnet.

Eine 360°-Drehung der Schleife erzeugt eine vollständige Spannungswelle (bzw. Stromwelle). In der ersten „Halbwelle" – sie entspricht der 180°-Drehung von neutraler Zone zu neutraler Zone – steigt die Spannung von Null auf einen Maximalwert und sinkt stetig wieder bis Null. Während der zweiten Halbwelle – sie entspricht der folgenden 180°-Drehung – wiederholt sich dieser Spannungsverlauf, allerdings mit umgekehrter Spannungs- bzw. Stromrichtung.
Eine Folge solcher Wellen nennen wir Wechselstrom, die einzelne Welle heißt *Periode*. Die Zahl der Perioden, die in der Zeiteinheit – also in einer Sekunde – ablaufen, ist die *Frequenz* ($f$) des Wechselstromes. Nennt man die für den Ablauf einer Periode notwendige Zeit $T$, so gilt die Beziehung:

$$\boxed{T = \frac{1}{f}} \qquad \text{bzw.} \qquad \boxed{f = \frac{1}{T}}$$

Einheit der Frequenz ist das *Hertz* (Hz), genannt nach dem deutschen Physiker *Heinrich Hertz* (1857 bis 1894). Als größere Einheiten sind üblich:

1 Kilohertz (kHz) = 1000 Hz = $10^3$ Hz

1 Megahertz (MHz) = 1000000 Hz = $10^6$ Hz

1 Gigahertz (GHz) = 1000000000 Hz = $10^9$ Hz

Als Einheitengleichung erhalten wir:

$$1\ \text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$$

Der Netzwechselstrom hat in den meisten Ländern eine Frequenz von 50 Hz bzw. 60 Hz. Das bedeutet demnach, daß Strom und Spannung in jeder Sekunde 50 bzw. 60 Perioden durchlaufen.
Stromstärke und Spannung eines Wechselstromes werden selbstverständlich in Ampere bzw. Volt gemessen. Dabei erhebt sich sofort die Frage, was man als Stromstärke bzw. als Spannung angeben soll; denn im Gegensatz zu einem Gleichstrom ändern sich Stromstärke und Spannung hier fortwährend.
Zunächst ist klar, daß den Spannungs- und Strommaxima, den *Scheitelwerten*, eine besondere Bedeutung zukommt. Man kenn-

zeichnet die Scheitelwerte durch $\hat{u}$ bzw. $\hat{i}$. Für praktische Zwecke sind jedoch die Scheitelwerte als Kenngrößen des Wechselstromes oft nicht unmittelbar geeignet.

Würden wir zum Beispiel ein Elektrowärmegerät, etwa einen Tauchsieder, nacheinander von Gleichstrom der Stärke 2 A und von Wechselstrom mit dem Scheitelwert 2 A durchfließen lassen, so wäre leicht festzustellen, daß durch den Wechselstrom eine geringere Wärmemenge entwickelt wird als durch den Gleichstrom. Das ist leicht erklärlich: Während der Gleichstrom ständig in unveränderter Stärke fließt, erreicht die Stärke des Wechselstromes nur für einen unendlich kurzen Zeitabschnitt ihren Scheitelwert; während der gesamten übrigen Zeit ist sie geringer.

Man kann aber zur Festlegung einer *effektiven Stromstärke* kommen, indem man die Stärke des Wechselstromes mit der Stärke eines Gleichstromes vergleicht, der dieselbe Wirkung hervorbringt. Bezeichnen wir die *effektive Stromstärke* (d. h. die Stärke des gleichwertigen Gleichstromes) mit $I$, so gilt die Beziehung:

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \cdot \hat{i}$$

Aus entsprechenden Überlegungen erhalten wir für die Spannung:

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \cdot \hat{u}$$

In der Technik wird meistens die Effektivspannung bzw. -stromstärke angegeben. So bedeutet die Netzspannung von 220 V, daß die effektive Spannung im Lichtnetz 220 V beträgt. Es ist aber oft nötig, auch die Scheitelspannung zu berücksichtigen. Sie kann beispielsweise eine Rolle bei der Bemessung von Isolationen spielen. Man erhält sie aus der Effektivspannung durch Umstellen der Formel:

$$\hat{u} = \frac{U}{0{,}707}$$

Die Scheitelspannung des 220-V-Wechselstromnetzes beträgt somit:

$$\hat{u} = \frac{220\,\text{V}}{0{,}707}$$

$$= 311\,\text{V}$$

Für die Stromstärke gilt entsprechend:

$$\hat{i} = \frac{I}{0{,}707}$$

**Induktivität und Kapazität im Wechselstromkreis**

Wir lernten das Ohmsche Gesetz als eine der wichtigsten Grundbeziehungen der Elektrotechnik kennen. Läßt sich dieses Gesetz auch ohne weiteres auf Stromkreise anwenden, in denen Wechselstrom fließt?

Schließen wir versuchsweise Glühlampen, Bügeleisen oder andere Elektrowärmegeräte nacheinander an Gleichstrom und an Wechselstrom gleicher effektiver Spannung an, so ist leicht festzustellen, daß sich die effektive Stromstärke einstellt, die wir nach dem Ohmschen Gesetz zu erwarten haben. Der wirksame Widerstand und die Funktion dieser Geräte sind unabhängig davon, ob sie mit Gleich- oder Wechselstrom gespeist werden.

Ganz andere Resultate erhalten wir, wenn wir entsprechende Versuche mit einer Spule anstellen, die viele Drahtwindungen und einen Eisenkern enthält. Berechnen wir den Widerstand dieser Spule aus der Drahtlänge, dem Drahtquerschnitt und dem Drahtmaterial und schließen wir die Spule zunächst an eine Gleichspannungsquelle an, fließt ein Strom, der sich in Übereinstimmung mit dem Ohmschen Gesetz befindet.

Verbinden wir die Spule anschließend mit einer Wechselspannungsquelle gleicher effektiver Spannung, so sinkt die Stromstärke erheblich. Sie schwankt überdies, wenn wir den Eisenkern in die Spule einführen oder aus ihr entfernen.

Offenbar ist zu dem bei Gleichstrom in Erscheinung tretenden, aus den Drahtdaten berechenbaren *Wirkwiderstand* bei

Wechselstrom noch ein zusätzlicher Widerstand getreten. Man nennt ihn *induktiven Widerstand* ($X_L$) oder auch Blindwiderstand.

Diese Namensgebung weist bereits auf die Ursache des induktiven Widerstandes hin. Er wird durch die Selbstinduktion hervorgerufen. Die Lenzsche Regel besagt, daß die Selbstinduktionsspannung ihrer Ursache stets entgegengerichtet ist. Bei der wechselstromgespeisten Spule ist diese Ursache aber nicht auf einen einmaligen Aus- oder Einschaltvorgang beschränkt. Dem Wechselstrom entsprechend ändert sich das magnetische Kraftfeld fortwährend. Es entsteht eine ständige Gegenspannung – auch sie ist selbstverständlich eine Wechselspannung –, die den Stromfluß behindert und damit wie ein zusätzlicher Widerstand wirkt.

Der induktive Widerstand hängt zunächst von den Eigenschaften der Spule ab. Diese Eigenschaften, soweit sie für die Selbstinduktionswirkungen bestimmend sind, haben wir bereits unter dem Begriff der Induktivität (vgl. S. 129) zusammengefaßt. Je größer die Induktivität einer Spule ist, desto größer ist für einen gegebenen Wechselstrom auch ihr induktiver Widerstand.

Die Selbstinduktionswirkungen hängen aber, wie alle Induktionswirkungen, auch davon ab, mit welcher Geschwindigkeit sich die Zahl der umfaßten Feldlinien ändert. In unserem Fall bedeutet das: Gegenspannung und induktiver Widerstand wachsen mit der Frequenz des Wechselstromes.

Unter Berücksichtigung der Induktivität $L$ und der Frequenz $f$ erhalten wir für den induktiven Widerstand einer Spule den Ausdruck:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Als Maßeinheit ergibt sich, da $f$ in $s^{-1}$ und $L$ in $H = \frac{Vs}{A}$ gemessen wird:

$$\frac{1}{s} \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Auch der induktive Widerstand wird also in Ohm gemessen.

*Beispiel:* Betrachten wir eine Eisenkernspule mit einer Induktivität von 5 H. Bei Netzfrequenz beträgt der induktive Widerstand dieser Spule:

$$X_L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50\ \mathrm{s^{-1}} \cdot 5\ \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}}$$

$$= 1570\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = 1570\ \Omega$$

Erhöhen wir die Frequenz auf 1000 Hz, so beträgt der Widerstand bereits:

$$X_L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 1000\ \mathrm{s^{-1}} \cdot 5\ \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}}$$

$$= 31\,400\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = 31\,400\ \Omega$$

Es kommt häufig vor, daß Spulen nur einen sehr geringen Wirkwiderstand aufweisen, während gleichzeitig ihr induktiver Widerstand sehr hohe Werte erreicht.

Verbinden wir eine Wechselspannungsquelle mit einem Verbraucher, der keinen induktiven, sondern nur „Ohmschen" Widerstand hat, so treten die Maximalwerte und die Nulldurchgänge von Spannung und Stromstärke stets gleichzeitig ein. Man sagt in diesem Fall, Spannung und Stromstärke seien „in Phase". Schließen wir dagegen eine Spule mit induktivem

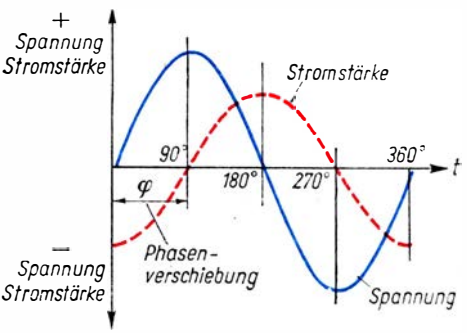



Bild 84 Phasenverschiebung durch einen induktiven Widerstand

Widerstand an, zeigt es sich, daß keine Phasengleichheit mehr besteht. Die Stromstärke erreicht ihr Maximum erst später als die Spannung. Spannungs- und Stromstärkekurve sind gegeneinander verschoben. Diese Verschiebung entspricht, wie Bild 84 deutlich macht, einem bestimmten Drehwinkel der die Wechselspannung erzeugenden Leiterschleife. Man drückt daher die *Phasenverschiebung* in Winkelgraden aus.

Bei einer „reinen" Induktivität, das heißt bei einer Induktivität, die nur Blindwiderstand, aber keinen Wirkwiderstand aufweist, beträgt die Phasenverschiebung 90 °. Das heißt, die Stromstärke eilt der Spannung um eine Vierteldrehung der Leiterschleife nach. In der Praxis ist der Winkel allerdings stets kleiner, da eine Spule ohne Wirkwiderstand nicht zu konstruieren ist.

Die Phasenverschiebung ist demnach eine Folge der Selbstinduktionswirkung; denn die in der Spule entstehende Gegenspannung „verzögert" den Stromfluß.

Induktiver Widerstand und Phasenverschiebung sind, wie wir bald erkennen werden, für die Elektrotechnik und für die Energiewirtschaft sehr wichtig, zumal in vielen elektrischen Geräten, in Motoren, Generatoren, Transformatoren, Elektromagneten usw., Spulen mit erheblicher Induktivität zu finden sind.

Auch ein Kondensator zeigt ein ganz verschiedenes Verhalten, je nachdem, ob man ihn in einen Gleichstrom- oder in einen Wechselstromkreis schaltet.

Verbinden wir die Platten eines Kondensators mit einer Gleichspannungsquelle, so ist nach dem Einschalten ein kurzer Stromstoß zu beobachten. Er erklärt sich daraus, daß durch die Spannungsquelle Elektronen von der einen Kondensatorplatte abgezogen und auf die andere gedrückt werden. Der Kondensator lädt sich auf. Ist er geladen, so ist (von gewissen Verlustströmen abgesehen) kein Stromfluß mehr festzustellen. Der Kondensator hat für Gleichstrom den Widerstand „unendlich".

Klemmen wir dagegen den Kondensator an eine Wechselspannungsquelle, fließt in seinen Anschlußdrähten dauernd Strom. Der Kondensator, der Gleichstrom absperrt, stellt für Wechselstrom nur einen Widerstand dar.

Schließen wir eine Wechselspannungsquelle an, wird der Kondensator dauernd umgeladen, seine Platten wechseln ihre

Polarität mit der Frequenz der Wechselspannung. Infolgedessen pendeln ständig Elektronen in den Anschlußdrähten. Das aber ist ein Wechselstrom, und es spielt keine Rolle, daß der Leiterkreis in Wirklichkeit an einer Stelle durch das Dielektrikum unterbrochen ist.

Wovon hängt nun der *kapazitive Widerstand* eines Kondensators ab? Bei gegebener Spannungsquelle ist dieser Widerstand offenbar um so geringer, je größer die im Wechselstromkreis fließende Stromstärke ist, das heißt, je mehr Elektronen in der Zeiteinheit hin- und herwandern. Diese Zahl vergrößert sich, wenn die Kapazität des Kondensators steigt; denn größere Kapazität bedeutet ja „Platz" für eine größere Ladungsmenge (vgl. S. 79). Erhöht man die Frequenz der Wechselspannungsquelle, erfolgt die Hin- und Herbewegung rascher. Auch das kommt der Bewegung einer größeren Elektrizitätsmenge gleich. Der kapazitive Widerstand eines Kondensators sinkt daher mit wachsender Kapazität und wachsender Frequenz der angelegten Wechselspannung. Als Formel geschrieben:

$$\boxed{X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}}$$

Für die Einheit erhalten wir wieder, da $f$ in $s^{-1}$ und $C$ in F, d. h. in $\frac{As}{V}$ gemessen wird:

$$\frac{1}{s^{-1} \cdot \frac{As}{V}} = \frac{V}{A} = \Omega$$

*Beispiel:* Welchen Widerstand hat ein Kondensator von 10 µF bei der Netzfrequenz von 50 Hz?

Es ist:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50\ s^{-1} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \frac{As}{V}}$$

$$= \frac{10^6}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 10} \frac{V}{A}$$

$$= 319\ \Omega$$

Bei einer Frequenz von 1000 Hz dagegen beträgt der kapazitive Widerstand des gleichen Kondensators nur noch:

$$X_C = \frac{10^6}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1000 \cdot 10}\,\frac{\text{V}}{\text{A}}$$
$$= 16\,\Omega$$

Ähnlich wie am induktiven Widerstand tritt auch am kapazitiven Widerstand eine Phasenverschiebung auf. Allerdings eilt diesmal die Spannung am Kondensator der Stromstärke nach. Das erklärt sich folgendermaßen: Beginnt in dem ungeladenen Kondensator Strom zu fließen, so ist an den Platten im ersten Augenblick noch keine Spannung vorhanden. Die Spannung der Spannungsquelle kann sich voll auswirken und „treibt" einen sehr kräftigen Strom in den Kondensator. Mit zunehmender Ladung steigt die Spannung am Kondensator, während die Stromstärke sinkt; denn jetzt wird die Spannung der Spannungsquelle teilweise durch die bereits am Kondensator vorhandene Spannung kompensiert. Ist endlich der Kondensator geladen, fließt überhaupt kein Ladestrom mehr; gleichzeitig aber hat die Spannung am Kondensator ihren Höchstwert erreicht. Im Wechselstromkreis wiederholt sich dieses Spiel fortwährend.

In einem Wechselstromkreis, der nur eine Kapazität und sonst weder Wirkwiderstand noch induktiven Widerstand aufwiese, betrüge die Phasenverschiebung wieder 90 °, allerdings diesmal mit „voreilendem" Strom. Da in Wirklichkeit jeder Wechselstromkreis auch Wirkwiderstände enthält, stellt sich ein Phasenverschiebungswinkel zwischen 0 ° und 90 ° ein.

Wegen des geringen kapazitiven Widerstandes bei hohen Frequenzen spielen Kondensatoren oder kondensatorähnliche Anordnungen besonders dort eine Rolle, wo solche hohen Frequenzen auftreten. So kann in der Hochfrequenztechnik bereits die zwischen parallellaufenden Drähten auftretende Kapazität sehr störend in Erscheinung treten. Bei Wechselströmen von Netzfrequenz machen sich die Kapazitäten bei langen Kabeln oder auch Freileitungen gleichfalls unangenehm bemerkbar.

Induktiver und kapazitiver Widerstand verhalten sich im Hinblick auf die Phasenverschiebung einander entgegengesetzt. Daher ist es möglich, die Phasenverschiebung durch Zusammenschalten eines induktiven und eines kapazitiven Widerstandes zu kompensieren, indem man die „kompensierende" Induktivität bzw. Kapazität entsprechend bemißt. Allerdings tritt die Aufhebung der Phasenverschiebung bei gegebener Induktivität und Kapazität jeweils nur für eine bestimmte Frequenz ein.

### Leistung, Leistungsfaktor und Arbeit im Wechselstromkreis

Die Leistung an einem Gleichstromverbraucher ergab sich als Produkt aus Spannung und Stromstärke, die Arbeit als Produkt aus Leistung und Zeit (vgl. S. 30). Bei Wechselstrom ist in den meisten Fällen eine derart einfache Berechnung nicht möglich.

Enthält ein Wechselstromkreis als Verbraucher nur Wirkwiderstände, aber keine induktiven oder kapazitiven Widerstände, dann errechnet sich die Leistung in gewohnter Weise als Produkt von effektiver Spannung und effektiver Stromstärke, wie sie von Volt- und Amperemeter angezeigt werden. Es ist:

$$P = U \cdot I$$

Für die Arbeit gilt wieder:

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

Wir können für diesen Fall die *Leistungskurve* zeichnen. Wir erhalten ihre einzelnen Punkte, indem wir zusammengehörige Spannungs- und Stromwerte miteinander multiplizieren. Die Leistung ist in jedem Fall positiv. Das erklärt sich daraus, daß Spannung und Strom stets gleichgerichtet sind, ihre Multiplikation stets einen positiven Wert ergibt. In der Zeichnung kommt das dadurch zum Ausdruck, daß die Kurve stets über der Zeitachse liegt.

Im allgemeinen finden wir in einem Wechselstromkreis aber neben den Wirkwiderständen noch induktive und oft auch kapazitive Blindwiderstände. Vergleichen wir in einem solchen Kreis die tatsächliche *Wirkleistung* – die etwa als mechanische

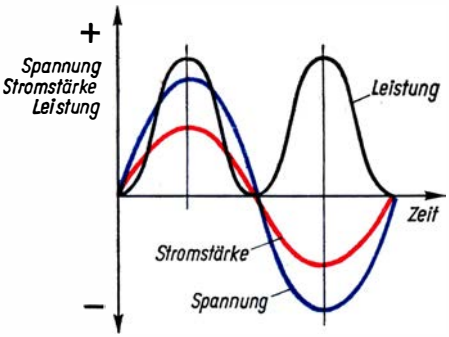



Bild 85
Leistungskurve bei Phasengleichheit von Spannung und Strom

Leistung verfügbar gemacht werden kann – mit der Leistung, die wir erhalten, wenn wir die von einem Spannungs- und einem Strommesser angezeigten Werte multiplizieren, so ergibt die Multiplikation der Instrumentenwerte stets eine größere Leistung als die Wirkleistung. Der Unterschied zwischen der angezeigten *Scheinleistung* und der nutzbaren Wirkleistung kommt dadurch zustande, daß nunmehr Strom und Spannung nicht ständig gleichgerichtet sind. Bei der Multiplikation von Strom und Spannung erhalten wir jetzt auch negative Werte.

Das geht auch aus der Leistungskurve (Bild 86) hervor, die für „nacheilenden" Strom (was der Praxis weitgehend entspricht) konstruiert wurde: Die Kurve verläuft stückweise unterhalb der Zeitachse, was einer „negativen" Leistung entspricht.

Man kann diese negative Leistung nur so deuten, daß nunmehr der Stromverbraucher Leistung an die Spannungsquelle „zurückgibt". Man nennt diese Leistung *Blindleistung.*

Die Blindleistung pendelt dauernd zwischen dem Stromverbraucher und der Spannungsquelle hin und her. Sie tritt nach außen nicht in Erscheinung und trägt nicht zur Nutzwirkung des Stromes bei. Mit der Blindleistung wird das Magnetfeld der in den Stromkreis geschalteten Spulen (bzw. das elektrische Feld der Kapazitäten) aufgebaut. Beim Verschwinden gibt das Spulen- bzw. Kondensatorfeld die in ihm gespeicherte Energie zurück.

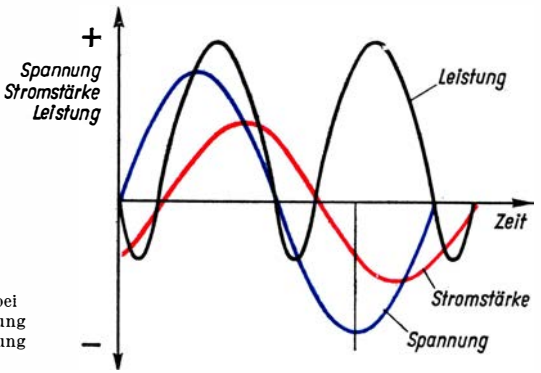



Bild 86
Leistungskurve bei Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom

Wir haben es also in einem Wechselstromkreis mit drei Leistungsgrößen zu tun:
Die *Scheinleistung* ($P_s$) erhalten wir durch Multiplizieren der effektiven Spannung mit der effektiven Stromstärke. Diese Scheinleistung messen wir in „Voltampere" (VA) bzw. „Kilovoltampere" (kVA).
Die Leistung, die tatsächlich in Nutzleistung umgesetzt wird, heißt *Wirkleistung* ($P_w$). Sie wird, wie die Gleichstromleistung, in W bzw. in kW oder MW ausgedrückt.
Die *Blindleistung* ($P_b$) endlich ist jener Leistungsanteil, der ständig zwischen Stromerzeuger und -verbraucher hin- und herpendelt. Wir messen sie in „Voltampere reaktiv" (var). Häufig steht dafür noch die ältere Bezeichnung „Blindwatt" (bW).
Den Leistungsverhältnissen entsprechend müssen wir uns den Effektivstrom in zwei Anteile zerlegt denken, in den *Wirkstrom* ($I_w$), der tatsächlich nutzbare Arbeit verrichtet, und in den *Blindstrom* ($I_b$), der durch den Auf- und Abbau der magnetischen bzw. elektrischen Felder hervorgerufen wird.
Der Gesamtstrom ist aber nicht einfach die algebraische Summe zwischen Blind- und Wirkstrom. Es ist zu bedenken, daß bei allen diesen Vorgängen die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung eine ausschlaggebende Rolle spielt. Wir können uns vorstellen, daß der Gesamtstrom in zwei Komponenten zerfällt. Die eine, der Wirkstrom, hat die gleiche Richtung wie

die effektive Spannung, ist also mit dieser phasengleich. Die andere, der Blindstrom, ist gegen den Wirkstrom um 90° phasenverschoben.

Um die Wirk- und Blindstromanteile zu ermitteln, bedient man sich eines Verfahrens, wie es in der Mechanik zur Zerlegung von Kräften in Komponenten benutzt wird. Seine mathematische Grundlage ist die für die Physik unentbehrliche Vektorrechnung.

Man zeichnet zunächst die Spannung als „Zeiger", das heißt als Pfeil, dessen Länge der effektiven Spannung entspricht. Im Anfangspunkt des Spannungspfeils wird der Pfeil der effektiven Stromstärke angetragen, und zwar unter einem Winkel $\varphi$, der der Phasenverschiebung zwischen Effektivspannung und Effektivstrom entspricht. Dann ist der Wirkstrom die Projektion des Stromstärkepfeils auf die Richtung der Spannung, der Blindstrom gleich der Projektion des Stromstärkepfeils auf eine zum Wirkstrom senkrechte Richtung.

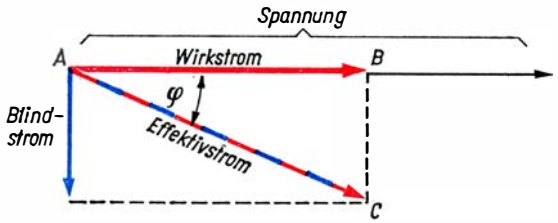



Bild 87 Grafische Ermittlung des Wirk- und Blindstroms

Der effektive Strom ergibt sich also aus der geometrischen Addition von Wirkstrom und Blindstrom. Es gilt die durch den Lehrsatz des *Pythagoras* gegebene Beziehung:

$$I^2 = I_w^2 + I_b^2$$

Außerdem zeigt das Dreieck, daß der Blindstromanteil um so größer wird, je größer der Phasenverschiebungswinkel $\varphi$ ist.

Zwei Grenzfälle, die praktisch allerdings nur annähernd zu verwirklichen sind, ergeben sich für die Phasenwinkel von 0° und 90°.

Bei fehlender Phasenverschiebung, das heißt bei $\varphi = 0°$, entfällt der Blindstrom. Wirkstrom und Effektivstrom sind gleich. Das ist der Fall, wenn im Stromkreis nur kapazitäts- und induktivitätsfreie Widerstände liegen.

Bei einer Phasenverschiebung von 90° (rein induktive bzw. kapazitive Widerstände) gibt es überhaupt keinen Wirkstrom und auch keine Wirkleistung. Es fließt in diesem Fall nur Blindstrom; der Stromkreis gibt keine Energie nach außen ab.

Mit Hilfe des Phasenverschiebungswinkels ist es leicht möglich, Wirk- und Blindstrom aus dem Effektivstrom zu errechnen. Auf Grund einfacher trigonometrischer Beziehung ergibt sich für das Dreieck $ABC$ in Bild 87:

$$\cos \varphi = \frac{I_w}{I} \qquad I_w = I \cdot \cos \varphi$$

$$\sin \varphi = \frac{I_b}{I} \qquad I_b = I \cdot \sin \varphi$$

Besonders wichtig für den Elektrotechniker ist der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels. Deshalb haben wir wichtige Kosinuswerte, die in der Praxis Tabellen entnommen oder mit dem Rechenstab ermittelt werden, hier noch einmal wiedergegeben:

| $\varphi$ | $\cos \varphi$ |
|---|---|
| 0° | 1,0000 |
| 10° | 0,9848 |
| 20° | 0,9397 |
| 30° | 0,8660 |
| 40° | 0,7660 |
| 50° | 0,6428 |
| 60° | 0,5000 |
| 70° | 0,3420 |
| 80° | 0,1736 |
| 90° | 0,0000 |

*Beispiel:* In der Zuleitung eines Motors wird ein Strom von 20 A gemessen. Wie groß ist bei einem Phasenverschiebungswinkel von 20 ° der Wirkstrom?

$$\begin{aligned} I_w &= I \cdot \cos \varphi \\ &= 20\ \text{A} \cdot 0{,}9397 \\ &= 18{,}79\ \text{A} \end{aligned}$$

Die Wirkleistung $P_w$ ist nun offensichtlich das Produkt aus effektiver Spannung und Wirkstrom. Damit können wir die Leistungsformel niederschreiben:

$$\boxed{P_w = U \cdot I \cos \varphi}$$

Wir müssen also die Scheinleistung $P_s$, die durch das Produkt $U \cdot I$ bestimmt ist, noch mit dem Kosinus des Phasenverschiebungswinkels multiplizieren, um auf die Wirkleistung zu kommen. Für die Arbeit gilt entsprechend:

$$\boxed{W = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot t}$$

Der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels gibt an, mit welchem Zahlenwert wir die Scheinleistung multiplizieren müssen, um auf die Wirkleistung zu kommen. Daher heißt der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels auch „Leistungsfaktor".

*Beispiel:* Wie groß sind Schein- und Wirkleistung des Motors aus dem vorangegangenen Beispiel, wenn seine Betriebsspannung 220 V beträgt?

$$\begin{aligned} P_s &= U \cdot I \\ &= 220\ \text{V} \cdot 20\ \text{A} \\ &= 4400\ \text{VA} \\ &= 4{,}4\ \text{kVA} \\ P_w &= 220\ \text{V} \cdot 20\ \text{A} \cdot 0{,}9397 \\ &= 4135\ \text{W} \\ &= 4{,}135\ \text{kW} \end{aligned}$$

Da wir weiter oben bereits den Wirkstrom für sich berechnet haben, können wir zur Probe Wirkstrom und Spannung miteinander multiplizieren. Wir erhalten das gleiche Resultat.

Stets ist die Scheinleistung größer als die Wirkleistung, der in den Leitungen fließende Strom größer als der Wirkstrom. Das Verhältnis zwischen Wirkleistung und Scheinleistung ist um so besser, je näher der Leistungsfaktor dem Wert 1 kommt. Unsere Tabelle zeigt, daß das – wie wir bereits aus Bild 87 wissen – besonders bei kleinen Phasenverschiebungen der Fall ist. Bei gleicher Scheinleistung eines Generators oder eines Kraftwerkes wird die verfügbare Wirkleistung um so größer, je „besser" der Leistungsfaktor ist. Umgekehrt braucht man zur Erzielung einer bestimmten Wirkleistung eine um so geringere Scheinleistung bereitzustellen, je günstiger der Leistungsfaktor ist. Ein Leistungsfaktor nahe 1 ($\varphi \approx 0°$) trägt daher wesentlich zur Verbilligung der Energieversorgungssysteme und zur Erhöhung ihrer Wirtschaftlichkeit bei.
Da Induktivitäten und Blindströme nicht zu vermeiden sind, verbessert man den Leistungsfaktor durch besondere Kunstgriffe. Man kann beispielsweise parallel zum Stromverbraucher einen entsprechend bemessenen Kondensator schalten, der die Phasenverschiebung ganz oder teilweise kompensiert. Andere Möglichkeiten werden wir noch kennenlernen (vgl. S. 201).

**Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom)**

Um eine Wechselspannung zu erzeugen, haben wir bisher eine Leiterschleife – die selbstverständlich auch durch eine Spule ersetzt werden kann – im Feld eines Magneten rotieren lassen. Man kann jedoch auch umgekehrt verfahren: Eine Wechselspannung entsteht ebenso, wenn man einen Magneten vor einer Spule rotieren läßt. Das hat sogar den Vorteil, daß man den von der induzierten Spannung hervorgerufenen Strom nicht über Schleifringe fließen lassen muß.
Was geschieht nun, wenn wir statt einer Spule deren drei wählen, die gleichmäßig auf dem Kreisumfang verteilt sind? Jetzt werden in jeder Spule Spannungen induziert. Sie sind,

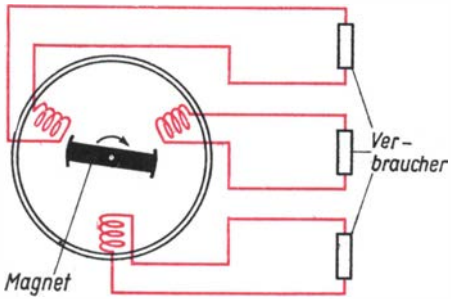



Bild 88 Entstehung von Dreiphasenstrom

gleiche Spulen vorausgesetzt, gleich groß. Sollen diese Spannungen Ströme durch Verbraucher fließen lassen, brauchen wir insgesamt sechs Leitungen.

Zwischen den Spannungen, die in den drei Spulen induziert werden, besteht ein Zusammenhang. Die einzelnen *Phasenspannungen* sind, bedingt durch die Anordnung der Spulen und durch die gleichmäßige Rotation des Magneten, gegeneinander um 120° phasenverschoben. Bild 89 gibt den Verlauf der Spannungen bzw. der Ströme wieder.

Addieren wir unter Beachtung der jeweiligen Stromrichtung die Spannungen oder Ströme der einzelnen Phasen in einem beliebigen Zeitpunkt, erhalten wir ein bemerkenswertes Resultat: Die Summe der Spannungen und Ströme ist, gleiche Belastung der einzelnen Phasen vorausgesetzt, in jedem Augenblick Null. Deshalb darf man die drei Spulen miteinander verbinden, ohne einen Kurzschluß befürchten zu müssen.

Man kann daher drei Stromverbraucher so anschließen, wie Bild 90 es darstellt. Statt sechs Leitungen finden wir drei *Außenleiter*, die von den Spulenanfängen aus gespeist werden. Zur Stromrückführung dient ein gemeinsamer *Mittelpunktleiter*, der mit den Spulenenden verbunden wird.

Nehmen die drei Stromverbraucher gleich viel Energie auf, heben sich die Ströme im Mittelpunktleiter auf, er bleibt stromlos. Man kann ihn weglassen. Sind die drei Phasen ungleichmäßig belastet, fließt im Mittelpunktleiter nur ein verhältnismäßig schwacher Ausgleichstrom.

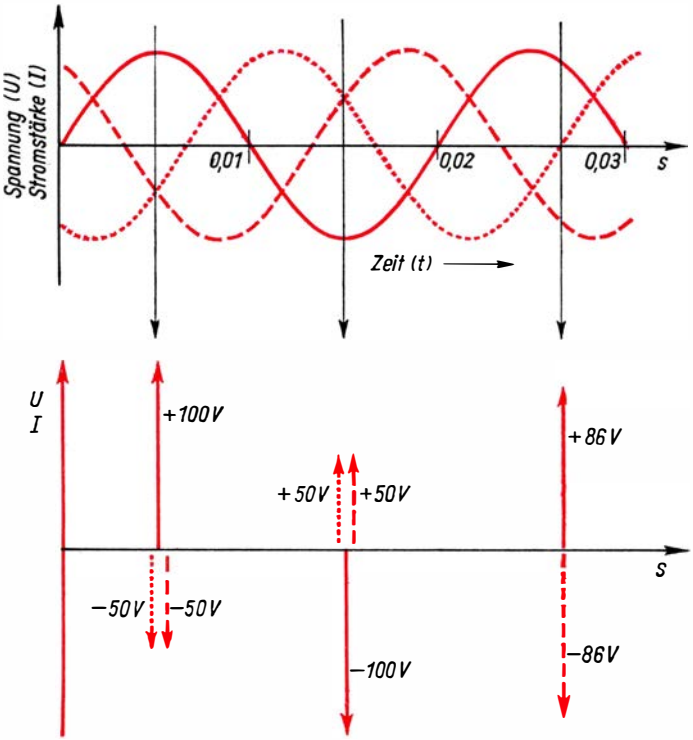



Bild 89 Die Summe der drei Phasenspannungen und Phasenströme ist in jedem Augenblick gleich Null

Wir haben also drei Wechselströme, die nicht mehr voneinander unabhängig sind. Man spricht in diesem Fall von einem *verketteten Dreiphasenwechselstrom.*

Die beschriebene Schaltung heißt *Sternschaltung.* Wir können ihr zwei verschiedene Spannungen entnehmen: Zwischen dem Mittelpunktleiter und je einem Außenleiter steht die Sternspannung zur Verfügung. Es ist die Spannung, die in jeweils einer Spule des Generators (einem „Strang") induziert wird.

Man kann aber auch zwischen je zwei Außenleitern Spannung abnehmen. An ihrem Zustandekommen sind jeweils zwei Spulen

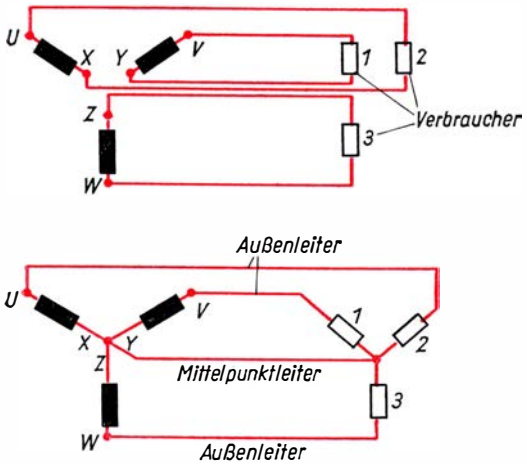



Bild 90 Die Sternschaltung (XYZ: Spulenenden, UVW: Spulenanfänge)

(zwei „Stränge") beteiligt, die hintereinandergeschaltet sind. Die *Leiterspannung* ergibt sich aber nicht als algebraische Summe der Spannungen an den einzelnen Spulen. Die Spannungen müssen geometrisch addiert werden, da die Magnetpole Zeit benötigen, um von einer Spule zur nächsten zu laufen. Bezeichnen wir die Sternspannung mit $U$, die Leiterspannung mit $U_L$, so ist:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U = 1{,}73 \cdot U$$

*Beispiel:* Beträgt die Sternspannung 220 V, so erhalten wir als Leiterspannung:

$$U_L = 1{,}73 \cdot 220\ \text{V}$$
$$= 380\ \text{V}$$

Mit dieser Beziehung findet die in zahlreichen Energieverteilungsnetzen übliche Spannungsangabe „220/380 V" ihre Erklärung.

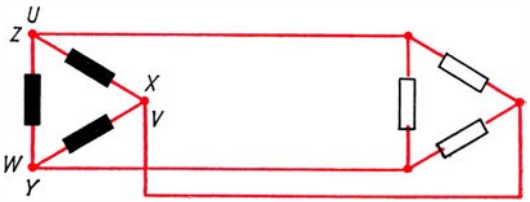



Bild 91 Dreieckschaltung

Es gibt noch eine zweite Schaltungsmöglichkeit. Es ist die Dreieckschaltung, bei der jeweils ein Spulenende mit dem Anfang der nächsten Spule verbunden wird. In diesem Falle kann Spannung jeweils nur zwischen Anfang und Ende einer Spule abgenommen werden; es steht also nur eine Spannung zur Verfügung, die der in der jeweiligen Spule induzierten Spannung entspricht.

Die *Leiterstromstärke* dagegen ist größer als die Stärke des durch eine Spule fließenden Stromes $I$; denn jeder Spule sind ja hier die beiden anderen als Reihenschaltung parallelgeschaltet. Aus der geometrischen Addition der Stromstärken folgt:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I$$
$$= 1{,}73 \cdot I$$

Wir erkennen bereits einen wesentlichen Vorteil des Dreiphasenwechselstromes: Es stehen bei ihm – Sternschaltung vorausgesetzt – zwei Spannungen zur Verfügung. Es kommt hinzu, daß Drehstromgeneratoren bedeutend kleiner sind als Generatoren für Einphasenwechselstrom gleicher Leistung. Einer der wesentlichsten Vorzüge, der die Einführung des Dreiphasenwechselstromes besonders begünstigt hat, ist die Tatsache, daß sich für Dreiphasenwechselstrom besonders einfache Motoren bauen lassen. Wir werden auf Einzelheiten an anderer Stelle eingehen, müssen das Grundprinzip aber hier schon behandeln; denn diesem Prinzip verdankt der Dreiphasenwechselstrom die verbreitete Bezeichnung *Drehstrom*.

Ordnen wir drei Spulen so an, daß ihre Achsen miteinander jeweils einen Winkel von 120° einschließen, und verbinden wir

die Spulenenden und die Spulenanfänge in Sternschaltung mit den Spulen eines Drehstromgenerators, stellen wir außerdem in den Raum zwischen den Spulen eine Magnetnadel, so dreht sich diese ununterbrochen und mit gleichbleibender Geschwindigkeit, solange der Generator in Betrieb ist.

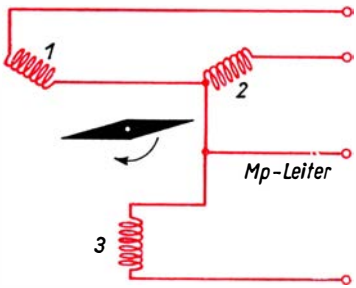



Bild 92
Magnetnadel im Drehfeld

Von der Entstehung des Dreiphasenwechselstromes wissen wir, daß die Spannungen und Ströme der einzelnen „Phasen" um jeweils 120° zeitlich gegeneinander verschoben sind. Dementsprechend erreichen auch die Spulen des „Motors" nicht gleichzeitig ihre Spannungs- und Höchstwerte, sondern nacheinander. Gehen in einem bestimmten Augenblick die kräftigsten magnetischen Wirkungen von Spule 1 aus, so wechseln – der zeitlichen Verschiebung entsprechend – diese Wirkungen im nächsten Augenblick auf Spule 2 über, wenig später auf Spule 3, dann weiter auf 1 usw. – genau im Rhythmus der Drehgeschwindigkeit des Rotors im Generator.
Wir haben also im Raum zwischen den Spulen unseres Motors kein feststehendes magnetisches Feld, das seine Richtung unverändert beibehält, sondern ein resultierendes Magnetfeld, das rotiert. Wir nennen es *Drehfeld*. Die Magnetnadel macht diese Drehbewegung mit und ist damit zum einfachsten Drehstrommotor geworden. Dieses Drehfeld wird bei Dreiphasenwechselstrommotoren immer ausgenutzt.

## Wechselstrom- und Gleichstromgeneratoren

Bei der Behandlung der Induktionserscheinungen und des Drehstromes haben wir bereits erfahren, daß es zwei Möglichkeiten gibt, mit Hilfe einer Drehbewegung Induktionsspannungen zu erzeugen. Man kann eine Leiterschleife oder eine Spule im Magnetfeld rotieren lassen, und man kann bei stillstehender Induktionsspule die Drehbewegung durch einen Magneten ausführen lassen.

Dreht sich die Induktionsspule zwischen Magnetpolen, sprechen wir von einer *Außenpolmaschine*. Ein Generator dagegen, bei dem die Magnetpole vor feststehenden Induktionsspulen rotieren, heißt *Innenpolmaschine*.

Bei der Erzeugung von Elektroenergie wird die Innenpolmaschine bevorzugt. Das hat vor allem folgenden Grund: Bei der Innenpolmaschine steht der „energieerzeugende" Teil fest, die Abnahme auch größter elektrischer Leistungen ist nicht schwierig. Bei einer Außenpolmaschine dagegen muß die Elektroenergie über Schleifringe und Kontaktbürsten von den rotierenden Induktionsspulen abgenommen werden. Das bereitet bei großen Leistungen unüberwindliche Schwierigkeiten.

Dauermagneten können nur für Generatoren kleiner elektrischer Leistung verwendet werden. Wir finden sie zum Beispiel im „Läufer" von Fahrraddynamos oder von Dynamotaschenlampen. Bei größeren Leistungen treten an die Stelle der Dauermagneten Elektromagneten, die mit Gleichstrom gespeist werden. Dem Läufer eines solchen Generators muß die *Erregerspannung* selbstverständlich gleichfalls über Schleifringe zugeführt werden. Das ist jedoch verhältnismäßig einfach, weil die *Erregerleistung* weit geringer ist als die vom Generator abgegebene Leistung.

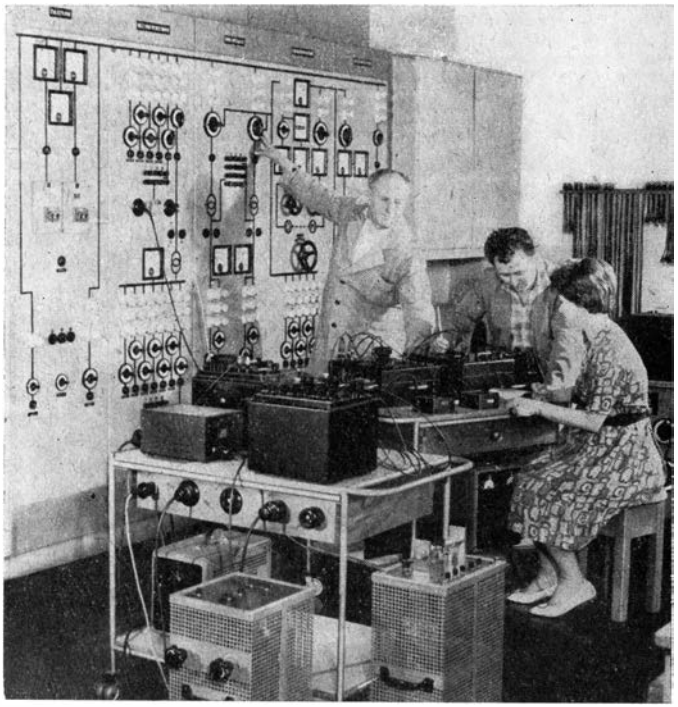
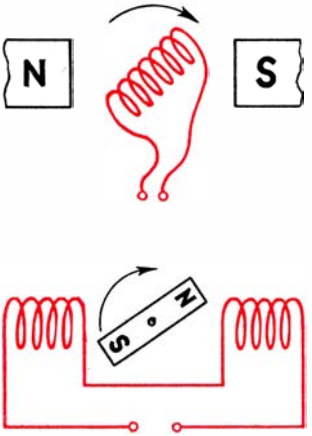


Bild 93 Vielfältige Meßeinrichtungen und -verfahren helfen unserer Energetik

Die Frequenz der erzeugten Wechselspannung hängt zunächst von der Drehzahl des Generatorläufers ab. In Bild 94 ist eine vollständige Umdrehung der Leiterschleife bzw. des Magneten erforderlich, um eine Wechselspannungswelle zu erhalten. Dreht sich der Läufer in einer Sekunde 10- oder 20mal, erhalten wir Wechselspannung und -strom der Frequenz 10 bzw. 20 Hz.
Auch die Zahl der *Polpaare* des rotierenden Läufers beeinflußt die Frequenz. Bei einem Läufer mit drei Polpaaren (Bild 95) zum Beispiel genügt bereits eine drittel Läuferumdrehung, um eine vollständige Wechselspannungswelle zu erzeugen. Bei vier

Bild 94
Prinzip der Außenpolmaschine (oben)
und der Innenpolmaschine (unten)




Polpaaren würde eine viertel Umdrehung ausreichen usf. Ganz allgemein ist:

$$f = p \cdot n,$$

worin $p$ die Zahl der Polpaare,

$n$ die Drehzahl des Läufers (je Sekunde) und

$f$ die Frequenz der Wechselspannung in Hz bedeuten.

Es gibt also zwei Möglichkeiten, die Frequenz eines Generators zu ändern: Man kann die Drehzahl oder die Zahl der Polpaare erhöhen oder erniedrigen. Von beiden Möglichkeiten wird Gebrauch gemacht.

Generatoren für die Energieversorgung werden fast ausschließlich als Drehstrom-Innenpolmaschine gebaut. Ihr „Ständer", der die Induktionswicklungen trägt, besteht aus einem ringförmigen Eisenkern. Dieser ist, um das Entstehen starker Wirbelströme zu verhindern, aus einzelnen, gegeneinander isolierten Spezialblechen zusammengesetzt. Parallel zur Generatorachse sind Nuten im Ständer eingearbeitet. Sie nehmen die für die Drehstromerzeugung notwendigen drei Spulen oder Spulengruppen auf, die allerdings bei Leistungen von vielen

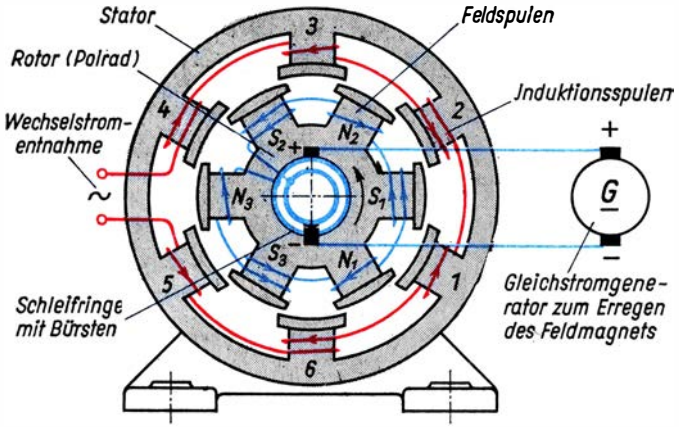



Bild 95 Innenpolgenerator mit drei Polpaaren

Tausenden Kilovoltampere meistens zu Kupferstäben „entartet" sind.

Der Läufer des Generators braucht nicht aus einzelnen Blechen zusammengesetzt zu werden, da sich in ihm das magnetische Feld nicht verändert, sondern mit dem Läufer rotiert.

Die meisten Generatoren werden von Dampf- oder von Wasserturbinen angetrieben. Dampfturbinen sind ausgesprochene Schnelläufer. Da man die Dampfturbine unmittelbar mit dem Generator kuppelt, muß der Läufer für eine entsprechende Drehzahl ausgelegt sein. Da aber die vom Generator abzugebende Frequenz festliegt, kommt für *Turbogeneratoren* im allgemeinen nur ein zweipoliger Läufer in Betracht. Wie die oben angeführte Formel zeigt, muß er, um auf die Netzfrequenz von 50 Hz zu kommen, in der Sekunde 50 bzw. in der Minute 3000 Umdrehungen ausführen.

Bei einer solchen Drehzahl zerren gewaltige Fliehkräfte am Läufer. Da sie mit dem Läuferdurchmesser steigen, gibt man dem Läufer von Turbogeneratoren langgestreckte Walzenform. Entsprechend muß dann auch der Ständer ausgeführt sein.

Viele Arten von Wasserturbinen laufen langsamer als Dampfturbinen. Will man auf energieverzehrende Getriebe verzichten

und die Turbine unmittelbar mit dem Generatorläufer kuppeln, muß man die niedrige Drehzahl durch eine größere Zahl von Polpaaren ausgleichen. Deshalb tritt in Wasserkraftwerken an die Stelle eines langgestreckten Läufers häufig das flache „Polrad", auf dessen Umfang die Magnetpole mit den Erregerwicklungen verteilt sind.

Der Erregerstrom für die Magnetpole wird bei allen Generatoren größerer Leistung durch einen besonderen Gleichstromgenerator, die *Erregermaschine*, bereitgestellt. Sie sitzt meistens mit auf der Generatorwelle und wird gleichfalls von der Turbine angetrieben.

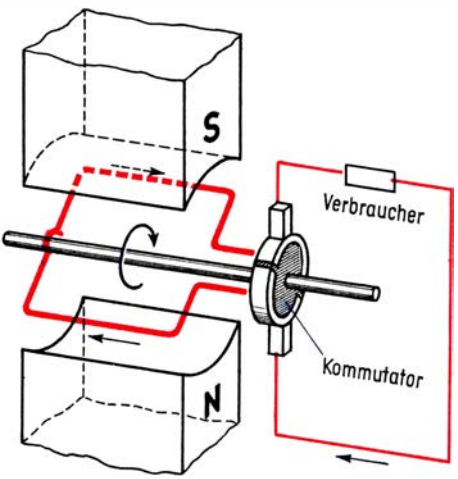



Bild 96
Drehbare Schleife mit Kommutator: Grundform des Gleichspannungsgenerators

Hier nun ist es erforderlich, auch auf die Arbeitsweise einer Gleichstrommaschine einzugehen. Ihr Funktionsprinzip ist in Bild 96 schematisch dargestellt. Es unterscheidet sich von dem Prinzipschema eines Wechselstromgenerators (vgl. Bild 82) nur dadurch, daß die Leiterschleife diesmal nicht mit zwei Schleifringen zur Stromabnahme verbunden ist, sondern daß ihre Enden an die beiden halbzylinderförmigen Segmente des *Kommutators* führen.

Der Kommutator hat folgende Aufgabe: Bei der Drehung wird in der Leiterschleife ebenfalls wieder eine Wechselspannung induziert. Durch die Kommutatorsegmente aber werden die Spulenanschlüsse zum äußeren Leiterkreis nach jeweils einer halben Umdrehung vertauscht. Der Augenblick des Vertauschens wird durch entsprechende Stellung der Segmente und der zur Stromabnahme dienenden „Bürsten" so gelegt, daß die Wechselspannung ihre Richtung gerade am Ende einer Halbwelle umkehrt. Das hat zur Folge, daß die „unteren" Halbwellen des Wechselstromes nach oben „umgeklappt" werden. Es wird in der Leiterschleife zwar nach wie vor eine Wechselspannung induziert, im äußeren Stromkreis dagegen haben wir es nur noch mit Stromhalbwellen einer Richtung zu tun. Im äußeren Stromkreis fließt demnach Gleichstrom.

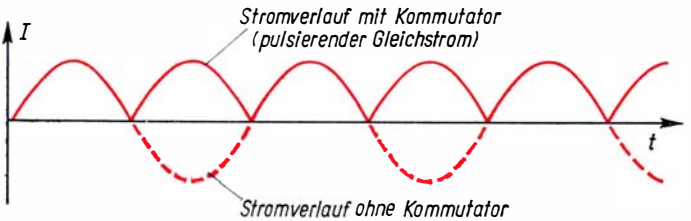



Bild 97 Zur Wirkungsweise des Kommutators

Er hat allerdings mit den Gleichströmen, wie sie etwa von Batterien oder Akkumulatoren geliefert werden, nur gemeinsam, daß er fortwährend in einer Richtung fließt, Spannung und Stromstärke ändern sich dauernd. Man nennt einen solchen Strom „pulsierenden Gleichstrom". Durch entsprechende Ausführung des Generators läßt sich die Welligkeit erheblich vermindern.

Gleichstromgeneratoren werden als Außenpolmaschinen konstruiert. Allerdings scheiden auch diesmal für größere Leistungen Dauermagneten aus. Man erregt die Gleichstrommaschine ebenfalls durch Elektromagneten. Selbstverständlich erhebt sich die Frage, wo man die Erregerleistung hernehmen kann; denn es wäre unzweckmäßig, hierfür eine Batterie oder gar eine weitere Gleichstrommaschine einzusetzen.

Das ist auch gar nicht nötig. Man greift vielmehr auf das von *Werner von Siemens* (1816 bis 1892) angegebene *Dynamoprinzip* zurück: Man schaltet die Läuferwicklungen und die Ständerwicklungen (die „Feldwicklung") so zusammen, daß der Maschinenstrom vor Verlassen der Maschine die Feldwicklung durchfließen muß. Dann erregt sich die Maschine selbst.

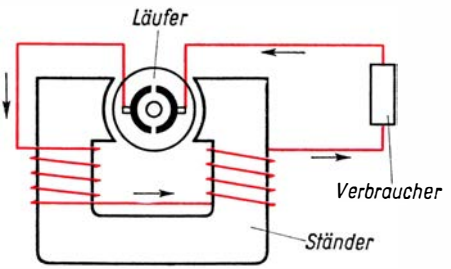



Bild 98
Hauptschlußgenerator

Die Feldmagneten verlieren, nachdem die Maschine einmal in Betrieb war, ihren Magnetismus nicht völlig. Stets bewahren sie einen gewissen Restmagnetismus. Er genügt, um beim Anlaufen des Generators zunächst eine geringfügige Spannung im Läufer zu induzieren. Diese treibt einen Strom durch die Feldwicklung und durch den äußeren Stromkreis. Sind die Feldwicklungen richtig geschaltet, verstärkt dieser Strom das magnetische Feld des Ständers. Infolgedessen wird nunmehr eine höhere Spannung induziert, die den Strom durch Feldwicklung und äußeren Stromkreis anwachsen läßt. Der stärkere Strom wiederum verstärkt das Magnetfeld usf. Diese Wechselwirkung hält an, bis die durch die Daten der Maschine festgelegte elektrische Leistung erreicht ist. Eine Erregung von außen ist nicht nötig.
Man nennt den in Bild 98 skizzierten Generator Reihen- oder Hauptschlußgenerator, da Läufer- und Feldwicklung in Reihe geschaltet sind. Es gibt jedoch auch noch andere Schaltungsmöglichkeiten. Man kann zum Beispiel Läufer- und Feldwicklung parallelschalten, so daß nur ein Teil des Maschinenstromes durch die Feldwicklung fließt. In diesem Fall haben wir es mit einem *Nebenschlußgenerator* zu tun.

## Transformatoren

Generatoren liefern, wenn man nicht sehr kostspielige und umständliche Isolierungsmaßnahmen in Kauf nehmen will, nur Spannungen bis etwa 10 kV. Für die Fernübertragung von Elektroenergie (vgl. S. 210) ist diese Spannung zu niedrig, für den unmittelbaren Betrieb der meisten Stromverbraucher ist sie zu hoch. Man muß also nach einem Verfahren suchen, die Generatorspannung möglichst verlustfrei herauf- oder herabsetzen zu können. Die Möglichkeit, Spannungen zu wandeln, wird auch an vielen anderen Stellen gefordert, zum Beispiel in der Nachrichtentechnik.

Für die Umwandlung von Wechselspannungen steht im Transformator ein sehr einfaches, aber mit hohem Wirkungsgrad arbeitendes Gerät zur Verfügung. Bild 99 zeigt seinen prinzipiellen Aufbau:

Auf einen geschlossenen Eisenkern sind zwei Spulen gewickelt, die miteinander nicht leitend verbunden sind. Schließen wir eine Wechselspannungsquelle an die *Primärspule*, so entsteht ein magnetisches Feld, dessen Stärke und Richtung ständig mit der Frequenz der Primärspannung wechseln. Die Feldlinien dieses Feldes verlaufen, von einigen *Streulinien* abgesehen, sämtlich im Inneren des Eisenkerns. Die von der *Sekundärspule* umfaßte Kraftlinienzahl ändert sich demzufolge ebenfalls mit der Frequenz der Primärspannung. Daher wird der Sekundärspule eine Wechselspannung gleicher Frequenz wie die der Primärspannung induziert. Ursache für das Entstehen der Sekundärspannung ist das magnetische Wechselfeld der

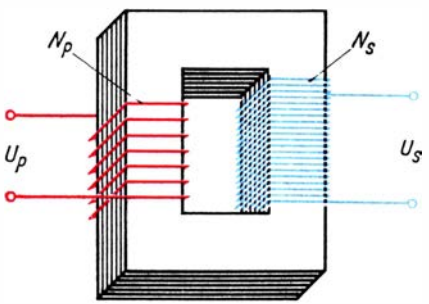



Bild 99 Transformator

Primärspule. Es fehlt, wenn wir Gleichstrom an die Primärspule legen. Nur beim Ein- und Ausschalten ändert sich die Feldlinienzahl, und nur in diesem Augenblick wird in der Sekundärspule ein Spannungsstoß induziert (vgl. S. 117). Daher kann ein Transformator keinen Gleichstrom umwandeln.

Das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärspannung ergibt sich aus folgender Überlegung: Der sich ändernde Feldlinienfluß ruft in beiden Spulen eine Spannung hervor – in der Primär- und in der Sekundärspule. Dabei hängt die induzierte Spannung von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die umfaßte Feldlinienzahl ändert, und von der Windungszahl der Spulen. Da die Geschwindigkeit der Kraftflußänderung aber für beide Spulen gleich ist, weil beide von den gleichen Feldlinien durchsetzt werden, wirken sich nur die Windungszahlen auf die Spannungswandlung aus. Die in der Primärspule induzierte Spannung ist, wenn wir den geringen Wirkwiderstand der Primärspule vernachlässigen, genauso groß wie die angelegte Spannung, ist ihr aber entgegengerichtet (vgl. S. 128). Daraus ergibt sich für das Spannungsverhältnis an den Spulen die wichtige Beziehung:

Die Spannungen an den unbelasteten Transformatorspulen verhalten sich wie die Windungszahlen:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

An der Spule mit der höheren Windungszahl tritt die höhere Spannung auf; deshalb nennt man sie „Oberspannungsseite" des Transformators. Entsprechend heißt die Spule mit der geringeren Windungszahl „Unterspannungsseite" des Transformators. Damit wird das „Übersetzungsverhältnis" $\ddot{u}$ eines Transformators:

$$\ddot{u} = \frac{\text{Windungszahl der Oberspannungsseite}}{\text{Windungszahl der Unterspannungsseite}}$$

$$\ddot{u} = \frac{N_o}{N_u}$$

Welche Spannung tritt an der Sekundärspule eines Transformators auf, wenn diese 10000 Windungen hat und an der Primärspule von 1250 Windungen eine Spannung von 200 V liegt?

Es ist:

$$U_s = U_p \cdot \frac{N_s}{N_0}$$

$$= 200\,\text{V}\frac{10000}{1250}$$

$$= 1600\,\text{V}$$

Belasten wir einen Transformator, das heißt, verbinden wir die Anschlüsse der Sekundärspule über einen Verbraucher miteinander, so muß, wenn wir von den Transformatorverlusten absehen, die von der Primärseite aufgenommene Leistung gleich der von der Sekundärseite abgegebenen sein. Daraus ergibt sich eine wichtige Beziehung für die Spulenströme:

$$\boxed{\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}}$$

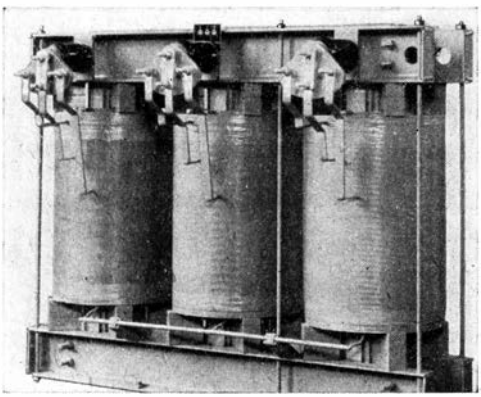


Bild 100 Drehstrom-Trocken-Hochspannungs-Transformator

Wir können demnach mit einem Transformator aus hohen Spannungen geringer Stromstärke auch niedrige Spannungen großer Stromstärke gewinnen.

Als Wirkungsgrad des Transformators bezeichnet man das Verhältnis zwischen Sekundär- und Primärleistung:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p}$$

Der Wirkungsgrad des Transformators ist, verglichen mit dem anderer Maschinen, sehr groß: 96 % bis 99 % der primärseitigen Leistung werden auf der Sekundärseite wieder abgegeben. Die Differenz bis zu 100 % erklärt sich aus den selbstverständlich auch im Transformator unvermeidlichen Verlusten. Sie haben mehrere Ursachen. In den Windungen treten „Kupferverluste" auf. Sie werden dadurch hervorgerufen, daß die Wicklungen einen gewissen Widerstand aufweisen und sich durch den Stromfluß erwärmen.

Im Transformatorkern treten zunächst Wirbelstromverluste auf. Man setzt sie dadurch herab, daß man den Kern aus einzelnen, gegeneinander isolierten Blechen schichtet.

Die Elementarmagneten des Transformatorkerns werden durch das magnetische Wechselfeld dauernd gedreht. Dazu ist ein gewisser Energieaufwand nötig, den man als *Hystereseverlust* (vgl. S. 94) bezeichnet. Man hält ihn niedrig, indem man für die Kernbleche Werkstoffe wählt, die nur einen geringen Energieaufwand zum Ummagnetisieren erfordern.

Bei der Konstruktion eines Transformators sorgt man vor allem dafür, daß die Feldlinienstreuung gering bleibt und daß tatsächlich sämtliche Feldlinien die Sekundärspule durchsetzen. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Bauformen, den *Kerntransformator* und den *Manteltransformator*.

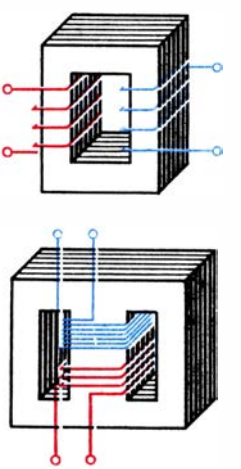


Bild 101 Kerntransformator (oben) und Manteltransformator (unten)

Primär- und Sekundärspule werden meistens nicht so wie in Bild 99 voneinander getrennt. Bei der *Zylinderwicklung* liegen die Wicklungen übereinander; bei der *Scheibenwicklung* sind Ober- und Unterspannungswicklungen unterteilt und in scheibenförmigen Spulen angeordnet.

Die bisher skizzierten und behandelten Transformatoren sind *Einphasentransformatoren*. Soll Drehstrom transformiert werden, so kann dies mit drei Einphasentransformatoren geschehen, deren jeder einen Phasenstrom umwandelt. Meistens setzt man jedoch spezielle Drehstromtransformatoren ein, auf deren Kern drei Oberspannungswicklungen und drei Unterspannungswicklungen angebracht sind. Für die Schaltung ergeben sich mehrere Möglichkeiten. So kann man die Oberspannungswicklungen in Sternschaltung, die Unterspannungswicklungen dagegen in Dreieckschaltung zusammenschließen; es ist möglich, auf der Primär- und auf der Sekundärseite die Sternschaltung anzuwenden usf.

Jeder Transformator erwärmt sich im Betrieb. Bei größeren Leistungen muß diese Wärme beschleunigt abgeführt werden. Man kann zum Beispiel den Transformator mit Kühlrippen versehen, so daß die Wärmeabgabe an die Luft gefördert wird. Auch durch Anblasen mit Kaltluft läßt sich die Kühlwirkung erhöhen. Besonders verbreitet sind *Öltransformatoren*. Der ganze Transformator wird in einen Kessel gesetzt, der mit wasserfreiem, dünnflüssigem Mineralöl gefüllt ist. Zusätzlich weist der Kessel meistens Kühlrippen auf, um die Wärmeabgabe durch Strahlung zu verbessern. Neben seiner Kühlwirkung bringt das Öl noch den Vorteil, die Isolation des Transformators zu verbessern. In jüngster Zeit wird das Öl mehr und mehr durch nichtentflammbare Kühlflüssigkeiten ersetzt.

### Gleichstrommotoren

Der Elektromotor zählt zu den wichtigsten Anwendungen der Gesetze des elektrischen Stromes. Aus der modernen Technik ist er nicht mehr wegzudenken: Riesige Bagger und Förderbrücken werden ebenso von Elektromotoren angetrieben wie kleinste, Uhren, schwere Güterzuglokomotiven ebenso wie Spielzeug-

autos, Staubsauger genauso wie die Schrauben des Atomeisbrechers „Lenin".

Das Prinzip des Elektromotors haben wir bereits kennengelernt: Auf jeden stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet, werden mechanische Kräfte ausgeübt. Sie können, wie das Drehspulinstrument (vgl. S. 114) erweist, eine Drehbewegung hervorrufen. Allerdings betrüge bei einer dem Drehspulinstrument ähnlichen Anordnung die größte mögliche Drehung 180°; denn die Bewegung hört auf, wenn sich ungleichnamige Pole des *Feldmagneten* und des *Läufers* oder *Ankers* gegenüberstehen.

Ein Motor dagegen soll eine ständige Drehbewegung ausführen. Man erreicht sie durch einen Kunstgriff: In dem Augenblick, da sich ungleichnamige Pole von Läufer und Feldmagnet gegenüberstehen, wird die Stromrichtung im Läufer umgekehrt. Dabei wechseln sofort auch die Läuferpole. Aus dem bisherigen Nordpol wird ein Südpol, aus dem Südpol ein Nordpol. Infolgedessen geht im Augenblick der größten Annäherung die Anziehung zwischen Feld- und Läuferpolen in eine Abstoßung über. Der Läufer dreht sich weiter. Schaltet man nach jeweils 180° die Stromrichtung erneut um, dreht sich der Läufer ununterbrochen.

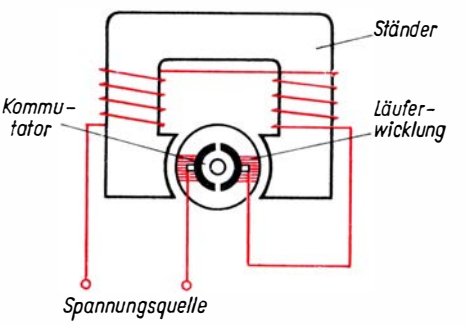



Bild 102
Gleichstrom-Hauptschlußmotor

Das Umschalten der Stromrichtung besorgt der Motor selbst. Zu diesem Zweck finden wir auf der Läuferachse einen gleichen Kommutator, wie wir ihn beim Gleichstromgenerator kennenlernten. Jeweils nach einer halben Läuferumdrehung vertauscht

der Kommutator die Stromzuführung zur Läuferwicklung, so daß nunmehr während der nächsten halben Läuferumdrehung der Strom in umgekehrter Richtung fließt.

Dauermagneten werden nur in Motoren sehr geringer Leistung als Feldmagneten verwendet. Bei der übergroßen Mehrzahl aller Motoren dienen als Feldmagneten Elektromagneten.

Damit der Motor gleichmäßig läuft und arbeitet, trägt der Läufer meistens mehrere gegeneinander versetzte Wicklungen, die in Nuten des Läuferkörpers eingelegt sind. Die Wicklungsenden werden jeweils an ein Paar einander gegenüberliegender Kommutatorsegmente geführt. Die Zahl dieser Segmente vermehrt sich also entsprechend.

Läuft ein Gleichstrommotor an, fließt zunächst ein Strom durch den Anker, der den normalen Betriebsstrom weit übertrifft. Diese Erscheinung hat folgende Ursache: Im rotierenden Läufer wird wie in einem Generator eine Spannung induziert. Sie ist nach der Lenzschen Regel der den Läufer antreibenden Spannung entgegengerichtet. Da die induzierte Spannung aber davon abhängt, wie schnell sich die umfaßte Feldlinienzahl ändert, wirkt sich die Drehzahl des Motors entscheidend auf die Höhe der Gegenspannung aus. Im Augenblick des Einschaltens fehlt die Gegenspannung. Demzufolge treibt die von außen an den Läufer gelegte Netzspannung einen sehr starken Strom durch die Läuferwicklung. Gerät der Läufer allmählich in Bewegung, entsteht eine zunächst geringe, später ansteigende Gegenspannung. Insgesamt also vermindert sich die am Anker wirksame Spannung, die Stärke des Ankerstromes geht zurück.

Der Anlaßstrom kann bis zum Dreißigfachen des normalen Betriebsstromes betragen. Es wäre daher sehr unwirtschaftlich, wollte man die Motoren und ihre Stromzuführungen so konstruieren, daß sie den hohen Anlaßstrom ohne weiteres aushielten. Es ist viel günstiger, den Gleichstrommotoren *Anlaßwiderstände* vorzuschalten, die ein zu starkes Anwachsen des Stromes verhindern.

Die Anlaßwiderstände sind veränderbare Widerstände, die so in den Motorstromkreis geschaltet werden, daß der Ankerstrom sie durchfließen muß. Beim Einschalten des Motors ist zunächst der volle Widerstand wirksam. Er setzt die am Anker liegende Spannung herab. Mit dem Anlaufen des Motors und zunehmen-

der Gegenspannung kann der Anlaßwiderstand allmählich herabgesetzt werden. Er ist völlig ausgeschaltet, wenn der Motor seine volle Drehzahl erreicht hat.

Bei Motoren sehr kleiner Leistung, wie sie in Haushaltgeräten oder als Spielzeugmotoren zu finden sind, kann man auf den Anlaßwiderstand verzichten. Auch ist es heute möglich, mit Hilfe elektronischer Geräte den Anlaßvorgang völlig selbsttätig ablaufen zu lassen.

Man unterscheidet drei Arten von Gleichstrommotoren: Reihenschlußmotoren (Hauptschlußmotoren), Nebenschlußmotoren und Doppelschlußmotoren.

Beim Reihenschlußmotor sind Anker- und Feldwicklungen hintereinandergeschaltet. Der gesamte Motorstrom muß beide Wicklungen durchfließen. Das hat wichtige Folgen für das Verhalten des Motors:

Beim Anlaufen fließt durch Anker- und Feldwicklung der starke Anlaufstrom. Die Stärke des Feldes wird dadurch erhöht. Der Motor weist ein hohes „Anzugsmoment" auf und läuft auch unter starker Belastung weich an. Belastungsänderungen wirken sich unmittelbar auf die Drehzahl aus. Der Motor läuft um so langsamer, je stärker er belastet ist. Wird er dagegen plötzlich entlastet, „geht er durch". Seine Drehzahl steigert sich so, daß bei größeren Motoren die auftretenden Fliehkräfte den Läufer zerreißen können. Durch das Entlasten steigen Drehzahl und Gegenspannung im Anker, der vom Motor aufgenommene Strom sinkt. Dadurch verringert sich aber auch die Stärke des Magnetfeldes, was einem Steigen der Gegenspannung entgegenwirken würde. Um dieses „Nachlassen" des Magnetfeldes auszugleichen, erhöht der Läufer seine Drehzahl. Dieser Vorgang steigert sich wechselseitig bis zur Zerstörung des Motors.

Reihenschlußmotoren sind besonders für solche Aufgaben geeignet, bei denen hohes Anzugsvermögen verlangt wird und die Gefahr einer völligen Entlastung nicht besteht. Wir finden sie als Bahnmotoren für Stadt- und Untergrundbahnen, als Antriebsmotoren für Krane, Aufzüge, in Walzwerken usf.

Soll die Drehrichtung eines Reihenschlußmotors umgekehrt werden, muß die Feld- oder die Ankerwicklung umgepolt werden. Bei der Umkehrung der Richtung von Feld- und Ankerwicklung behält der Motor seine Stromrichtung bei.

Insbesondere zum Antrieb von Werkzeugmaschinen wird ein Motor benötigt, der seine Drehzahl trotz Belastungsänderungen möglichst wenig ändert und dessen Drehzahl sich auf leichte und wirtschaftliche Weise regeln läßt. Diese Bedingungen erfüllt der Nebenschlußmotor. Bei ihm teilt sich der vom Motor aufgenommene Strom in den Ankerstrom und in den Strom durch die Feldwicklung. Der Strom durch die Feldwicklung ist von der Belastung und der Drehzahl des Motors unabhängig und erzeugt stets ein Magnetfeld gleichbleibender Stärke. Um den Strom durch die Feldwicklung möglichst gering zu halten, besteht sie aus vielen Windungen dünnen Drahtes.
Der Anlaßwiderstand beeinflußt hier nur den Ankerstrom. Wird der Motor stärker belastet, sinken Drehzahl und Gegenspannung. Die Ankerstromstärke wächst, und das hat im konstanten Magnetfeld wieder eine Erhöhung der Drehzahl zur Folge.
Die Gefahr des Durchgehens bei Entlastung ist hier kaum vorhanden; denn die Stärke des Magnetfeldes ändert sich bei steigender Drehzahl nicht.
Um die Drehrichtung des Motors zu wechseln, ist es wiederum erforderlich, Läufer- oder Feldwicklung umzupolen. Wird dem Feldmagneten ein regelbarer Widerstand, der *Feldsteller*, vorgeschaltet, läßt sich die Drehzahl des Motors in weiten Grenzen verändern. Die Energieverluste bleiben dabei gering, weil wegen der geringen Stromstärke im Feldmagneten am Feldsteller nur wenig Energie in Wärme umgesetzt wird. Auch für Anlagen, in denen die Drehzahl automatisch geregelt werden soll, ist der Nebenschlußmotor gut geeignet.
Der Doppelschlußmotor stellt eine Kombination aus Reihenschluß- und Nebenschlußmotor dar. Sein Magnetfeld wird durch zwei Wicklungen erregt. Die eine liegt in Reihe mit dem Anker, die andere ist dem Anker parallelgeschaltet. Man hat es dadurch bis zu einem gewissen Grade in der Hand, die Vorzüge des Reihenschlußmotors mit denen des Nebenschlußmotors zu kombinieren.

### Wechsel- und Drehstrommotoren

Wenn man die Anschlüsse eines Gleichstrommotors vertauscht, bleibt seine Drehrichtung erhalten, weil sich die Stromrichtung

in Anker- und Feldspulen umkehrt. Daher laufen Gleichstrommotoren auch, wenn man sie an das Wechselstromnetz anschließt.

In der Tat gibt es *Universalmotoren*, Hauptschlußmotoren, die mit Wechsel- und mit Gleichstrom betrieben werden können. Sie sind allerdings stets nur für kleine Leistungen ausgelegt und werden zum Beispiel in Haushaltgeräte eingebaut.

Gegenüber normalen Gleichstrommotoren weisen Universalmotoren allerdings einige Unterschiede auf. Anker und Feldmagnete werden aus einzelnen, voneinander isolierten Blechen zusammengesetzt, um die Wirbelstromverluste niedrig zu halten. Die Leistung des gleichen Universalmotors ist bei Gleichstrombetrieb höher als bei Wechselstrombetrieb. Das erklärt sich daraus, daß bei Wechselstrombetrieb der induktive Widerstand der Wicklungen bemerkbar wird. Um auf die gleiche Leistung zu kommen wie bei Gleichstrombetrieb, werden Universalmotoren häufig mit Wicklungsanzapfungen ausgestattet. Beim Übergang von Gleich- auf Wechselstrombetrieb und umgekehrt müssen die Anschlüsse umgeklemmt werden.

Sehr einfache Wechselstrommotoren sind die *Synchronmotoren*. Wie sie funktionieren, sei mit Hilfe einer Skizze erläutert.

Zwischen den Schenkeln eines Magneten, der mit Wechselstrom gespeist wird, sitzt ein drehbarer Magnetstab als Läufer. An den Schenkelenden tritt, der Frequenz des Wechselstromes entsprechend, ein fortwährender Polwechsel auf. Nach jeder Halb-

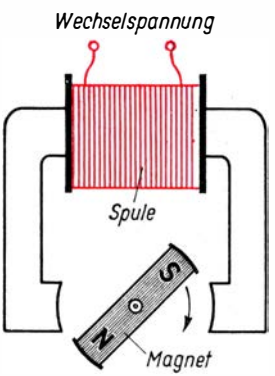



Bild 103
Zur Wirkungsweise des Synchronmotors

welle vertauschen sich Nord- und Südpol. Stellen wir uns nun vor, der Magnetstab bewege sich so, daß sein Nordpol sich gerade dem Südpol des Feldmagneten nähert und daß der Strom gerade seine Richtung umkehrt, wenn die Magnetpole von Feld- und Läufermagnet einander am nächsten sind. Dann wird während der folgenden Wechselstromhalbwelle der Nordpol von diesem Schenkelende, das jetzt gleichfalls ein Nordpol ist, abgestoßen, vom gegenüberliegenden Schenkelende dagegen angezogen. Langt das Magnetstabende auch dort gerade beim Richtungswechsel des Stromes an, setzt es wegen des Überganges von Anziehung in Abstoßung seine Bewegung fort. Entsprechend verhält sich auch das andere Ende des Magnetstabes.

Das bedeutet aber: Ist der Läufer einmal „im Takt" mit dem wechselnden Magnetfeld, rotiert er ständig weiter, denn er erhält periodisch immer wieder einen neuen Bewegungsantrieb. Seine Drehgeschwindigkeit liegt fest und wird durch die Frequenz des Wechselstromes bestimmt. Daraus erklärt sich auch der Name *Synchronmotor*.

Wird der Motor so überlastet, daß seine Drehzahl wesentlich sinkt, „verspäten" sich die Läuferpole, und an den Magnetschenkeln tritt gerade das Gegenteil der erwünschten Wirkung

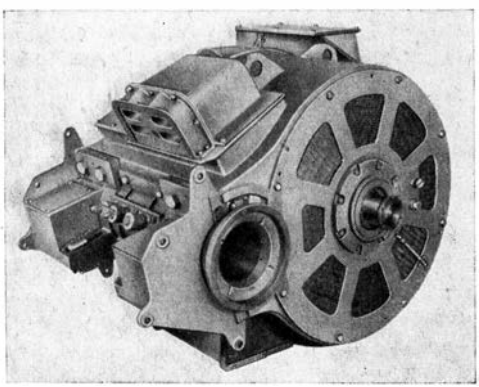


Bild 104 Einphasen-Bahnmotor 730 kW

ein. Der Motor fällt „außer Tritt" und bleibt stehen. Der beschriebene Einphasen-Synchronmotor hat noch einen weiteren Nachteil: Er läuft nicht von allein an, sondern muß erst auf seine Nenndrehzahl gebracht werden. Nur mit Hilfe gewisser Kunstgriffe ist es möglich, ein selbsttätiges Anlaufen des Motors zu erreichen.

Synchronmotoren werden dort eingesetzt, wo es auf genaues Einhalten der Drehzahl ankommt. Das ist der Fall bei elektrischen Uhren, bei Antriebsmotoren für Plattenspieler oder für Tonbandgeräte, bei Registriergeräten für verschiedene Messungen usw.

Das Arbeitsprinzip des Drehstrom-Synchronmotors haben wir bereits auf S. 181 kennengelernt. Es ist die im Drehfeld rotierende Magnetnadel. Bei Drehstrom-Synchronmotoren tritt an die Stelle der Magnetnadel ein Elektromagnet, der durch eine von außen zugeführte Gleichspannung erregt werden muß. Auch wenn man meistens die Erregermaschine mit auf die Motorachse setzt, ist die Notwendigkeit der Fremderregung ein Nachteil des Drehstrom-Synchronmotors. Außerdem ist ein selbsttätiges Anlaufen des Motors nur mit gewissen Kunstgriffen zu erreichen. Normalerweise muß er erst von außen auf seine Betriebsdrehzahl gebracht werden.

Trotzdem werden Drehstrom-Synchronmotoren häufig, besonders auch für große Leistungen, eingesetzt. Das liegt einmal daran, daß ihr Wirkungsgrad höher ist als der anderer Drehstrommotoren. Zum anderen aber kann man mit Hilfe eines Drehstrom-Synchronmotors den Leistungsfaktor des Energienetzes verbessern. Wird nämlich die Erregung des Läufers entsprechend eingestellt, induziert der Läufer im Ständer des Motors eine so hohe Gegenspannung, daß der Motor Blindstrom an das Energieversorgungsnetz abgibt.

Entfernen wir aus einem Drehstrom-Synchronmotor den umlaufenden Magneten, um an seine Stelle einen zylindrischen oder scheibenförmigen, drehbaren Metallkörper zu setzen, so beginnt auch dieser sich zu drehen. Diese Anordnung ist das Modell eines Drehstrom-Asynchronmotors.

Die Drehbewegung entsteht folgendermaßen: Das umlaufende Drehfeld induziert im Läufer elektrische Spannungen und Ströme. Nach der Lenzschen Regel müssen diese Ströme so

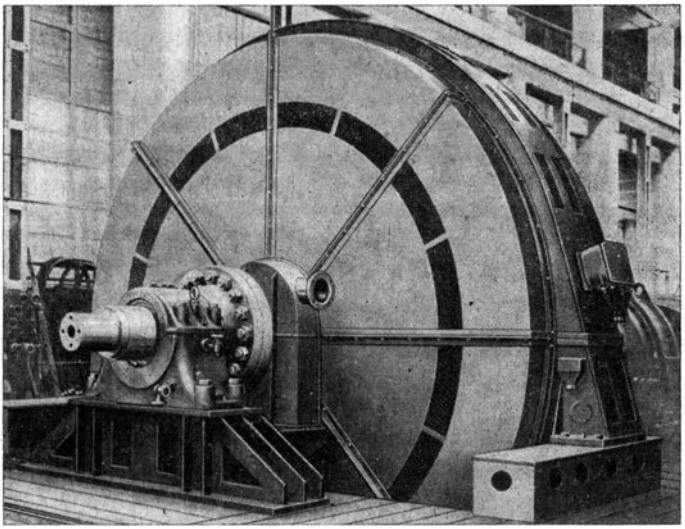


Bild 105 Drehstrom-Synchronmotor für eine Leistung von 5000 kW

gerichtet sein und wirken, daß ihre Ursache behindert wird. Ursache für die Induktion ist hier das umlaufende Magnetfeld, das Drehfeld. Infolgedessen macht der Läufer die Drehbewegung des Feldes mit; denn dann befinden sich Drehfeld und Läufer gegeneinander nicht mehr in so schneller Bewegung. Es ist eine ähnliche Erscheinung, wie wir sie auf S. 127 bereits kennenlernten.

Die Drehzahl des Läufers hängt zwar von der Frequenz des Drehstromes ab, sie ist jedoch stets etwas geringer. Der Läufer „hinkt" dem Drehfeld mehr oder weniger nach. Das hat einen einfachen Grund: Würde sich der Läufer ebenso schnell wie das Drehfeld drehen, so befänden sich Drehfeld und Läufer gegeneinander in Ruhe. Im Läufer würde überhaupt keine Spannung mehr induziert; der Antrieb der Drehbewegung fiele weg.

Den Unterschied zwischen den Drehzahlen von Feld und Läufer nennt man „Schlupf". Er beträgt nur wenige Prozente der Drehzahl des umlaufenden Feldes. Da zwischen Drehfeld und Läufer-

drehzahl kein starrer Zusammenhang mehr besteht, heißen derartige Motoren *Asynchronmotoren*.

Besonders weite Verbreitung haben Asynchronmotoren mit *Kurzschlußläufer* gefunden. Ihr zylinderförmiger Läufer ist aus Blechen gestapelt, die gegeneinander isoliert sind. Parallel zur Zylinderachse sind zahlreiche Nuten in die Zylinderoberfläche eingearbeitet. In sie werden Kupfer- oder Aluminiumstäbe eingelegt. An den beiden Enden sind sämtliche Stäbe durch je einen Metallring miteinander verbunden. Denkt man sich den Kern des Läufers weg, so ähnelt die „Wicklung" einem Käfig. Deshalb bezeichnet man sie auch als Käfigwicklung.

Der Kurzschlußläufermotor ist besonders einfach und betriebssicher. Da es bei ihm weder Schleifringe noch einen Kommutator gibt, besteht keine Gefahr einer Funkenbildung. Er kann daher auch in explosionsgefährdeten Anlagen eingesetzt werden und verursacht keine Funkstörungen. Da seine Drehzahl konstant ist und sich bei wechselnder Belastung nur geringfügig ändert, ist er gut für den Antrieb von Werkzeugmaschinen geeignet. Eine stetige Regelung der Drehzahl ist allerdings bei diesem Motor nicht ohne weiteres möglich.

Beim Anlaufen eines Kurzschlußläufermotors fließt in den Ständerwicklungen zunächst ein sehr hoher Anlaufstrom. Unmittelbar nach dem Einschalten ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Drehfeld und Läufer besonders groß. Infolgedessen wird im Läufer eine hohe Spannung induziert, die wiederum einen starken Läuferstrom zur Folge hat. Eine entsprechende



Bild 106 Käfigwicklung

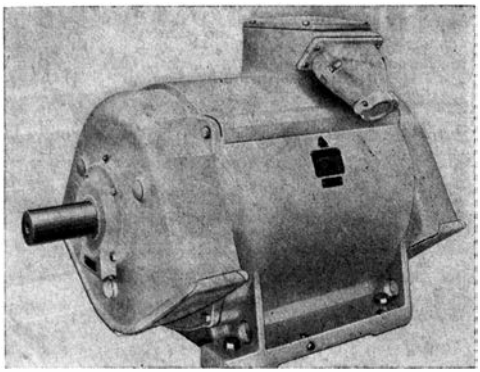


Bild 107 Drehstrom-Standardmotor Typ AHE 112-4, 250 kW, 1500 U/min

elektrische Leistung muß, wie in einem Transformator, auch in den Ständerspulen auftreten.

Es gibt mehrere Verfahren, den hohen Anlaufstrom des Kurzschlußläufermotors zu vermindern.

Man kann zum Beispiel zwischen das Netz und die Ständerwicklungen drei veränderbare Anlaßwiderstände schalten, die gemeinsam bedient und mit dem Anlaufen des Motors allmählich ausgeschaltet werden.

Ein anderes, weit verbreitetes Verfahren ist das der Anwendung eines *Stern-Dreieck-Schalters.* Es ist ein Spezialschalter, mit dessen Hilfe die Ständerwicklungen während des Anlaufens zunächst als „Stern" zusammengeschaltet werden. Der Motor erhält dadurch vorerst eine geringere Spannung. Nach Erreichen einer bestimmten Drehzahl werden die Wicklungen auf „Dreieck" umgeschaltet, die Ständerwicklungen liegen an voller Netzspannung.

Man hat auch durch spezielle Läuferkonstruktionen erreicht, daß der Anlaufstrom keine allzu hohen Werte annimmt. Bei den *Stromverdrängungsläufern* zum Beispiel finden die im anlaufenden Motor fließenden Läuferströme zunächst einen höheren Widerstand vor, während sie nach dem Anlaufen durch Läuferteile geringen Widerstandes fließen.

Asynchronmotoren werden auch als „Schleifringläufermotoren“ gebaut. Der Läufer trägt hier drei gegeneinander versetzte Wicklungen. Ihre Anfänge sind miteinander verbunden, ihre Enden führen an drei Schleifringe. Der Läuferstrom wird mit Bürsten abgenommen und drei regelbaren Widerständen zugeleitet. Beim Anlaufen werden die Widerstände allmählich ausgeschaltet, bis die Läuferwicklung bei voller Drehzahl kurzgeschlossen ist. Nicht selten wird der Läufer durch eine besondere Kurzschlußvorrichtung unmittelbar an den Schleifringen kurzgeschlossen.

## Die Energieversorgung

### Das Kraftwerk

Die meisten Kraftwerke lassen sich in eine von zwei Gruppen einordnen:
In den *Wärmekraftwerken* wird die Energie natürlicher Brennstoffe zur Stromerzeugung genutzt. Den Rohstoff der *Wasserkraftwerke* bildet die Energie des strömenden Wassers.
Wärmekraftwerke halten in der Welterzeugung an Elektroenergie noch mit weitem Abstand die Spitze. In ihrem grundsätzlichen Aufbau gleichen sie sich alle. Mit der bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl oder Gas freiwerdenden Wärmeenergie wird Dampf hoher Temperatur und hohen Drucks erzeugt. Er strömt mit großer Geschwindigkeit auf die Schaufeln von Turbinen, setzt diese in Bewegung und wird anschließend in Wasser zurückverwandelt, das dem Dampferzeuger erneut zugeführt wird. Die Turbine treibt den Generator.
Man ist im allgemeinen bestrebt, Wärmekraftwerke möglichst hoher Leistung zu bauen, weil sie im Verhältnis zu kleineren Anlagen mit besserem Wirkungsgrad arbeiten. So weisen die Braunkohlenkraftwerke Lübbenau und Vetschau eine Leistung von 1300 MW bzw. 1200 MW auf. Das ist eine Leistung, die der physischen Arbeitskraft von etwa 18 Millionen Menschen entspricht!
Bei Großkraftwerken ist ferner die Tendenz zu beobachten, mit immer höheren Dampfdrücken und Temperaturen zu arbeiten. Gegenwärtig liegt die Grenze bei einem Dampfdruck um 300 at und bei Dampftemperaturen um 600 °C.
Die Turbinen- und Generatorleistungen sind in den letzten Jahrzehnten gleichfalls ständig gestiegen. Generatoren und Turbinen für Leistungen über 800 MW sind bereits in Betrieb.
Dampferzeuger, Turbogenerator und die Transformatoren zur Erhöhung der Generatorspannung werden heute meistens zu

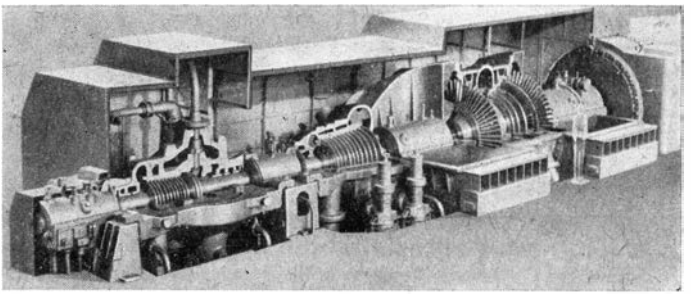


Bild 108 Modell eines Turbogenerators

einem Kraftwerksblock vereint. Die Gesamtanlage des Kraftwerks besteht dann aus einer der Gesamtleistung entsprechenden Zahl solcher Einheiten.

Infolge der mehrfachen Energieumwandlung ist der Wirkungsgrad selbst modernster Kraftwerke verhältnismäßig niedrig. Nur ein geringer Teil der in den Brennstoffen gebundenen Energie findet sich in der abgegebenen Elektroenergie wieder. Ein „spezifischer Wärmeverbrauch" von 2000 kcal je erzeugter Kilowattstunde gilt bereits als sehr guter Wert, der längst nicht von allen Kraftwerken erreicht wird.

Bei sogenannten Gasturbinen-Kraftwerken entfällt die Zwischenstufe „Dampf". Solche Kraftwerke zeichnen sich außerdem dadurch aus, daß sie innerhalb sehr kurzer Zeit bis zur vollen Energieabgabe „hochgefahren" werden können.

Die gegenwärtig arbeitenden Kernkraftwerke sind Wärmekraftwerke, deren Kesselanlage durch einen Atomreaktor ersetzt wurde. Ihr Anteil an der Welterzeugung von Elektroenergie ist vorläufig noch gering; alle derzeit betriebenen Anlagen sind nicht nur Energielieferanten, sondern zugleich Versuchswerke, mit denen man Erfahrungen sammeln und Fachpersonal ausbilden will.

Bei Wärmekraftwerken entscheiden der verfügbare Brennstoff und seine Lagerstätten mit über den Standort der Kraftwerke. Diese örtliche Bindung ist bei Wasserkraftwerken noch weit enger. Auch deshalb werden bis heute noch längst nicht alle verfügbaren Wasserkräfte ausgenutzt. Man weiß, daß Wasser-

kraftwerke am Rohenergieaufkommen der Welt einen nur geringen Anteil haben. Das ist allerdings nicht allein durch örtliche Gegebenheiten bedingt, sondern auch dadurch, daß man in kapitalistischen Staaten wenig an der Errichtung von Wasserkraftwerken interessiert ist, solange genügend natürliche Brennstoffe zur Verfügung stehen und mit Profit verkauft werden können.

Die Sowjetunion, in der es, wie in allen sozialistischen Ländern, solche Erwägungen nicht gibt, zeigt aber, welche gewaltigen Energiereserven der Volkswirtschaft durch den Ausbau der verfügbaren Wasserkräfte erschlossen werden können.

Die Leistungsfähigkeit eines Wasserkraftwerkes hängt davon ab, welche Wassermenge je Sekunde durch die Turbinen strömt, und von der Höhe, aus der das Wasser „fällt" (daß es sich meistens nicht um ein Fallen im eigentlichen Sinne, sondern um ein Strömen handelt, spielt keine Rolle). In der Natur allerdings stehen meistens entweder große Wassermengen (an Strömen) oder große Fallhöhen (in Gebirgsgegenden) zur Verfügung. Dementsprechend nimmt man nochmals eine Unterteilung vor: Wasserkraftwerke bis zu Fallhöhen von 50 m nennt man Niederdruckanlagen, Werke mit Fallhöhen über 50 m heißen Hochdruckanlagen.

Für beide Kraftwerksarten gibt es geeignete Wasserturbinen, die den Antrieb der Generatoren übernehmen. In Niederdruckanlagen steht die Turbinenwelle oft senkrecht; entsprechend muß dann auch der Generator angeordnet sein. Daß dieser meistens eine geringere Drehzahl aufweist als ein Turbogenerator und mit einem Polrad großen Durchmessers ausgestattet ist, erwähnten wir bereits.

Niederdruckkraftwerke finden wir vorwiegend an Flüssen. Das Wasser wird durch ein Wehr aufgestaut und strömt auf die Turbinen. Sehr oft lassen sich nur Fallhöhen von wenigen Metern erreichen, wenn man durch den Stau nicht weite Landstriche überschwemmen will. Auch sind nicht selten umfangreiche zusätzliche Bauten nötig, um die Schiffahrt nicht zu behindern.

Die bekanntesten Hochdruckkraftwerke liegen am Fuße hoher Staumauern, am Fuße von „Talsperren". Diese riegeln ein Tal oder auch eine Engstelle eines Flusses ab. Es bildet sich ein

Stausee, der fast immer gleichzeitig anderen Zwecken (Wasserversorgung, Beseitigung der Hochwassergefahr usw.) dient.
Weltberühmt sind schon heute die riesigen Hochdruckkraftwerke, die in Sibirien entstehen. Namen wie Bratsk oder Ust-Ulimsk kennt die ganze Welt. Das größte Kraftwerk der Welt mit einer Leistung von mehr als 6000 MW und einem über 200 m hohen Staudamm entstand gleichfalls in Sibirien, bei Sajano-Schuschenskoje.
Überall ist man auch bemüht, neue Methoden der Energiegewinnung zu erschließen. So können wir seit Jahrzehnten Versuche verfolgen, die Sonnenenergie unmittelbar in Elektrizität zu verwandeln. Die auf Erkenntnissen der Halbleiterphysik beruhenden „Sonnenbatterien" haben diesen Versuchen eine neue Richtung gewiesen. Bei der Stromversorgung von Satelliten und Weltraumsonden sind Sonnenbatterien bereits heute von entscheidender Bedeutung. „Am Boden" werden sie ebenfalls für die Gewinnung kleinerer Energiemengen benutzt. Es kann jedoch zur Zeit noch nicht entschieden werden, ob die Umwandlung der Sonnenenergie eines Tages eine wesentliche Rolle in der Energieversorgung spielen wird.
Versuche, die Strömungsenergie des Windes auszunutzen, blieben bisher auf kleinere Anlagen zur Deckung des örtlichen Energiebedarfs beschränkt. Dagegen wurden einige Projekte, die Bewegungsenergie von Ebbe und Flut zur Energiegewinnung zu nutzen, bereits ausgeführt. 1967 liefen in Frankreich die 24 Turbinen des ersten größeren Gezeitenkraftwerkes an, eine Versuchsanlage wurde in der Sowjetunion errichtet. Auch solche Anlagen sind aber nur dort sinnvoll, wo große Höhenunterschiede zwischen Ebbe und Flut auftreten.
Gänzlich unausgeschöpft ist bis heute der gewaltige „Wärmevorrat" des Erdinneren. Besonders sowjetische Wissenschaftler vertreten die Ansicht, daß seine Nutzung eines Tages in großem Umfange möglich sein wird.
Gewiß ist, daß die heutigen, auf der Kernspaltung beruhenden Atomkraftwerke nur eine – wenn auch sehr wichtige – Übergangslösung darstellen. Die Zukunft gehört mit großer Wahrscheinlichkeit Kraftwerken, in denen Elektroenergie aus der Verschmelzung leichter Atomkerne zu schwereren gewonnen wird. Solche Kraftwerke könnten Wasser als „Brennstoff" ver-

wenden; es gäbe überdies bei ihnen keine radioaktiven Abfälle, deren Beseitigung Schwierigkeiten bereitet. Gegenwärtig ist eine Kernverschmelzung für Zwecke der Energiegewinnung technisch jedoch noch nicht zu verwirklichen. Es zeichnen sich aber bereits Wege ab, wie man ihr näherkommen kann.

Daneben ist man auch bemüht, ganz andere Verfahren der Energiegewinnung zu erschließen. So trennt man zum Beispiel im *magnetohydrodynamischen Generator* mit Hilfe magnetischer Kräfte die in einem heißen Gasstrahl fliegenden Elektronen und positiven Ionen und nutzt diesen Effekt zur Spannungserzeugung. Im „Brennstoffelement" dagegen bilden Oxydationsvorgänge die Grundlage der Energiegewinnung.

## Die Fernübertragung elektrischer Energie

Bereits auf den ersten Seiten haben wir als einen der wichtigsten Vorzüge der Elektroenergie herausgestellt, daß sie sich über große Entfernungen fortleiten und beinahe „beliebig fein" verteilen läßt. Eine solche Fernübertragung ist mit keiner anderen Energieform möglich. Deshalb hat man sich schon sehr bald nach der Erfindung des Generators damit beschäftigt, elektrische Energie auf größere Entfernungen fortzuleiten.

Nach mehreren Versuchen in sehr kleinem Maßstab erlangte die *Lauffener Übertragung* Weltberühmtheit: Anläßlich der „Frankfurter Internationalen elektrischen Ausstellung 1891" wurden in Lauffen am Neckar, ungefähr 175 km von Frankfurt/Main entfernt, eine Wasserturbine und ein Drehstromgenerator installiert. Der Generator lieferte eine Spannung von 50 V. Sie wurde in Lauffen auf 14000 V transformiert und über Kupferdrähte von 4 mm Durchmesser nach Frankfurt übertragen. Auf dem Ausstellungsgelände wurde diese Spannung durch weitere Transformatoren herabgesetzt und speiste zahlreiche Glühlampen und einen Elektromotor, der die Pumpe eines künstlichen Wasserfalls antrieb.

Damals wie heute stellten sich Nichtfachleute die Frage: Warum muß die Fernübertragung mit einer so hohen Spannung erfolgen, die umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen und teure Isolierungen erfordert?

Grundgesetze der Elektrizitätslehre geben die Antwort: Um eine bestimmte Leistung in die Ferne zu übertragen, könnte man theoretisch eine niedrige Spannung bei hoher Stromstärke oder eine hohe Spannung bei niedriger Stromstärke wählen. Die Entscheidung zugunsten der hohen Spannung folgt aus der Überlegung, daß bei einer Fernübertragung auch die Verluste berücksichtigt werden müssen, die auf der Leitung selbst auftreten. Die Leitung wird durch den Strom erwärmt. Die dabei umgesetzte Leistung ist (vgl. S. 32) durch den Ausdruck gegeben:

$$P_v = I^2 \cdot R$$

Die Verlustleistung steigt mit dem Quadrat der Stromstärke. Sie erreicht bei starken Strömen solche Werte, daß der Nutzen der Übertragung hinfällig würde.

*Beispiel:* Eine Leistung von 50 kW sei als Einphasen-Wechselstrom über eine Entfernung von 200 km zu übertragen. Zur Fernleitung werde Aluminiumdraht von 25 mm² Querschnitt verwendet. Wie hoch sind die Verluste bei verschiedenen Spannungen und Stromstärken?
Wir müssen zunächst den Widerstand der Fernleitung berechnen. Es ist (vgl. S. 16):

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$$

Wenn wir die Zahlenwerte einsetzen (unter Beachtung von Hin- und Rückleitung), erhalten wir:

$$R = \frac{0{,}0286 \, \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 400\,000 \text{ m}}{25 \text{ mm}^2}$$
$$= 457 \, \Omega$$

Sehen wir von einer Phasenverschiebung ab und setzen wir zunächst eine Übertragungsspannung von 5000 V an, wie sie ein Generator unmittelbar abgeben könnte, so fließt wegen $P = U \cdot I$ ein

Leitungsstrom von $I = 10$ A. Damit ergibt sich die Verlustleistung:

$$P_v = I^2 \cdot R$$
$$= 100\ \text{A}^2 \cdot 457\ \Omega$$
$$= 45700\ \text{W}$$
$$= 45{,}7\ \text{kW}$$

Der weitaus größte Teil der zu übertragenden Leistung wird bereits zur Überwindung des Leitungswiderstandes benötigt.
Erhöhen wir die Übertragungsspannung auf 100 kV, dann beträgt die Stärke des Leitungsstromes nur noch 0,5 A, und unsere Rechnung ergibt:

$$P_v = I^2 \cdot R$$
$$= 0.25\ \text{A}^2 \cdot 457\ \Omega$$
$$= 114\ \text{W}$$

Wie erkennen, daß sich die Leitungsverluste durch Erhöhen der Übertragungsspannung entscheidend vermindern lassen.
Eine andere Möglichkeit zur Verlustverminderung bestünde darin, den Leitungswiderstand herabzusetzen. Das liefe auf eine Vergrößerung der Leiterquerschnitte hinaus. Bereits einfache Berechnungen aber zeigen, daß zur Übertragung größerer Energiemengen solche Leiterquerschnitte nötig wären, daß eine Verwirklichung der Energieübertragung aus technischen Gründen ausgeschlossen wäre.
Für die Fernleitung der Elektroenergie gilt daher seit Jahren der Grundsatz: möglichst hohe Spannungen, aber möglichst niedrige Stromstärken. Diesem Grundsatz verdanken die Wechselströme ihre eindeutige Bevorzugung bei der Energieübertragung. Nur einphasiger bzw. dreiphasiger Wechselstrom läßt sich auf einfache Weise, nämlich mit Transformatoren, beliebig herauf- und herabsetzen. Wir müssen hier erwähnen, daß die Herabsetzung am Verbrauchsort ebenso wichtig ist wie das Hochtransformieren im Kraftwerk: In Betrieben und Wohnstätten ist die Anwendung der Elektroenergie nur sinnvoll, wenn

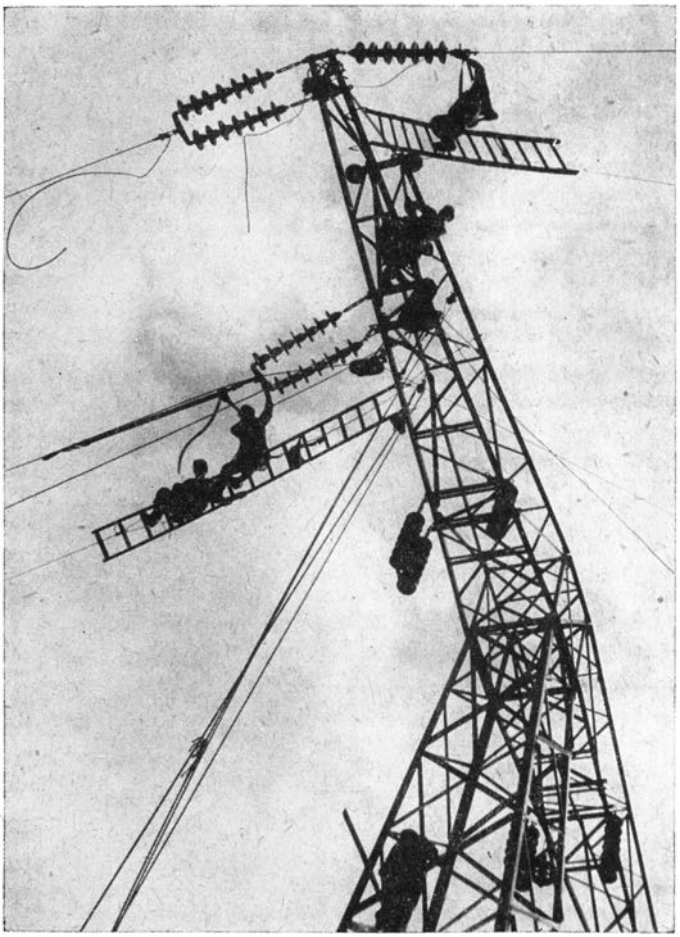


Bild 109 Viele Hände helfen beim Ausbau unseres Energienetzes

man mit billigen Isolierungs- und Installationsmaßnahmen auskommt und die Gefahren des elektrischen Stromes möglichst herabsetzt. Dieses Ziel aber ist nur mit niedrigen Spannungen zu erreichen, wobei die am Verbrauchsort geringen Leitungslängen und Stromstärken dafür sorgen, daß die Verluste gering bleiben.

Noch vor Beginn des ersten Weltkrieges wurden Fernleitungen mit Spannungen von 100 kV in Betrieb genommen. In den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts ging man schon zu Spannungen von 220 kV über. Diese Spannung ist auch heute noch weit verbreitet. Neue Übertragungsleitungen – auch die der DDR – werden allerdings meistens für höhere Spannungen ausgelegt. Verbreitet ist eine Übertragungsspannung von 380 kV, und zur Überbrückung sehr großer Entfernungen, wie sie etwa in der Sowjetunion unvermeidbar sind, geht man inzwischen auf Spannungen von 525 kV und darüber über.

Das Herabsetzen der Spannung geschieht nicht auf einmal, sondern stufenweise. So transformiert man oft zunächst auf 110 kV. Diese Spannung speist dann die Energieversorgung eines Landesteils. In regionalen Netzen wird die Spannung auf einige Kilovolt herabgesetzt, und erst in unmittelbarer Verbrauchernähe wird mit Hilfe zahlreicher örtlicher Transformatoren die uns gewohnte Netzspannung von 220/380 V gewonnen.

Die Energiefernübertragung erfolgt über Freileitungen und über Kabel. In „freiem", unbebautem Gelände werden Freileitungen verlegt. Um Kupfer zu sparen, wird heute als Leitungsmaterial Aluminium bevorzugt. Da Aluminium eine geringere Zugfestigkeit aufweist als Kupfer, greift man häufig zu Aluminiumseilen mit einer Stahleinlage.

Die gewaltigen Isolatoren, die an Hochspannungsfreileitungen zu beobachten sind, deuten bereits an, welche kostspieligen Isolierungsmaßnahmen ergriffen werden müssen, um ein „Entweichen" der Elektroenergie zu verhindern. Es gibt jedoch Verluste und Gefahrenquellen, die durch entsprechende Isolation allein nicht gemeistert werden können. So tritt bei Hochspannungsleitungen der sehr unerwünschte „Koronaeffekt" (vgl. S. 76) auf, durch den Elektroenergie vom Leiter abfließt. Man verringert die Koronaverluste dadurch, daß man statt eines

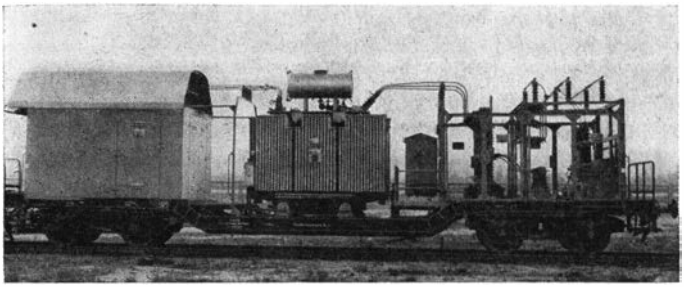


Bild 110 Fahrbare Energieverteilungsanlage

Leiterseils mehrere parallel und in geringem Abstand ausspannt. Solche „Bündelleiter" wirken fast wie dicke Einzelleiter geringer Oberflächenkrümmung; die Koronaverluste sinken. Die Masten und Leiterseile von Energieübertragungsleitungen sind besonders blitzgefährdet. Im Laufe der Zeit wurden zahlreiche Maßnahmen ersonnen, die verhindern, daß durch einen Blitzschlag oder durch eine auf andere Weise entstehende Überspannung das Leitungsnetz und die Verbraucher gefährdet werden.

Drehstrom und auch Einphasenstrom lassen sich zwar auf große, nicht aber auf beliebig große Entfernungen übertragen. Bei Distanzen von etwa 800 km und darüber treten Schwierigkeiten auf, die die Stabilität der Übertragung in Frage stellen. Wir müssen uns Einzelheiten sparen, jedoch sei erwähnt, daß sich unter anderem bei zunehmender Entfernung Selbstinduktion und Kapazität der Übertragungseinrichtungen sehr störend bemerkbar machen.

Diese Schwierigkeiten ließen sich umgehen, wenn man auf den Übertragungsleitungen statt Drehstrom Gleichstrom hoher Spannung fließen lassen würde. Deshalb wird seit mehr als zwanzig Jahren in vielen Ländern die *Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung* diskutiert und erprobt.

Die Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung hat nicht zum Ziel, die gegenwärtige Wechselstromtechnik abzulösen. Nach wie vor wird in den Kraftwerken Drehstrom erzeugt und am Verbrauchsort Drehstrom zur Verfügung gestellt. Nur für die

Fernübertragung wird der erzeugte Drehstrom in Gleichstrom verwandelt. Dazu sind am Streckenanfang *Gleichrichterunterwerke* nötig, während am Streckenende *Wechselrichterunterwerke* den Gleichstrom wieder in Drehstrom zurückverwandeln. Diese Anlagen sind sehr teuer, und es gibt für sie bis heute auch keine voll befriedigende technische Lösung. In mehreren Ländern, zum Beispiel in der Sowjetunion, sind bereits Gleichstrom-Höchstspannungsübertragungen in Betrieb. Sie dienen in erster Linie dazu, Erfahrungen mit dieser Art der Energieübertragung zu sammeln. Erwähnt sei, daß in den vierziger Jahren auch in Deutschland eine Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung versuchsweise aufgebaut wurde. Sie konnte jedoch wegen der Kriegsereignisse nicht mehr in Betrieb genommen werden.

**Der Verbundbetrieb**

In der öffentlichen Energieversorgung kommt es heute nur selten vor, daß ein Kraftwerk über ein „eigenes" Energieverteilungsnetz verfügt und nur „seine" Stromabnehmer mit Elektroenergie versorgt. Meistens wird die Energie zahlreicher Kraftwerke in ein gemeinsames Verteilungsnetz „eingespeist". Man nennt das *Verbundbetrieb*. Der Stromabnehmer erfährt überhaupt nicht, welches Kraftwerk ihn gerade mit Energie versorgt. Oft sogar können wir nicht einmal mehr sagen, ob es „Strom aus der DDR", „tschechischer" oder „polnischer Strom" ist, der unsere Lampen speist und unsere Rundfunkempfänger klingen läßt.

Der Verbundbetrieb hat unschätzbare Vorteile für die Energieversorgung: Würde ein Kraftwerk nur jeweils seine Verbraucher mit Strom versorgen, würde sich jede Havarie, jeder Turbinen-, Generator- oder Transformatorausfall auf sämtliche Verbraucher auswirken. Sie müßten für die Dauer der Havarie auf Elektroenergie verzichten. Man könnte zwar solche Ausfälle durch genügend viele Reserveaggregate in den Kraftwerken ausgleichen; doch wäre das sehr unwirtschaftlich. Havarien sind relativ selten; die Reserveanlagen bleiben meistens unbenutzt. Beim Verbundbetrieb dagegen kann man die „Reservehaltung" auf ein Mindestmaß beschränken; denn es kommt nur selten vor, daß mehrere Kraftwerke oder Aggregate gleichzeitig ausfallen. Havarien sind Sonderfälle. Doch auch im normalen Betrieb

bewährt sich das Verbundnetz. Wasserkraftwerke beispielsweise sind, was ihre Energieerzeugung anbetrifft, vom jeweiligen Wasserangebot abhängig. Im Hochsommer und während langer Frostperioden steht nur wenig Wasser zur Verfügung; während der Schneeschmelze und während anhaltender Regenperioden dagegen kann die verfügbare Wassermenge gar nicht voll genutzt werden. Beim Verbundbetrieb dagegen ist es möglich, die Energieerzeugung der Wasser- und Wärmekraftwerke so aufeinander abzustimmen, daß die Elektroenergie möglichst wirtschaftlich gewonnen wird.

Elektroenergie wird im Laufe eines Jahres und im Laufe eines Tages nicht in gleicher Menge benötigt. Es bedarf keiner Erklärung, daß der Energiebedarf im Winter höher ist als im Sommer; denn im Winter wird viel mehr Strom für Beleuchtungszwecke benötigt als im Sommer, und auch der Bedarf an Elektrowärme ist während der kalten Jahreszeit höher.

Viel deutlicher als die jahreszeitlich bedingten Änderungen sind die Schwankungen des Energiebedarfs im Laufe eines Tages. Hier finden wir zwei ausgeprägte *Lastspitzen*, die Morgen- und die Abendspitze. Sie entstehen dadurch, daß während dieser Zeit die Betriebe, die Haushalte und die Nahverkehrsmittel mehr Strom beziehen als während der übrigen Tagesstunden. Vor allem nachts sinkt der Energiebedarf erheblich.

Würden Kraftwerke jeweils nur für „ihre" Verbraucher betrieben, müßte jedes Kraftwerk so leistungsfähig sein, daß es in jedem Fall den Spitzenbedarf decken könnte. Das würde sehr hohe Investitionen erfordern und wäre überdies äußerst unwirtschaftlich, weil während vieler Stunden die Kraftwerkskapazität nicht ausgenutzt würde.

Ganz anders ist die Situation beim Verbundbetrieb. Hier kann man die *Grundlast*, das heißt den ständig vorhandenen Energiebedarf, durch Kraftwerke decken, deren Energieerzeugung sich nicht schnell regulieren läßt. Das gilt zum Beispiel für Wärmekraftwerke, die viele Stunden benötigen, um „angefahren" zu werden. Man kann außerdem zur Deckung der Grundlast die Kraftwerke einsetzen, die mit dem besten Wirkungsgrad arbeiten.

Zur Deckung des Spitzenbedarfs dienen Kraftwerke, die innerhalb kurzer Zeit Energie liefern können. Das sind vor allem

Wasserkraftwerke, deren Wasserspeicher während der übrigen Tagesstunden die nicht benötigte Energie in Form aufgestauten Wassers „konserviert". Besonders Talsperrenkraftwerke sind für diesen Spitzenausgleich geeignet. Daneben aber gibt es spezielle Spitzenkraftwerke, die als Wärmekraftwerke konstruiert wurden. Hier bieten sich besonders Gasturbinenanlagen an, die sehr schnell angefahren und auch wieder stillgesetzt werden können. Mehrere solcher Gasturbinenwerke wurden in unserer Republik errichtet.

Der Deckung des Spitzenbedarfs dienen auch *Pumpspeicherwerke.* Ein Pumpspeicherwerk ist abwechselnd Energieerzeuger und Verbraucher von Elektroenergie. In Zeiten geringen Energiebedarfs, vorwiegend also während der Nachtstunden, nimmt es die überschüssige Energie der anderen Kraftwerke auf und pumpt Wasser in ein hochgelegenes Speicherbecken. In Zeiten erhöhten Energiebedarfs, während der Spitzenzeiten, läßt man das Wasser wieder in die Tiefe strömen. Es treibt Turbinen und Generatoren, die „Spitzenstrom" an das Energienetz liefern.

In unserer Republik gibt es mehrere leistungsfähige Pumpspeicherwerke. Das Speicherbecken des Werkes Niederwartha zum Beispiel kann so viel Wasser aufnehmen, daß sich damit während der Spitzenzeiten 560000 kWh gewinnen lassen. Das Becken des Pumpspeicherkraftwerkes Hohenwarte II faßt sogar Wasser für die Gewinnung von 2000000 kWh. Pumpspeicherwerke lassen sich ebenfalls innerhalb weniger Minuten anfahren.

Man kann jedoch der Deckung des Spitzenbedarfs nicht nur von der Erzeugerseite her beikommen. Die Energieverbraucher und ihre „Energiedisziplin" spielen hier eine entscheidende Rolle. Haushalte sollten ihren Energiebedarf während der Spitzenzeiten auf das notwendige Maß einschränken. In den Betrieben ist es erforderlich, technologische Vorgänge, die besonders viel Elektroenergie benötigen, auf die Nachtstunden zu verlegen. Der Dreischichtenbetrieb trägt gleichfalls zum Abbau der Lastspitzen bei. Schließlich kann man durch gestaffelten Schichtbeginn der Betriebe die „Schärfe" der Lastspitzen vermindern helfen. Wenn sich auch durch alle diese Maßnahmen das Ideal, der gleichmäßige Energieverbrauch über 24 Stunden, nicht erreichen läßt, so kann man sich ihm doch nähern.

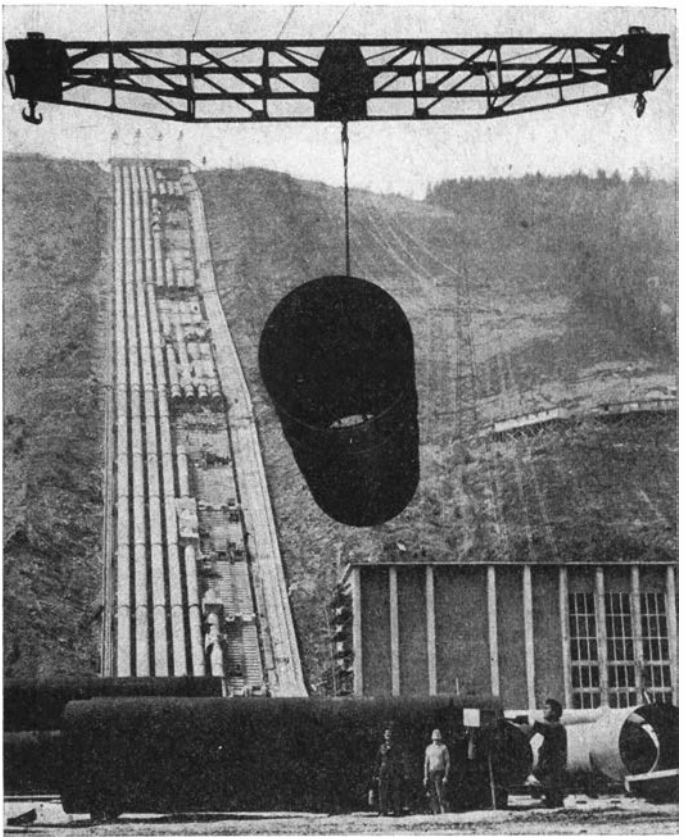


Bild 111 Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte II

Ein Verbundnetz ist um so wirkungsvoller, je weitläufiger es ausgebaut ist. Kleine Länder haben hier längst nicht solche Möglichkeiten wie Staaten, deren Territorium große Gebiete erfaßt. Deshalb bürgert sich mehr und mehr ein Energieaustausch über die Landesgrenzen ein.

Zwei Beispiele sollen den Nutzen illustrieren: Unsere Republik ist ein Land, dessen Energieversorgung hauptsächlich auf

Wärmekraftwerken beruht. Demgegenüber ist in der ČSSR der Anteil der Energieerzeugung aus Wasserkräften höher, weil günstigere natürliche Bedingungen für die Errichtung von Wasserkraftwerken gegeben sind. Da beide Länder Elektroenergie austauschen, können die tschechoslowakischen Wasserkraftwerke helfen, unseren Spitzenbedarf zu decken, während unsere Wärmekraftwerke in lastschwachen Zeiten Elektroenergie in die befreundete ČSSR schicken. Beide Länder haben von diesem Austausch Nutzen.

Der großräumige Energieaustausch ermöglicht es überdies, das Problem der Spitzenlastdeckung von einer ganz anderen Seite anzupacken: Erstreckt sich ein Verbundnetz weit in Ost-West-Richtung, treten im Bereich dieses Netzes die Spitzenzeiten unterschiedlich auf, da Sonnenaufgang und Sonnenuntergang sich verschieben. Während in den westlichen Teilen eines solchen Gebietes zum Beispiel das Netz durch die Abendspitze belastet wird, ist es in den östliche Teilen bereits Nacht, der Energiebedarf ist entsprechend niedrig. Man kann daher aus dem Osten Strom nach dem Westen schicken, um die Abendspitze auszugleichen. In den frühen Morgenstunden kehren sich die Verhältnisse um. Während der Westen des Verbundnetzes noch wenig Energie benötigt, macht sich im Osten bereits die Morgenspitze bemerkbar, und die Energie fließt zum Ausgleich nunmehr von Westen nach Osten.

Solche Überlegungen waren unter vielen anderen dafür maßgebend, daß die Länder des Rates für Gegenseitige Wirtschaftshilfe beschlossen, ein einheitliches internationales Energieverbundnetz zu schaffen. Große Teile, die von einer gemeinsamen Zentrale aus kontrolliert und geleitet werden, sind bereits in Betrieb. Schon heute ist das Verbundsystem „Mir" das größte und leistungsfähigste Energieversorgungsnetz der Welt – und zugleich eine Bestätigung des Lenin-Wortes:

„Kommunismus, das ist Sowjetmacht
plus Elektrifizierung des ganzen Landes."

# Anhang

Wollte man Geräte der Elektrotechnik, des Fernmeldewesens und der Elektronik jeweils so zeichnerisch darstellen, daß alle Bauelemente in ihrem wirklichen Aufbau und maßstabsgerecht, sämtliche Leitungsverbindungen in ihrem tatsächlichen Verlauf erschienen, so entstünden in den meisten Fällen unübersichtliche Zeichnungen. Es wäre sehr schwierig, die einzelnen Stromkreise und das Zusammenwirken der Bauelemente und Baustufen zu erkennen.

Man hat daher – wie es sich ähnlich in der Mathematik und in der Chemie seit langem bewährte – eine Reihe von Symbolen, elektrische Schaltzeichen, geschaffen, die jedem Techniker verständlich sind und mit deren Hilfe sich auch die kompliziertesten Schaltanordnungen relativ einfach und sehr übersichtlich darstellen lassen.

Die elektrischen Schaltzeichen sind meistens so gehalten, daß aus ihnen die charakteristischen Merkmale des Bauelements oder der Baugruppe hervorgehen, die sie vertreten. So zeigt das Symbol des Schalters den Schalthebel, das Symbol der Triode die drei Elektroden, das Symbol des Übertragers die Wicklungen.

Einige der wichtigsten elektrischen Schaltzeichen sind in der Übersicht auf S. 222/223 zusammengestellt. Sie soll dem Leser bei der Lektüre dieses Buches und beim Studium der Fachliteratur helfen.

Wir danken allen Betrieben, die uns Fotos zur Veröffentlichung überließen.
Bilder 15, 16, 22, 74, 93, 108, 109, 111: Foto Ilop

## Wichtige Schaltzeichen der Elektro- und Fernmeldetechnik


Gleichstrom


Wechselstrom (Frequenz kann durch Zahl hinter, Anzahl der Phasen durch Zahl vor dem Zeichen angegeben werden)


Leiter, allgemein


Leitungskreuzung ohne Verbindung


Leitungskreuzung mit Verbindung


Erde


Masse (metallisches Gehäuse usw.)


Widerstand (Wirkwiderstand), allgemein


Widerstand, verstellbar


Widerstand, stufenweise verstellbar


Wicklung, Induktivität, allgemein


Wicklung, Induktivität, mit ferromagnetischem Kern


Übertrager, allgemein


Übertrager, mit ferromagnetischem Kern


Kondensator, allgemein


Kondensator, verstellbar


Galvanische Spannungsquelle (Element, Akkumulator)



Batterie



Gleichstromgenerator, allgemein



Einphasen-Wechselstromgenerator, allgemein



Drehstromgenerator, allgemein



Gleichstrommotor, allgemein



Wechselstrommotor, allgemein



Drehstrommotor, allgemein


Stromsicherung, allgemein


Meßinstrument, allgemein, ohne Kennzeichnung der Meßgröße



Spannungsmesser (Voltmeter)



Strommesser (Amperemeter)


Schalter, einpolig, allgemein


Relais, elektromechanisch


Wecker, allgemein


Leuchtmelder, allgemein, insbesondere mit Glühlampe


Mikrofon, allgemein


Fernhörer, allgemein


Lautsprecher, allgemein


Diode, direkt geheizt


Diode, indirekt geheizt


Diode, mit allgemeiner Katodendarstellung


Triode


Pentode


Thyratron


Halbleitergleichrichter


pnp-Flächentransistor

EVP 5,50 Mark

Elektrische Geräte, Anlagen und Maschinen sind uns vielseitige, zuverlässige Helfer – unentbehrlich am Arbeitsplatz, im Transport-, Verkehrs- und Nachrichtenwesen, aber auch in unseren Wohnungen.
Viele Grundgesetze der Elektrotechnik lassen sich für jeden verständlich darstellen.
So gibt es für jeden auch die Möglichkeit, sie kennenzulernen. Ziel des Buches ist es, diese Bekanntschaft zu vermitteln oder aufzufrischen.
Der Autor, Walter Conrad, behandelt die Grundlagen der Elektrotechnik, zeigt, wie vielseitig sie angewendet werden können und hilft so ein Fundament bauen, mit dessen Hilfe der Leser sein Wissen und seine Kenntnisse erweitern kann.

fv VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG