

Walter Conrad

Elektro- technik

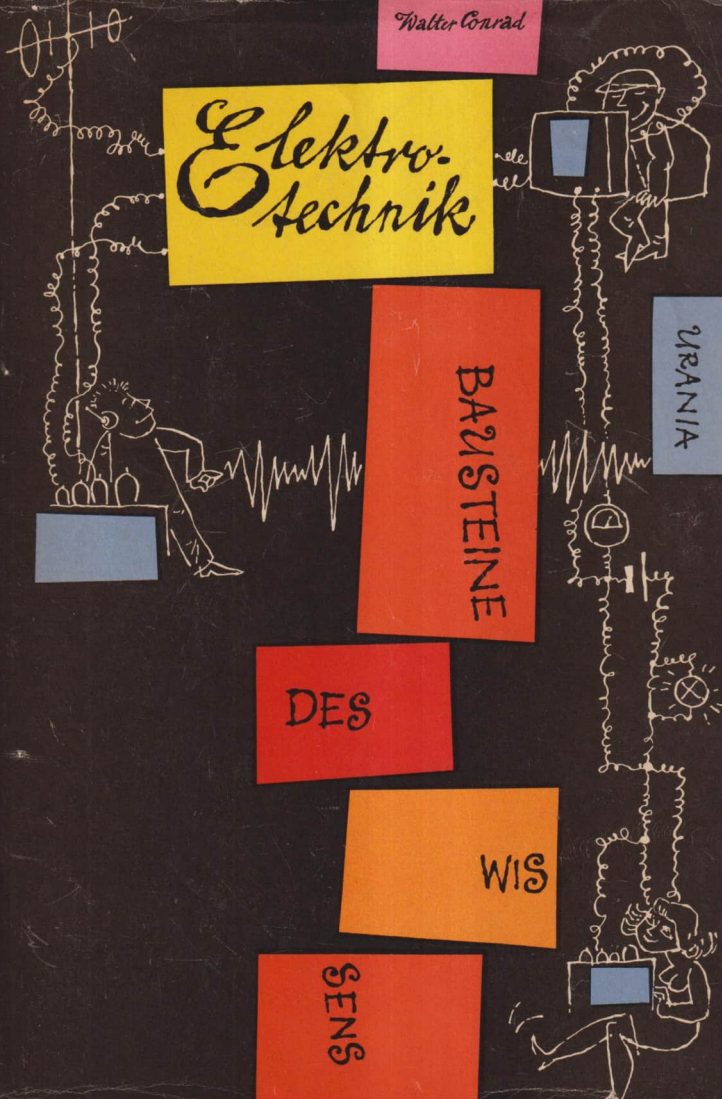
BAUSTEINE

DES

WIS

SENS

URANIA



WALTER CONRAD

Streifzüge durch die Elektrotechnik

LEIPZIG · JENA · BERLIN

Lektor: Ewald Oetzel

1. Auflage 1.–14. Tausend · Alle Rechte vorbehalten
Copyright 1964 by Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin,
Verlag für populärwissenschaftliche Literatur
VLN 212–475/37/64 · ES 20 K 1

Illustrationen, Einband und Schutzumschlag: Heinz Bormann

Lithographien: Meißner & Buch Leipzig

Satz: Graphische Werkstätten Leipzig

Druck und Buchbinderei: VOB Sachsen-Druck Plauen

Printed in the German Democratic Republic



WIR SCHALTEN EIN

Elektrizität – nichts Besonderes?

Wenn Sie die Lektüre dieses Buches in den Abendstunden beginnen, drücken Sie, bevor Sie die erste Seite aufschlagen, den Schaltknopf der Leselampe. Bereits dieser Handgriff führt uns mitten hinein in unser Thema, in die Elektrotechnik.

Sie meinen, es sei kaum erwähnenswert, daß durch Knopfdruck Licht aufflammt, ein Motor anläuft, das Zimmer von Musik erfüllt wird, eine Klingel schellt, ein Aufzug sich in Bewegung setzt? Wir müssen Ihnen recht geben – mit einer Einschränkung: Für Menschen des 20. Jahrhunderts ist das nichts Besonderes.

Doch wie fassungslos hätte Ihr Urgroßvater der elektrischen Beleuchtung gegenübergestanden? Was hätte der vielbesungene Laternenanzünder zum selbsttätigen Ein- und Ausschalten der Straßenbeleuchtung gesagt?

Oder wie wäre wohl heute einem Ingenieur zumute, der eine mehrere hundert Meter lange Gestänge- oder Seilübertragung zum nächsten Wasserrad aufbauen müßte, statt seine Maschinen aus dem Kraft- und Lichtnetz mit Antriebsenergie zu versorgen?

Nur zu leicht vergessen wir, daß allein die Elektrizität uns die Möglichkeit gibt, Energie ohne verlustbringende mechanische Hilfsmittel fast beliebig weit zu transportieren. Erst die Elektrizität stellt, wo immer es nötig ist, große und größte Energiemengen zur Verfügung, die in Sekundenbruchteilen wirksam werden und sich ebenso schnell wieder „abstellen“ lassen. Hätten schon diese Eigenschaften genügt, der Elektroenergie eine Spitzenstellung zuzubilligen, so wird ihre Bedeutung dadurch vervielfacht, daß zahlreiche technische Wunschträume überhaupt nur mit Hilfe der Elektrizität verwirklicht werden konnten.

Wir hören, sprechen, sehen und schreiben „elektrisch“ in die Ferne. Der Zauberstab, mit dem eine Handvoll Menschen riesige Produktionsanlagen steuern oder Raumsonden in den Tiefen des Planetensystems lenken, heißt Elektrizität. Das Ohr, mit dem der Astronom dem „Flüstern“ des Weltraums und der „Radiosterne“

lauscht, bliebe taub ohne elektrischen Strom. Elektrizität zirkuliert in den „Elektronenhirnen“, deren Leistungen uns immer wieder überraschen. Sparen wir uns weitere Beispiele. Jeder von uns wüßte viele elektrische Geräte aufzuzählen, die ihn von früh bis spät umgeben.

„Könnte man Strom in beliebiger Menge und an jedem beliebigen Ort der Erde dem Menschen zur Verfügung stellen, so würde das eine unbeschränkte Hebung des Wohlstandes der Gesellschaft möglich machen“ – so umriß das sowjetische Akademiestmitglied Nikolai Semjonow in einem Interview mit der Presseagentur „Nowosti“ die Bedeutung der Elektroenergie.

Dieses Ziel wird erst in der Zukunft erreicht werden. Gegenwärtig gilt die Deckung des ständig und immer schneller steigenden Bedarfs an Elektroenergie in allen Ländern als eines der vorrangigsten Probleme. Erst genügend viele, kräftige „elektrische Muskeln“ können den Menschen die schweren körperlichen Arbeiten abnehmen. An diesen Muskeln fehlt es vor allem noch in den Gebieten, die sich erst in jüngster Zeit von kolonialer Ausbeutung und Abhängigkeit befreien konnten.

Niemand wird bestreiten, daß die Welt von heute und erst recht die Welt von morgen ohne Elektrizität nicht vorstellbar wäre. Die Folgerung daraus ist zwingend: Wer in dieser Welt lebt, muß die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten der Elektrizität kennen und eine Vorstellung von den zahllosen Anwendungen und Möglichkeiten der Elektrotechnik haben. Wir wollen Ihnen diese Kenntnisse vermitteln helfen.

Elektronen, Spannung, Widerstand

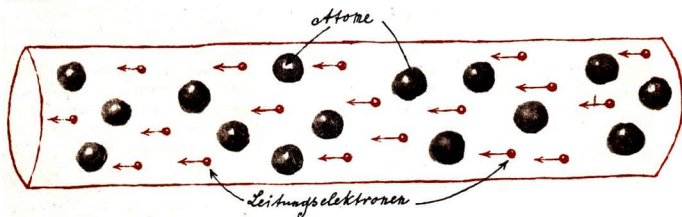
Sobald wir die Leselampe einschalten, fließt elektrischer Strom durch den Leuchtdraht der Glühlampe. Er entsteht durch die gemeinsame Bewegung zahlloser Elektronen – kleinster elektrisch geladener Teilchen. Ihr „Strombett“ sind die Leitungsdrahte und Kabel.

In der Sekunde fließen mehr Elektronen aus dem dicken Leitungskabel in den mächtigen Motor einer Fördermaschine als aus der Anschlußschnur in eine Leselampe. Um genauer vergleichen zu können, muß man eine Maßeinheit der elektrischen Stromstärke einführen. Es ist dies die Einheit „Ampere“ (A), deren Name an den französischen Physiker André Marie Ampère (1775–1836) erinnert. Bei einer Stromstärke von 1 A fließen in der Sekunde fast sechseinhalb Trillionen Elektronen durch jeden Querschnitt des Drahtes (genau: $6,41 \cdot 10^{18}$ Elektronen). Bereits an schwächsten Strömen sind demnach sehr viele Elektronen beteiligt.

Mit einem „reisenden“ Strom haben wir es in Kabeln und Drähten trotzdem niemals zu tun. Die Elektronen rücken in der Sekunde nur um Bruchteile eines Millimeters vor. Dennoch leuchtet eine Lampe sofort auf, sobald wir den Schaltknopf drücken; wir

brauchen nicht zu warten, bis Elektronen von der Steckdose zur Lampe gelangt sind.

Das ist nur scheinbar ein Widerspruch. Alle elektrischen Leitungen sind stets mit Elektronen „gefüllt“. Durch das Einschalten geben wir ihnen die Möglichkeit, sich zu bewegen. Diese Bewegung setzt, ähnlich wie in einem Wasserrohr, in der ganzen Leitung nahezu gleichzeitig ein. Während aber ein Wasserleitungsnetz irgendwann erstmalig volllaufen muß, ist das bei elektrischen Leitungen nicht nötig. Die Elektronen sind Bausteine der Atome und daher von vornherein in allen Körpern in großer Zahl enthalten.



In Stoffen, die den elektrischen Strom gut leiten, in „Leitern“, haben sich Elektronen von den Atomen getrennt. Diese Elektronen übernehmen den Transport der Elektrizität. Deshalb nennt man sie „Leitungselektronen“.

Andere Stoffe, die Nichtleiter oder Isolatoren, leiten den elektrischen Strom nicht. In ihnen gibt es keine – genauer gesagt: so gut wie keine – Leitungselektronen; die Elektronen bleiben an die Atome gebunden.

Wir könnten es mit dieser Zweiteilung bewenden lassen, wenn nicht in der jüngsten Vergangenheit eine dritte Stoffgruppe weite Gebiete der Technik geradezu revolutioniert hätte. Es sind die „Halbleiter“, zu denen chemische Elemente wie Germanium, Silizium, Selen, außerdem zahlreiche anorganische und auch organische Verbindungen gehören. In Halbleitern gibt es zwar ebenfalls Leitungselektronen, aber sie können sich nicht so ungehindert wie in Leitern zwischen den Atomen bewegen; sie unterliegen vielmehr besonderen, recht komplizierten Gesetzmäßigkeiten (s. S. 192).

Elektronen strömen elektrischen Geräten durch einen Leitungsdraht zu, sie „arbeiten“ und fließen durch den anderen Leitungsdraht wieder ab. Über das Kraftwerk schließt sich der „Stromkreis“. Nur in einem solchen Kreislauf kann für längere Zeit elektrischer Strom fließen.

Der Name „Stromerzeuger“ ist demnach eigentlich unzutreffend: Die Generatoren der Kraftwerke, die Lichtmaschinen der Fahr-

zeuge, die Akkumulatoren und Taschenlampenbatterien „erzeugen“ keine Elektronen, sondern halten lediglich den Kreislauf der im Stromkreis ohnehin vorhandenen Elektronen aufrecht. Sie „drücken“ Elektronen in den einen Draht und „saugen“ gleichzeitig Elektronen aus dem anderen. Generatoren und alle übrigen Stromerzeuger sind fast so etwas wie „Druck- und Saugpumpen für Elektronen“.

Am „negativen“ Anschluß des Stromerzeugers entsteht ein Elektronenüberschuß. Der andere Anschluß ist „positiv“. Man vermutete noch in der Mitte des 19. Jahrhunderts, an ihm häufe sich „positive Elektrizität“. Heute weiß man jedoch, daß es sich in Wirklichkeit nur um einen Elektronenmangel handelt. Die positive Elektrizität, der Gegenspieler der negativen Elektronen, bleibt an die Atomkerne gebunden.

Jeder negativ elektrische Körper ist bestrebt, seine überschüssigen Ladungen abzugeben; jeder positiv elektrische Körper dagegen sucht die fehlenden Elektronen zu ergänzen. Zwischen positiv und negativ elektrischen Körpern, zwischen den positiven und negativen Anschlüssen aller Stromerzeuger besteht daher ein Bestreben zum Ausgleich der elektrischen Ladungen. Wir nennen es elektrische Spannung und messen es in Volt, benannt nach Alessandro Volta (1745–1827). Verbinden wir die Anschlüsse durch einen Draht miteinander, so beginnt der Ausgleich. Die Elektronen geraten in Bewegung; es fließt elektrischer Strom. Die Stromerzeuger sorgen dafür, daß der Elektronenüberschuß auf der einen und der Elektronenmangel auf der anderen Seite trotzdem ständig aufrechterhalten bleiben beziehungsweise immer wieder von neuem hervorgerufen werden. Wir wollen daher von jetzt ab richtiger von Spannungserzeugern oder Spannungsquellen sprechen.

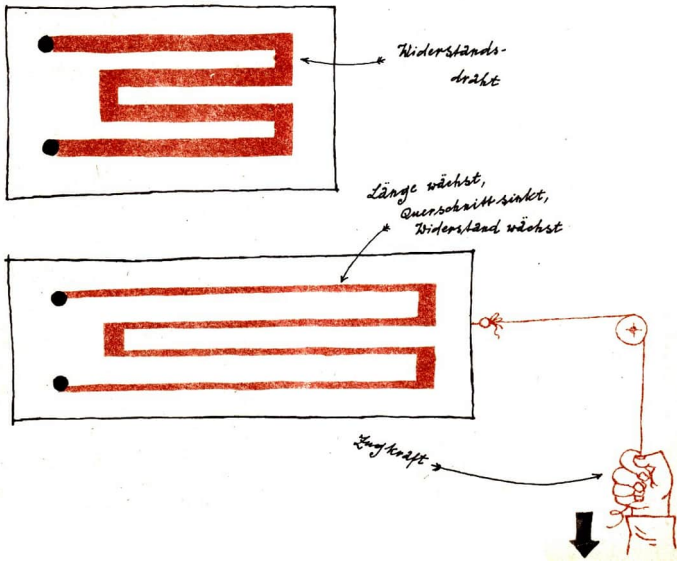
Ohne elektrische Spannung gibt es ebensowenig einen Strom, wie es einen Bach ohne Gefälle geben kann. Die Spannung muß aber nicht in jedem Falle einen elektrischen Strom auslösen. Ein Ausgleich ist unmöglich, wenn die leitende Verbindung zwischen den Anschlüssen der Spannungsquelle fehlt. Zwischen den Buchsen einer Steckdose können wir ständig eine Spannung um 220 V messen, doch nur, wenn wir ein elektrisches Gerät anschließen, wird eine Brücke geschaffen, über die Elektronen wandern.

Neben der Stromstärke und der Spannung begegnet uns der „Widerstand“ als eine Grundgröße der Elektrizitätslehre. Wir messen ihn in „Ohm“ (Ω), zur Erinnerung an Georg Simon Ohm (1789–1854). Elektronen können sich nämlich nicht völlig ungehindert im Leiter bewegen. Das rührt daher, daß die Atome des Leiters nicht in Ruhe verharren, sondern ständig um Gleichgewichtslagen schwingen. Sie verlegen dabei den Elektronen immer wieder den Weg. Diese stoßen mit Atomen zusammen, ändern ihre Bewegungsrichtung und geben Energie an den Leiter ab. Dadurch erwärmt sich das Leitermaterial.



Diese Schwingungen der Atome werden mit steigender Temperatur heftiger, die Zusammenstöße werden häufiger. Infolgedessen wächst der Widerstand eines metallischen Leiters mit der Temperatur. Auch seine Abmessungen beeinflussen den Widerstand: Je dünner und länger ein Draht, desto größer ist sein Widerstand. Vor allem aber wirkt sich das Leitermaterial aus. Silber setzt dem Strom einen geringeren Widerstand entgegen als Kupfer, dieses läßt den elektrischen Strom ungehinderter hindurch als Aluminium, und Aluminium wieder leitet besser als zahlreiche andere Materialien, die wir gleichfalls zu den Leitern rechnen. Zahlenmäßig werden diese Verhältnisse durch den für jeden Stoff charakteristischen „spezifischen Widerstand“ beschrieben.

Dehnt man einen Draht, nimmt sein Widerstand wegen der wachsenden Länge und des sich vermindernenden Querschnitts zu. Das ist die Grundlage der „Dehnungsmeßstreifentechnik“, mit deren Hilfe man die Verformungen von Werkstücken feststellt und registriert. Ein mäanderförmiger Streifen aus Widerstandsmaterial ist auf eine Isolierstoffolie aufgetragen. Sie wird fest mit dem zu untersuchenden Werkstück, etwa einem Maschinenteil, verklebt. Infolgedessen muß dieser Dehnungsmeßstreifen allen Form- und Größenänderungen des Prüflings folgen. Sein Widerstand ändert sich entsprechend. Schickt man Strom durch den Meßstreifen, können die Widerstandsänderungen weit entfernt von der Meßstelle angezeigt und damit die Formveränderungen des Prüflings überwacht werden.



Um bei der Übertragung der elektrischen Energie die Verluste niedrig zu halten, sollen elektrische Leitungen einen möglichst geringen Widerstand haben. Hierbei darf man allerdings nicht nur auf den spezifischen Widerstand des Leitermaterials achten, sondern muß auch technologische und ökonomische Gesichtspunkte berücksichtigen. Silber zum Beispiel ist zwar ein vorzüglicher Leiter, aber als Material für elektrische Leitungen wäre es viel zu kostbar. Nicht einmal Kupfer kann und darf der Elektrotechniker überall einsetzen, denn es ist gleichfalls knapp. Man muß es für Aufgaben sparen, bei denen es unentbehrlich ist. Deshalb hat sich in den vergangenen Jahrzehnten das Aluminium einen Spitzenplatz als Leitermaterial erobert. Sein spezifischer Widerstand ist zwar höher als der des Kupfers, doch kann man das oft wettmachen, indem man den Aluminiumdraht etwas stärker wählt; sein Gewicht bleibt trotzdem noch geringer als das eines Kupferdrahtes gleichen Widerstandes.

Widerstand, Stromstärke und Spannung hängen gesetzmäßig zusammen. Soll ein Strom bestimmter Stärke durch einen Draht hohen Widerstandes fließen, so ist dazu mehr „Druck“, eine höhere Spannung, erforderlich, als wenn der Widerstand gering ist. In einem Leiter bestimmten Widerstandes dagegen steigt die Stromstärke, wenn wir die Spannung erhöhen, weil der „Antrieb“ der Elektronenbewegung zugenommen hat.

Solche Überlegungen und die entsprechenden Experimente hat der deutsche Physiker Georg Simon Ohm angestellt, ehe er sein berühmtes Gesetz formulierte. Es erfaßt die Beziehungen zwischen Spannung, Stromstärke und Widerstand rechnerisch, und es gibt wohl keine elektrische Anlage, kein elektrisches Gerät, bei deren Konstruktion nicht das Ohmsche Gesetz zu Rate gezogen würde. Das Ohmsche Gesetz lautet:

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

oder, wenn wir die üblichen Buchstaben verwenden:

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

Dabei sind die Spannung in Volt, die Stromstärke in Ampere und der Widerstand in Ohm einzusetzen. Es gilt die „Einheitengleichung“:

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

Rechnen wir ein Beispiel. Ein Heizstab für ein kleines Aquarium besitzt einen Widerstand von etwa $4800 \, \Omega$. Welcher Strom fließt bei einer Spannung von $220 \, \text{V}$?

Es ist in diesem Falle:

$$\begin{aligned} I &= \frac{220 \, \text{V}}{4800 \, \Omega} \\ &= 0,046 \, \text{V}/\Omega \\ &= 0,046 \, \text{A} \end{aligned}$$

Ein weiteres Beispiel: Die Heizpatrone eines elektrischen Lötkolbens wird bei $220 \, \text{V}$ Netzspannung von $0,273 \, \text{A}$ durchflossen. Welchen Widerstand muß eine Ersatzpatrone aufweisen?

Zunächst muß die Formel umgestellt werden. Wir erhalten:

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

und mit den gegebenen Zahlenwerten:

$$\begin{aligned} R &= \frac{220 \, \text{V}}{0,273 \, \text{A}} \\ &= 807 \, \text{V}/\text{A} \\ &= 807 \, \Omega \end{aligned}$$

Wir wollen gleich noch zwei weitere elektrische Einheiten kennenlernen. Die Elektronen besitzen Energie, Arbeitsvermögen, das ihnen von den Generatoren im Kraftwerk „aufgeladen“ würde. Die „Stromverbraucher“ – Motoren, Lampen, Bügeleisen, Tauchsieder, Radios – nehmen den Elektronen diese Energie wieder ab. Die Einheit, in der wir die elektrische Energie messen, die Kilowattstunde (kWh), ist allgemein bekannt; sie taucht in den Spalten jeder Stromrechnung auf. Manchmal ist eine kleinere Einheit, die Wattstunde (Wh), zweckmäßiger. Selbstverständlich entsprechen 1000 Wattstunden einer Kilowattstunde.

Wollen wir eine anschauliche Vorstellung davon bekommen, welche Energie eine Kilowattstunde verkörpert, vergleichen wir sie am besten mit einer entsprechenden mechanischen Arbeit; denn mechanische Arbeit können wir aus eigener Erfahrung beurteilen.

Stellen Sie sich einen $3670 \, \text{m}$ hohen Berg vor (das sind rund $100 \, \text{m}$ weniger als die Höhe des Großglockners), auf den Sie mit einer reibungsfrei gedachten Winde eine Last von einer Dezitonne befördern. Sie werden sich dabei einen tüchtigen Muskelkater holen, und doch kommt Ihre ganze Arbeit nur einer Kilowattstunde gleich, für die man Ihnen nach dem Tarif unserer Elektrizität

tätswerke 8 Pfennig bezahlen würde. Führen wir noch einen anderen, leicht zu merkenden Vergleich an: Drei 8-Stunden-Schichten schwerer Muskelarbeit, also etwa Holzhacken, entsprechen ungefähr einer Kilowattstunde.

Im Wort Kilowattstunde verbirgt sich das „Kilowatt“. Es ist die Einheit der elektrischen Leistung. Auch für sie gibt es ein kleineres Maß, das Watt (W) (zur Erinnerung an James Watt, 1736–1819). Die Leistung erhalten wir, indem wir Stromstärke und Spannung miteinander multiplizieren. Liefert ein Generator mit einer Spannung von 200 V eine Stromstärke von 10 A, so beträgt seine Leistung 2000 Watt oder 2 kW; oder fließt durch einen 220-V-Staubsauger ein Strom von 2 A, wird im Staubsauger eine Leistung von 440 W umgesetzt.

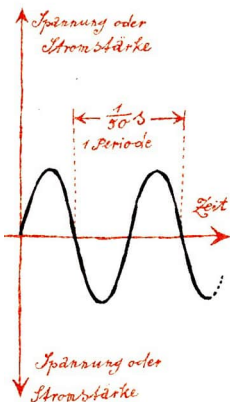
Mit den Muskeln kann der Mensch mehrere Stunden hindurch 70 W leisten. Eine 75-W-Lampe „schafft“ etwa ebensoviel, und schon der Motor eines Handmixers übertrifft unsere mechanische Leistungsfähigkeit mit seinen 80 W oder 90 W.

Noch eine andere Zahl möge zeigen, wie die Elektrizität die menschlichen Kräfte vervielfacht hat. Modernste Generatoren liefern 600 „Megawatt“ (MW), das heißt 600 000 kW oder 600 000 000 W. Das entspricht der Muskelkraft von etwa 8,6 Millionen Menschen. Das Wasserkraftwerk Bratsk in Sibirien ersetzt mit seinen 4500 MW eine Muskelarbeiter-Armee von mehr als 64 Millionen Mann.

Wir gingen davon aus, daß an einem Pol der Spannungsquelle stets Elektronenüberschuß, am anderen Elektronenmangel herrscht. Die Elektronen wandern dann stets vom Minuspol (Überschuß) zum Pluspol (Mangel). Die sogenannte „technische Stromrichtung“ allerdings hat man gerade umgekehrt festgelegt, also von „plus“ nach „minus“. Das geschah zu einer Zeit, als man über die Elektronenbewegung noch nichts wußte, und später behielt man, um nicht Verwirrung zu stiften, die „falsche“ Stromrichtung bei. An den physikalischen Erscheinungen ändert sich dadurch nichts, nur muß man darauf achten, ob von der „Stromrichtung“ oder von der „Bewegungsrichtung der Elektronen“ die Rede ist.

Ströme, die ihre Richtung beibehalten, nennt man „Gleichströme“, die zugehörigen Spannungen heißen „Gleichspannungen“. In Licht- und Kraftleitungen fließt meistens „Wechselstrom“, an der Steckdose liegt eine „Wechselspannung“. Die Elektronen „pendeln“ jetzt im Draht vor und zurück, weil die Pole der Spannungsquelle fortwährend ihre Vorzeichen tauschen. Das geschieht nicht ruckartig; die Spannung wächst bis zu einem Höchstwert, nimmt stetig wieder ab, erreicht den Wert Null, wechselt ihre Vorzeichen, klettert erneut auf einen Maximalwert usf. Spannung und Stromstärke zeigen einen wellenförmigen Verlauf. Er läßt sich durch eine „Sinuskurve“ darstellen.

Ein wichtiges Merkmal jedes Wechselstromes ist die Zahl der



Wie wir noch im einzelnen erfahren werden, rührt die große Bedeutung des Wechselstromes vor allem daher, daß er sich leichter und mit geringeren Verlusten erzeugen, fortleiten und verteilen läßt als der Gleichstrom.

Ein Schalter ist eine Zugbrücke für Elektronen, die hochgezogen und herabgelassen werden kann. Doch wie alle Vergleiche hinkt auch dieser: Eine Zugbrücke muß unmittelbar vor dem Zugang angebracht werden, den sie sperren soll. Beim Schalter dagegen ist es gleichgültig, an welcher Stelle des Stromkreises er angeordnet wird. Wo immer wir die Elektronenbewegung unterbrechen – der Strom hört augenblicklich im ganzen Stromkreis zu fließen auf.

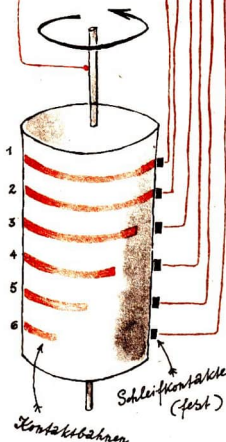
Auf die mannigfachen Ausführungen von Schaltern wollen wir nicht näher eingehen; denn ihr Prinzip bleibt sich immer gleich: Beim Einschalten wird eine metallische Brücke zwischen Kontaktfedern gedrückt, beim Ausschalten wird sie wieder entfernt. Ob dabei ein Knebel gedreht oder ein Hebel gekippt wird, ist gleichgültig.

Die Technik hat uns so verwöhnt, daß wir nicht einmal mehr auf die Uhr sehen wollen, wenn ein elektrisches Gerät zu einem be-



HO HOTEL

Lichtnetz



stimmten Zeitpunkt oder für eine bestimmte Zeitspanne eingeschaltet werden soll. Schaltuhren kommen unserer Bequemlichkeit entgegen. Ihr Arbeitsprinzip ist einfach: Mit dem Räderwerk der Uhr ist ein „Schaltrad“ verbunden, das Kontaktsegmente enthält; solange ein Kontaktsegment eine Schaltvorrichtung betätigt, ist das Gerät in Betrieb.

Schaltuhren erfreuen sich steigender Beliebtheit. Wie angenehm ist beispielsweise eine Radioschaltuhr! Am Morgen weckt sie uns mit Rundfunkmusik, am Abend paßt sie auf, daß wir die Nachrichten oder das Hörspiel nicht versäumen. Nicht genug damit: Besitzen wir ein Tonbandgerät, brauchen wir während einer uns interessierenden Sendung nicht einmal zu Hause zu bleiben. Pünktlich setzt die Schaltuhr Empfänger und Aufnahmegerät in Betrieb, nach der Sendung schaltet sie beide wieder aus. Wir haben vorher lediglich Sender, Tonbandgerät und Aufnahmezeit einzustellen.

Für die Hausfrau ist es eine große Erleichterung, wenn der Elektroherd mit einer Schaltuhr ausgestattet ist. Sie kann einen Topf aufsetzen und das Haus verlassen; nach einer vorher eingestellten Zeit schaltet die Uhr den Herd ab oder stellt eine kleinere Wärmestufe ein.

Selbstverständlich ist der Anwendungsbereich der Schaltuhr damit längst nicht erschöpft. An anderen Stellen ist sie geradezu unentbehrlich. Schon im Fotolabor wäre es schwierig, die Belichtungszeiten für Vergrößerungen genau einzuhalten, wenn nicht eine Schaltuhr die Lichtquelle des Vergrößerungsapparates ein- und ausschaltete. In der Schule sorgt eine Schaltuhr dafür, daß pünktlich zum Stundenbeginn und zur Pause geläutet wird. Im Treppenhaus hilft sie Strom sparen, weil sie die Beleuchtung nur solange eingeschaltet läßt, wie wir benötigen, die Treppen zu steigen. In der Industrie gibt es gleichfalls zahlreiche Arbeitsprozesse, bei denen es auf ein genaues Einhalten einer bestimmten Zeit ankommt; denken wir nur an die Wärmebehandlung von

Werkstoffen, an die Schalteinrichtungen von Schweißmaschinen oder an elektrisch beheizte Trockenanlagen.

Entsinnen Sie sich der Leuchtschrift auf dem Hoteldach? Zuerst leuchten die Buchstaben „HO“, dann flammen nacheinander die Zeichen H...O...T...E...L auf. Für drei oder vier Sekunden verlöscht die Schrift, daraufhin beginnt das Spiel von vorn, Stunde um Stunde, Abend für Abend. Der Mechanismus, der dieses Lichterspiel dirigiert, ist eine Abart der Schaltuhr.

Ein Elektromotor dreht über ein Untersetzungsgetriebe einen Zylinder, in dessen Oberfläche metallische Kontaktbahnen verschiedener Länge eingelassen sind. Sobald eine Kontaktbahn den zugehörigen Schleifkontakt erreicht, wird ein Stromkreis geschlossen; die Lampen in diesem Stromkreis leuchten auf. So schaltet die Kontaktbahn 1 die Buchstaben „HO“, die Kontaktbahn 2 das H von „Hotel“ usf. Je nachdem, wie lang die Kontaktbahnen sind, wie man sie gegeneinander versetzt und wie schnell der Zylinder rotiert, leuchten die Buchstaben für eine längere oder kürzere Zeitspanne.

Durch entsprechend viele und entsprechend lange Kontaktbahnen kann man verschiedenartigste Schaltkombinationen wiederkehren lassen, und zwar nicht nur bei Leuchtschriften, sondern vor allem in der Industrie. Dort sind oft bestimmte Folgen von Arbeitsgängen zu wiederholen. Anstatt Schalter von Hand zu bedienen, läßt sich mit Schaltwalzen eine „Programmsteuerung“ aufbauen, die die Arbeitsgänge in der richtigen Reihenfolge und im richtigen Tempo steuert. Man kann zum Beispiel mit einer Kontaktbahn ein Werkzeug einrücken, mit anderen Kontaktstreifen verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten einstellen und zum Schluß das Werkzeug wieder ausrücken. Durch Auswechseln der Walzen ist das Arbeitsprogramm vielfach zu variieren.

Einbrecher, die dem Laboratorium Edisons einen Besuch abstatten wollten, erhielten eine nachhaltige Lektion in Elektrotechnik. Sie hatten gerade die Schwelle überschritten und die Tür hinter sich ins Schloß gezogen, als schrilles Klingeln ertönte. Weder die plötzlich verriegelte Tür noch die Fensterläden ließen sich schnell genug öffnen, um vor dem Eintreffen der Polizei einen Rückzug zu ermöglichen.

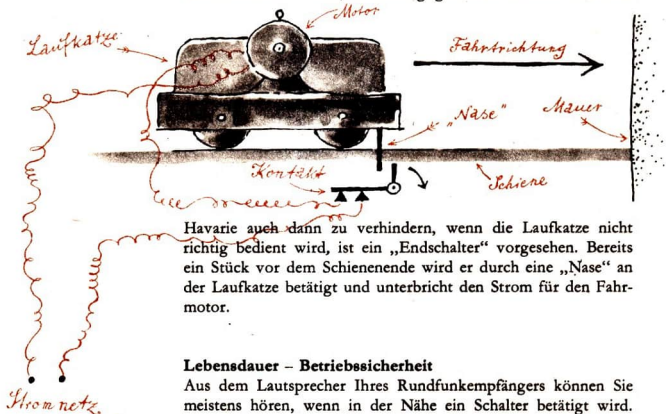
Die Spitzbuben waren Opfer einer recht einfachen Sicherungsanlage geworden: Ein Dielenbrett hinter der Türschwelle federte. Trat man darauf, senkte es sich und schloß einen Kontakt, der nicht nur die Alarmklingel betätigte, sondern auch Türen und Fensterläden elektrisch verriegelte.

Edisons Einbruchsicherung hat viele Nachfolger gefunden: Öffnen wir den Kühlschrank, schaltet sich die Innenbeleuchtung selbsttätig ein; die geschlossene Schranktür drückt über einen Stempel aus Isoliermaterial Kontaktfedern so auseinander, daß der Stromkreis der Innenbeleuchtung unterbrochen bleibt. Beim Öffnen der Tür schließt sich der Kontakt, die Leuchte brennt.



Ähnliche Druckschalter finden sich an Garagentüren, an den Türen von Fahrzeugen oder Bücherschränken, ja sogar in manchen Damenhandtaschen.

Die Laufkatze einer Werkstatt muß, wenn sie sich dem Ende ihrer Schienen nähert, rechtzeitig gebremst werden. Um eine



Havarie auch dann zu verhindern, wenn die Laufkatze nicht richtig bedient wird, ist ein „Endschalter“ vorgesehen. Bereits ein Stück vor dem Schienenende wird er durch eine „Nase“ an der Laufkatze betätigt und unterbricht den Strom für den Fahrmotor.

Lebensdauer – Betriebssicherheit

Aus dem Lautsprecher Ihres Rundfunkempfängers können Sie meistens hören, wenn in der Nähe ein Schalter betätigt wird. Beim Schalten springen an den Kontakten elektrische Funken über. Sie stellen winzige Sender dar, die in Radioempfängern das berüchtigte Knacken hervorrufen.

Die Rundfunkstörungen könnten wir vielleicht hinnehmen, zumal sie sich beim heute bevorzugten Ultrakurzwellenempfang nur noch wenig bemerkbar machen. Viel nachteiliger sind die Folgen für die Schalter selbst: Durch die Hitze der Funken wird die Oberfläche der Schaltkontakte allmählich beschädigt oder verbrannt. Es kann auch vorkommen, daß der Funke nicht abreißt, sondern in einen „Lichtbogen“ übergeht, der weiterbrennt und der nicht nur den Schalter zerstört, sondern auch die Ursache für manchen Kurzschluß oder Brand war.

Man hat vieles unternommen, um die Funkenbildung zu vermindern und das Entstehen eines Lichtbogens zu vermeiden. Besonders beim Schalten großer elektrischer Leistungen ist das sehr schwierig, und groß sind seit Jahrzehnten die Bemühungen um die Entwicklung immer zuverlässigerer Leistungsschalter. Sogar bei den „harmlosen“ Lichtschaltern muß man entsprechende Vorkehrungen treffen: Die Kontaktbrücke wird, um die Zeit für den eigentlichen Schaltvorgang möglichst abzukürzen, durch eine Feder in die Ein- oder Aus-Stellung geschnellt, der Fingerdruck dient lediglich dazu, die Feder zu spannen.

Ein Lichtschalter wird in 24 Stunden allenfalls einige Male betätigt; Schalteinrichtungen der Industrie oder der Nachrichtentechnik dagegen haben oft in einer Stunde viele tausend Schaltungen auszuführen. Wer einmal ein Fernsprechamt besichtigt hat, kennt das ununterbrochene Rattern und Klicken Tausender Kontakte. Diese Beanspruchung läßt die Schalter rasch verschleifen.

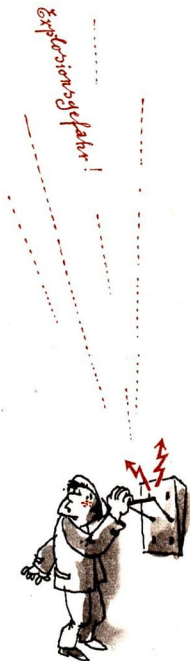
Daraus entstand ein ernstes Problem für die Elektrotechnik und für die Nachrichtentechnik: Die Schalteinrichtungen waren viel kurzlebiger als die übrigen Bauelemente elektrischer und elektronischer Geräte. Sie mußten oft überholt und ausgewechselt werden und gaben trotzdem immer wieder Anlaß zu Betriebsstörungen.

Kann man nicht überhaupt auf bewegliche Kontakte bei Schaltern verzichten? Diese Frage klingt nicht mehr ganz so abwegig, wenn wir die Aufgabe eines Schalters einmal anders als gewohnt formulieren: In der Stellung „ein“ soll er den elektrischen Strom ungehindert durchfließen lassen, ihm also einen möglichst geringen Widerstand entgegensetzen. In der Stellung „aus“ soll der Stromfluß durch einen „unendlich großen“ Widerstand der Schalterstrecke unterbunden werden.

Man mußte also nach Bauelementen suchen, deren Widerstand sich ohne Betätigen mechanischer Kontakte zwischen annähernd Null und fast Unendlich verändern ließ (die Idealwerte Null und Unendlich sind auch mit den üblichen Kontakten niemals zu erreichen). Seit einigen Jahren gibt es kontaktlose Steuereinrichtungen, die diesen Bedingungen genügen. Wir verdanken sie der Halbleitertechnik. So wurden sogenannte „Schalttransistoren“ entwickelt, und es gibt „Schalterdioden“; weitere Halbleiterbauelemente für Schaltaufgaben befinden sich in der Entwicklung und Erprobung.

Bei diesen Halbleiterbauelementen dient eine elektrische Steuerung beziehungsweise ein schwacher Steuerstrom als „Schalt-
hebel“. Es gibt weder Kontaktfunken noch einen Verschleiß. Die Bauelemente verursachen keine Rundfunkstörungen und können wegen der fehlenden Funkenbildung ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen in explosions- und schlagwettergefährdeten Betrieben und Produktionsabteilungen eingesetzt werden. Sie sind außerdem viel kleiner und leichter als herkömmliche Schalter. Während die Arbeitsgeschwindigkeit gewöhnlicher Schalter wegen der mechanisch bewegten Kontakte sehr begrenzt ist, lassen sich mit Halbleiterschaltern viele Tausende Schaltvorgänge in einer Sekunde bewältigen. Ihr Preis, der heute noch verhältnismäßig hoch ist, wird sich senken lassen, sobald diese Bauelemente in großen Serien hergestellt werden.

Man hat durch lange Erfahrung, sorgfältige Analysen und die Anwendung moderner mathematischer Methoden festgestellt, daß auch die verwickeltsten Schaltprogramme sich in eine Folge ein-



facher Operationen zerlegen lassen, ähnlich wie wir die größten Zahlenreihen multiplizieren können, wenn wir den Mechanismus des Multiplizierens und das Einmaleins beherrschen. Das führte dazu, für Steueraufgaben der Industrie standardisierte Schaltbausteine zu entwickeln, die billig und fast unverwüstlich sind, aus denen sich aber durch entsprechende Kombination die verschiedenartigsten Schalt- und Steuereinrichtungen aufbauen lassen. In der Deutschen Demokratischen Republik sind es die vom volkseigenen Apparatewerk Treptow produzierten „Translog-Bausteine“, in denen dieses Prinzip verwirklicht wurde.

HITZE OHNE FLAMMEN

Vom Tauchsieder zur Baustelle

Um den stets vorhandenen Widerstand elektrischer Leiter zu überwinden, ist Energie notwendig; sie erwärmt das Leitermaterial. Diese „Stromwärme“ hat gute und schlechte Seiten.

Meistens ist unerwünscht, daß stromdurchflossene Leiter warm werden. Wir müssen einem Motor nicht nur die Elektroenergie zuführen, die sich in mechanische Energie verwandelt, sondern auch den Energiebetrag, der im Motor und in den Zuleitungen zu Wärme wird. Entsprechende Verluste treten an allen anderen elektrischen Geräten auf. Da die Wärmeentwicklung mit dem Widerstand zunimmt, ist man im allgemeinen bemüht, den Widerstand elektrischer Leiter so niedrig wie möglich zu halten. Lichtleitungen und Anschlußkabel elektrischer Geräte, die einen geringen Widerstand aufweisen, erwärmen sich daher unter normaler Belastung nur unmerklich.

Bei vielen elektrischen Geräten ist dagegen eine fühlbare, manchmal recht erhebliche Wärmeentwicklung nicht zu vermeiden. Alle diese Geräte müssen so konstruiert sein, daß die Wärme rasch abgeführt wird und kein gefährlicher „Wärmestau“ auftritt.

Lampenschirme zum Beispiel haben oft Luftlöcher an der Oberseite. Die von der Glühbirne erwärmte Luft steigt hoch, unten strömt kühle Luft nach. Auf keinen Fall darf man diese Luftlöcher abdecken oder eine Glühbirne mit zu großer Leistungsaufnahme einschrauben; Brandflecken im Lampenschirm wären die unausbleibliche Folge. Luftlöcher gibt es auch bei jedem Rundfunkgerät, jedem Fernsehempfänger und jedem Tonbandgerät: Auf der Achse von Motoren sitzen ventilatorähnliche „Lüfter“, die Kühlluft durch den Motor blasen.

Reicht bei größeren elektrischen Anlagen und Aggregaten diese Art der Kühlung nicht aus, muß man ein besonderes Gebläse anbringen oder die wärmeentwickelnden Teile von einer Kühlflüssigkeit umspülen lassen. Dazu sind manchmal sehr kostspielige Hilfseinrichtungen nötig.



Wenden wir uns der nützlichen Seite der Stromwärme zu. Ihr verdanken wir alle Elektrowärmegeräte. Die meisten unterscheiden sich im grundsätzlichen Aufbau nur wenig voneinander. Der Strom erwärmt „Heizleiter“, die als Drahtwendel, als zickzackförmige Bänder oder auch als Stäbe ausgeführt sind.

Im Gegensatz zu normalen Leitern soll in Heizleitern möglichst viel Wärme erzeugt werden. Man wählt daher Stoffe hohen spezifischen Widerstandes. Sie müssen außerdem chemisch schwer angreifbar sein, da sonst ihre Oberfläche infolge der hohen Betriebstemperatur vom Luftsauerstoff angegriffen würde. Materialien für Heizleiter stehen in reicher Auswahl zu Verfügung.

Greifen wir aus der langen Liste der Elektrowärmegeräte für den Haushalt nur einige heraus. Bei den „Heizsonnen“ wird eine Heizleiterspirale um einen Keramikzylinder gewickelt. Der Heizleiter liegt in einer schraubenförmigen Nute. Ein Metallreflektor wirft die Wärmestrahlung bevorzugt in eine Richtung. Heizsonnen rufen daher nur eine begrenzte Wärmewirkung hervor.

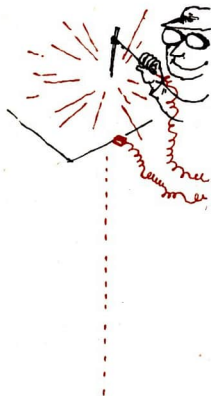
Kleinere Elektroöfen verzichten häufig auf den Reflektor. Ihre Heizleiter sind so angebracht, daß die Luft ungehindert vorbeistreichen kann. Da die erwärmte und infolgedessen spezifisch leichtere Luft nach oben steigt, wird ständig kühle Luft nachgeführt. In „Lufterhitzern“ wird die Luftströmung durch einen Ventilator beschleunigt, dessen Flügel hinter den Heizwendeln laufen. Mit einem Schalter lassen sich mehrere Heizstufen einstellen. Lufterhitzer können einen Raum rasch erwärmen, verbrauchen allerdings viel Elektroenergie.

In Heizsonnen, Elektroöfen und Lufterhitzern liegen die Heizleiter „offen“, auch wenn sie durch Gitter oder Drahtkörbe geschützt sind. In anderen Elektrowärmegeäten bleiben sie dem Auge völlig verborgen. Beim Tauchsieder wird der Heizleiter durch ein Metallrohr gezogen, das zu einer Schleife gebogen ist, um auf kleinem Raum einen langen Heizleiter unterbringen zu können. Kochplatten und Elektroherde werden heute so abgedeckt, daß weder die Hand noch überlaufende Flüssigkeit mit den stromführenden Heizleitern in Berührung kommen kann.

Elektrowärmegeräte sind anderen Wärmequellen in wichtigen Punkten überlegen: Es gibt keinen Brennstofftransport, keine Schlacke und Rauchgase; man braucht weder einen Schornstein noch einen Abzug. Die von Elektrowärmegeäten erzeugte Wärmemenge ist leicht und schnell zu regeln – sei es von Hand oder automatisch. Schließlich arbeiten Elektrowärmegeräte im allgemeinen mit sehr gutem Wirkungsgrad. Ein Elektroofen, eine Heizsonne, ein Tauchsieder geben bis auf einen sehr kleinen Rest die gesamte Wärme an die Umgebung ab. Energieverluste treten kaum auf.

In der Industrie wird die Elektrowärme überall dort genutzt, wo sie einen Produktionsprozeß beschleunigt, seinen Ablauf verbessert oder vereinfacht. Deswegen werden Härte- und Schmiede-





öfen häufig elektrisch geheizt. Ihre Temperatur ist ohne nennenswerte Schwierigkeiten auf einem vorgegebenen Wert zu halten; der Werkstoff wird durch Brennstoffreste oder Verbrennungsprodukte nicht verunreinigt.

Aus dem gleichen Grunde bevorzugt man die elektrische Heizung auch, wenn kleinere Mengen von Metallen oder Gläsern hohen Reinheitsgrades gewonnen werden sollen.

Das Widerstandsschweißen ist ebenfalls eine Anwendung der Elektrowärme. An den Berührungsstellen elektrischer Leiter tritt ein elektrischer „Übergangswiderstand“ auf, der bei loser Berührung recht groß werden kann. Fließt starker Strom, bringt die entstehende Wärme das Metall an den Berührungsstellen zum Schmelzen. Beim Widerstandsschweißen werden die zu verbindenden Werkstücke aufeinandergepreßt, während der Strom durch Elektroden zugeführt wird. Dieses Schweißverfahren ist sauber, schnell und kann weitgehend automatisiert werden. Wir finden Widerstandsschweißautomaten in vielen Betrieben bei der Produktion von Massenartikeln.

Einige Anwendungen der Elektrowärme sind uns – sozusagen aus klimatischen Gründen – weniger bekannt: Um Eis- und Rauheissschichten von den Fahrdrähten elektrifizierter Bahnstrecken zu entfernen, schließt man in der Sowjetunion Abschnitte des Fahrleitungsnetzes vorübergehend gegen die Schienen kurz. Es fließt dann ein so starker Strom, daß sich die Drähte erwärmen und die Eisschicht abschmilzt. Weichen werden durch stromdurchflossene Heizstäbe von Schnee und Eis freigehalten.

Zum Auftauen gefrorenen Bodens wird ebenfalls Elektroenergie herangezogen. Man treibt mit Preßluftschlämmern Elektroden in das Erdreich, die mit einer fahrbaren Kraftstation verbunden werden. Zwischen den Elektroden fließt Strom, der das Erdreich erwärmt. Je nach der Bodentemperatur und der Feuchtigkeit sind für den Kubikmeter Boden 12 kWh bis 20 kWh nötig, um die Temperatur auf den Gefrierpunkt zu erhöhen. Wenn Bau- und Erdarbeiten während der kalten Jahreszeit oder trotz ständig gefrorenen Bodens unbedingt durchgeführt werden müssen, ist der hohe Energieaufwand durchaus gerechtfertigt.

Dürfen wir – oder dürfen wir nicht?

Die Vorzüge der Elektrowärme sind offensichtlich. Um so merkwürdiger scheint, daß die Elektrowärme bisher relativ wenig in unseren Haushaltungen verbreitet ist. Mehr noch: Man „bremst“ ihren Einsatz sogar, indem man uns mahnt, Elektrowärmegeräte wenig und nur außerhalb der Spitzenzeiten einzuschalten, und indem man keinem Betrieb gestattet, Heizsonnen, Elektroöfen, Lufterhitzer beliebiger Leistung und in beliebiger Zahl zu produzieren. Ist das nicht ein Widerspruch zur immer wieder erhobenen Forderung nach Einsatz der fortgeschrittensten Technik?

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir wohl oder übel ein wenig rechnen. Zuvor jedoch ist etwas nachzutragen. Wir messen elektrische Energie in Kilowattstunden; Einheit der Wärmeenergie dagegen ist die Kilokalorie (kcal); das ist die Wärmemenge, die 1 Liter Wasser um 1 °C erwärmt. Um Elektrowärmegeräte zu konstruieren, um ihre Betriebskosten und ihre Wirtschaftlichkeit kalkulieren zu können, muß man das Umrechnungsverhältnis zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie kennen. Aus der Physik ist der Zahlenwert bekannt: 1 kWh entspricht 860 kcal.

Mit einer Kilowattstunde können wir also 860 Liter Wasser um 1 °C erwärmen. Verluste kann der Umwandlungsfaktor nicht berücksichtigen; denn sie sind von Fall zu Fall verschieden. Sehr oft jedoch, zum Beispiel bei Tauchsiedern und Elektroöfen für die Raumheizung, sind sie so gering, daß man sie bei Überschlagerrechnungen nicht zu berücksichtigen braucht.

Was kostet es, ein Zimmer von 18 m² Grundfläche und 2,8 m Höhe elektrisch zu heizen? Aus langjährigen Erfahrungen und eigens angestellten Versuchen weiß man, daß für die elektrische Heizung von Wohnräumen in den Wintermonaten eine Leistung von etwa 50 W/m³ aufzubringen ist. Da unser Zimmer einen Raum von 50 m³ umschließt, ergibt sich als Heizleistung:

$$50 \text{ m}^3 \cdot 50 \text{ W/m}^3 = 2500 \text{ W} = 2,5 \text{ kW}$$

Wir müssen also einen 2,5-kW-Ofen aufstellen. Ist er täglich von 8 bis 22 Uhr, also 14 Stunden, in Betrieb, verbraucht er

$$2,5 \text{ kW} \cdot 14 \text{ h} = 35 \text{ kWh}$$

Da für eine Kilowattstunde 8 Pfennig zu bezahlen sind, kostet uns der Ofen je Tag 2,80 DM, im Monat 84 DM. Das elektrische Heizen wäre also ein sehr teures Vergnügen. Selbst die Vorzüge der Elektrowärme wiegen diesen Preis nicht auf.

Vergleichen wir die Wärmeerzeugung aus elektrischem Strom, Stadtgas und Braunkohlenbriketts miteinander, so kommen die Briketts mit weitem Vorsprung am besten weg. Der Fachliteratur ist zu entnehmen, daß 1 000 000 kcal 93 DM kosten, wenn wir elektrisch heizen, daß ihr Preis bei Verwendung von Stadtgas 59 bis 65 DM beträgt, daß aber zur Gewinnung der gleichen Wärmemenge nur für 24 DM Braunkohlenbriketts verbrannt werden müssen.

Elektroenergie ist nicht ohne Grund teuer, wenn wir sie als Wärmequelle betrachten. Allein der Aufbau eines Kraftwerkes erfordert hohe Investitionen. Zur Elektrifizierung gehört aber noch weit mehr: Das Energieverteilungsnetz mit Umspannwerken, Transformatoren, Schaltstationen, Kabeln, Leitungen und Masten verschlingt gewaltige Summen. Außerdem wird der größte Teil

der Elektroenergie aus Kohle, Erdöl oder Erdgas gewonnen, und diese Brennstoffe müssen erst gefördert, aufbereitet und transportiert werden, ehe sie sich in Elektroenergie verwandeln. Außerdem wird im Kraftwerk die Kohle ebenfalls erst einmal verbrannt, ehe sie uns auf dem Umweg über Turbinen, Generatoren und das Verteilungsnetz ihre Energie zur Verfügung stellt. Wenn auch ein Kraftwerk viel verlustfreier arbeitet als ein Kachelofen, so sind selbst in modernsten Anlagen ungefähr 2000 kcal nötig, um eine Kilowattstunde zu erzeugen.

Doch es sprechen noch viel gewichtigere Überlegungen für den vorläufigen Verzicht auf elektrische Raumheizung. Ein Zimmer *muß* nicht elektrisch geheizt werden. Es gibt aber zahlreiche Produktionsprozesse, die ohne Elektroenergie überhaupt nicht durchführbar wären. Mit den 35 kWh, die wir täglich im Elektroofen „verheizen“, ließen sich beispielsweise 350 kp Zement oder 35 kp Elektrostahl herstellen. Wenn in jedem Haushalt der DDR ein 2,5-kW-Ofen aufgestellt würde, müßten allein für die Speisung der Öfen 12 Kraftwerke von der Größe des Energiegiganten Lütbenau zusätzlich gebaut werden. Selbst die „bescheidene“ 500-W-Heizsonne würde, strahlte sie zur gleichen Zeit in jedem Haushalt der Republik, die Energie mehrerer Großkraftwerke aufzehren.

Es bleibt uns keine Wahl: Solange Elektroenergie knapp ist – und das ist sie heute in den meisten Ländern –, müssen wir mit ihr haushalten, damit sich die Räder der Volkswirtschaft ungehindert drehen. Kann die Welt eines Tages im Energieüberfluß schwelgen, werden Öfen und Kamine bald nur noch in Museen zu besichtigen sein.

Immerhin dürfen wir unter gewissen Bedingungen schon heute elektrisch heizen; es ist dann sogar erwünscht, daß wir es tun. Wir meinen das Heizen mit „Nachtstrom“.

Nachtstrom ist natürlich der gleiche Strom, den wir tagsüber beziehen, nur – er ist um die Hälfte billiger. Nachts sind viele Stromverbraucher außer Betrieb, der Energiebedarf sinkt. Die Kraftwerke aber lassen sich nicht in gleichem Maße drosseln, und es gibt auch keine Möglichkeit, die überschüssige Energie der Nachtstunden in großen Mengen für den folgenden Tag zu speichern. Man muß es daher den Stromkunden „schmackhaft“ machen, auch nachts Elektroenergie zu beziehen. Den Anreiz dazu bildet der billige Nachtarif.

Um ihn auszunutzen, könnten wir einen „Elektrospeicherofen“ aufstellen. Er ist aus massiven Blöcken wärmespeichernden Materials zusammengesetzt, zum Beispiel aus Steinen oder aus Behältern, die mit Kies gefüllt sind. In der Nacht wird die Speichermasse durch Heizleiter auf hohe Temperatur gebracht. Tagsüber ist die Stromzufuhr unterbrochen. Dafür werden Luftklappen geöffnet. Die kühle Zimmerluft streicht durch den Ofen und erwärmt sich. Am Abend setzt ihn eine Schaltuhr wieder in Betrieb.

Im Zimmer unseres Rechenbeispiels würden wir etwa einen 4-kW-Speicherofen anschließen, der von 22 Uhr bis 6 Uhr eingeschaltet wird. Er verbraucht während dieser Zeit 32 kWh, die wegen des Nachttarifs von 4 DPF/kWh nur 1,28 DM kosten. Der Betrieb ist also etwa um die Hälfte billiger geworden! Ähnlich wie ein Nachtspeicherofen funktionieren auch Heißwasserspeicher, die nachts eine größere Wassermenge erhitzen. Ihre Wasserbehälter sind so gut gegen Wärmeverluste isoliert, daß noch viele Stunden nach dem Aufheizen Heißwasser entnommen werden kann.

Infrarot: Wärme aus der Glühlampe

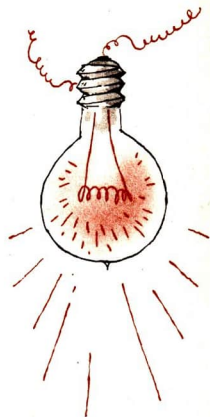
Wissenschaftler, Techniker und Facharbeiter aus vielen Ländern haben dazu beigetragen, daß die Glühlampe zu einem der alltäglichsten und unentbehrlichsten Gebrauchsgegenstände wurde. Wir wollen nur drei Namen nennen: Heinrich Goebel (1818–1893), der 1854 die ersten, noch sehr anfälligen Glühlampen schuf, Alexander Nikolajewitsch Lodygin (1847–1923), dessen Lampen 20 Jahre nach Goebel den Platz vor der Petersburger Admiralität in helles Licht tauchten, und endlich Thomas Alva Edison (1847 bis 1931), der der „Birne“ ihre heutige Form gab und zahlreiche Verbesserungen ersann, die der Einführung der Glühlampe den Weg ebneten.

Die Entwicklung der Glühlampe hat einen gewissen Abschluß erreicht; „Sensationen“ sind kaum noch zu erwarten. Die Glühlampen aus allen Ländern ähneln sich wie ein Ei dem anderen. In einem klaren oder mattierten Glaskolben ist der Wolfram-Leuchtdraht ausgespannt. Er ist zu feinen Wendeln zusammengedreht und wird durch elektrischen Strom bis zur Weißglut, etwa auf 2500 °C, erhitzt. Der Glaskolben ist evakuiert, damit der Leuchtdraht nicht verbrennt, oder er wird, um dem „Zerstäuben“ des heißen Leuchtdrahtes zu begegnen, mit einem chemisch inaktiven Gas – Stickstoff, Krypton oder Argon – gefüllt.

Bei allen Verbesserungen der Glühlampe blieb ein Problem jedoch ungelöst: Ihr Wirkungsgrad ist beschämend niedrig. Nur wenige Prozent der zugeführten Elektroenergie werden in Licht umgewandelt; der „Rest“ wird zu Wärme. Sie belastet das Energieversorgungssystem, erhöht die Stromrechnungen und muß bei der Konstruktion von Lampen und Leuchten berücksichtigt werden.

Damit ist gerechtfertigt, daß wir die Glühlampe in diesem Kapitel erwähnten. Sie ist eigentlich ein Elektrowärmegerät, das nebenbei Licht abstrahlt.

In Lampen mit Gasfüllung überträgt sich die Wärme vor allem vom Leuchtdraht auf das Gas, und dieses leitet sie an den Glaskolben weiter. Warum werden aber die Kolben luftleer gepumpter Glühlampen ebenfalls heiß? Das hat die gleiche Ursache, der wir

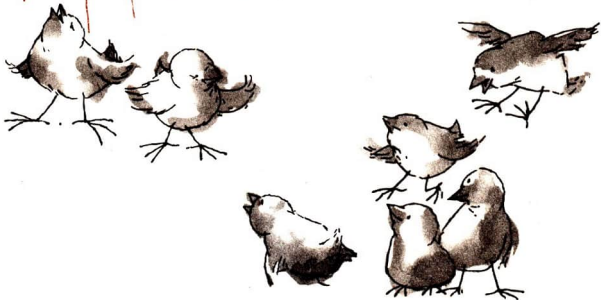


auch verdanken, daß die Sonnenwärme durch den fast leeren Weltraum zu uns kommt:

Wärme braucht zur Übertragung nicht unbedingt einen Stoff. Sie kann sich als Strahlung – wie Licht, Funkwellen oder Röntgenstrahlen – im leeren Raum ausbreiten. Die Wärmestrahlung gehört zur großen Familie der elektromagnetischen Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und sich nur durch bestimmte physikalische Eigenschaften sowie durch die Methoden ihrer Erzeugung und ihres Nachweises unterscheiden.

Betrachten wir das Spektrum des sichtbaren Lichts, die „Regenbogenfarben“. Es hört, wenn wir zu immer kürzeren Wellenlängen übergehen, nicht plötzlich mit „Violett“ auf, sondern es schließt sich das unsichtbare „Ultraviolett“ an, dessen Einfluß wir unter anderem die sommerliche Hautbräune verdanken. Verkürzen wir die Wellenlänge weiter, gelangen wir zu den Röntgenstrahlen. Auch in Richtung zu längeren Wellen gibt es keine scharfe Grenze des Lichtspektrums. Dem sichtbaren „Rot“ folgt das „Ultra- oder Infrarot“. Wir können es zwar nicht mehr sehen, aber – fühlen; denn Infrarotstrahlung ist Wärmestrahlung!

Genaugenommen sendet jeder Körper infrarote Strahlen aus; denn jeder Körper ist mehr oder weniger „warm“, weil seine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes liegt. Fühlbar wird die Infrarotstrahlung allerdings erst, wenn die Temperatur eines Körpers höhere Werte erreicht. Das trifft für die Glühlampe zu. Sehr bald hat man sich deshalb gefragt, ob man diese Tatsache nicht bewußt ausnutzen und sich so eine neue Wärmequelle erschließen könne. Solchen Überlegungen entsprangen die sogenannten Infrarot-Hellstrahler. Sie sind ähnlich wie eine Glühlampe aufgebaut, arbeiten jedoch bei etwas niedrigerer Glühfadentemperatur. Dadurch wirkt das Licht gelblich. Die Lichtausbeute bleibt gering, während der Anteil der Infrarotstrahlung wächst. Ein reflektierender Metallbelag im Glaskolben wirft den größten Teil der Strahlung nach vorn.



Neben Hellstrahlern kennt man Infrarot-Dunkelstrahler. Sie arbeiten bei so niedriger Temperatur, daß man sie allenfalls noch glühen sieht. Man braucht ihre Oberfläche nicht mehr sorgfältig vor dem Luftsauerstoff zu schützen, da wegen der niedrigeren Betriebstemperatur die Oberfläche durch den Luftsauerstoff kaum noch angegriffen wird. Während Hellstrahler meistens in eine Lampenfassung eingeschraubt werden können, gibt es Dunkelstrahler in vielerlei Formen: als bienenkorbähnliche Gebilde, als Stäbe, gebogene Röhren usf.

Auch in Heizsonnen und Elektrowärmegegeräten des Haushalts finden wir oft Infrarotstrahler. Wir können an diesen Geräten eine wichtige Eigenschaft der Infrarotstrahlung kennenlernen: Sitzen wir vor einem Infrarotstrahler, so empfinden wir an den von der Strahlung getroffenen Stellen des Körpers wohlige Wärme; die Temperatur der Zimmerluft steigt dabei nur unwesentlich. Luft ist für Infrarotstrahlen verhältnismäßig gut durchlässig. Infolgedessen tritt die Wärme erst dort auf, wo die Strahlung gegen ein Hindernis prallt. Es ist deswegen auch nicht ganz richtig, von Infrarot-Raumheizung zu sprechen. Befinden wir uns in einem Raum, in dem Infrarotstrahler so geschickt verteilt sind, daß wir stets von ihrer Strahlung getroffen werden, so „wird uns warm“, während die Luft selbst kühl bleibt. Derartige Infrarotheizanlagen werden häufig in Gaststätten oder auf Freiterrassen angewandt, damit man an Frühlings- oder Herbsttagen im Freien sitzen kann. Auch in Badezimmern bürgern sich Infrarotstrahler immer mehr ein.

In der Industrie hat die Infrarotstrahlung ein weites Anwendungsfeld gefunden. Farben, Lacke, Chemikalien, keramische Erzeugnisse, Lebensmittel müssen getrocknet werden. Früher war man vor allem auf die Lufttrocknung angewiesen. Sie dauerte lange und brachte deshalb die Gefahr mit sich, daß sich auf den zu trocknenden Gegenständen, etwa auf lackierten Produkten, Staub- und Schmutzteilchen absetzten. Auch das Trocknen im Warmluftstrom brachte keinen grundsätzlichen Wandel.

Rüstet man Trockenanlagen mit Infrarotstrahlern aus, entfallen diese Nachteile. Durch entsprechende Anordnung der Strahler können auch große Flächen völlig gleichmäßig getrocknet werden. Dadurch vermeidet man zum Beispiel die gefürchteten „Lackrisse“. Die Trockengeschwindigkeit hat sich durch den Einsatz der Infraroterwärmung vervielfacht. Ganze lackierte Fahrzeugkarosserien können getrocknet werden, indem sie langsam durch einen „Trockentunnel“ mit zahlreichen Infrarotstrahlern gezogen werden.

Keks, Zwieback und anderes Kleingebäck werden am laufenden Band im Infrarottunnel gebacken. Nasse Papierbahnen werden durch Infrarotstrahlung getrocknet, Fische und Obst werden gedörrt, wobei wegen der Kürze des Dörrvorganges viel weniger verderben kann als bei tagelangem Lufttrocknen.



ELEKTROMAGNETEN: KRAFT DURCH ELEKTRIZITÄT

Nur ein stromdurchflossener Draht . . .

Hufeisenförmig, als Stab oder als Plättchen ist uns der Magnet im Spielzeug und später bei mancherlei anderer Gelegenheit begegnet. Niemand wundert sich, daß die „Kraft“ eines Magneten immer vorhanden ist und sich im Laufe der Zeit nur wenig ändert. Als viel merkwürdiger würden wir es empfinden, wenn sich ein Magnet „abstellen“ ließe oder wenn wir seine Kraftwirkung nach unserem Willen verändern könnten.

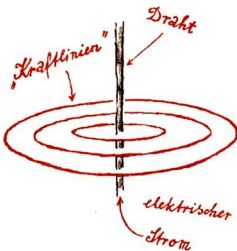
Dabei gibt es solche ein- und ausschaltbare, regulierbare Magneten. Sie übertreffen an Zahl und Bedeutung sogar bei weitem die „natürlichen“ Magneten, mit denen die Kinder spielen.

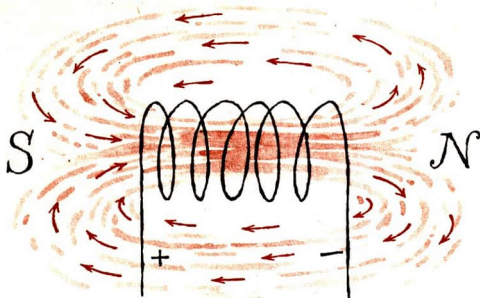
Es war eine der fruchtbarsten und folgenreichsten Entdeckungen für die Entwicklung der Elektrotechnik, als der dänische Physiker Hans Christian Oersted (1777–1851) feststellte, daß von einem stromdurchflossenen Draht gleiche magnetische Wirkungen ausgehen wie von einem Hufeisen- oder Stabmagneten. Eine Kompaßnadel wird abgelenkt, Eisen, Stahl und Nickel werden angezogen. Die magnetischen Wirkungen verschwinden, sobald der Strom ausgeschaltet wird; ihre Intensität hängt von der Stromstärke im Draht ab.

Um diese Wirkungen näher zu beschreiben, verwendet man beim „Elektromagnetismus“ die gleichen Hilfsbegriffe und Modellvorstellungen wie bei natürlichen Magneten. Den Raum, in dem die magnetischen Wirkungen auftreten, nennen wir „magnetisches Feld“, ebenso wie wir vom Schwerfeld der Erde überall dort sprechen, wo Schwerkraftwirkungen nachzuweisen sind. Um eine anschauliche Vorstellung vom magnetischen Feld zu bekommen, prägte Michael Faraday (1791–1867) den Hilfsbegriff der „magnetischen Kraftlinien“. Sie verlassen den Magneten an einem Pol, durchlaufen die Luft oder ein anderes Medium und treten in den anderen Pol wieder ein. Im Inneren des Magneten denkt man sie sich fortgesetzt.

Sicherlich entsinnen Sie sich noch, wie der Verlauf der Kraftlinien sichtbar gemacht werden kann: Der Magnet wird mit einem Kartonblatt bedeckt, auf das Eisenfeilspäne gestreut werden. Diese ordnen sich zu charakteristischen Kurven und Ketten, die dem Kraftlinienverlauf entsprechen. Merken wir uns noch, daß die Richtung der Kraftlinien in jedem Punkte des Magnetfeldes die Wirkungsrichtung der magnetischen Kräfte bezeichnet und daß die Kraftlinien besonders dicht dort verlaufen, wo die magnetischen Wirkungen sehr deutlich und kräftig sind.

Würden wir das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Drahtes mit Eisenfeilspänen untersuchen, könnten wir feststellen, daß die Kraftlinien konzentrische Kreise um den Draht bilden. Sehr auffällig sind die Wirkungen, die von einem stromdurchflossenen

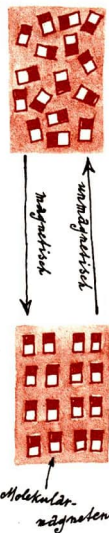




Draht ausgehen, jedoch nicht – es sei denn, die Stromstärke ist sehr groß. Wollen wir die Wirkungen vervielfachen, müssen wir den Draht zu einer Spule zusammenwickeln. Dann addieren sich die magnetischen Wirkungen der einzelnen Drahtwindungen, und wir erhalten einen „Elektromagneten“, dessen Feld dem eines „natürlichen“ Stabmagneten zum Verwechseln ähnlich sieht. Hängen wir die Spule leicht drehbar auf, schwenkt sie wie eine Magnetnadel in die Nordsüdrichtung ein.

Ein Elektromagnet ist um so kräftiger, je mehr Windungen seine Spule hat. Außerdem kommt es auf die Stromstärke an. Wird sie erhöht, nehmen die magnetischen Wirkungen zu. Man kann die magnetischen Wirkungen einer Spule aber auch ohne Erhöhung der Stromstärke oder der Windungszahl auf einen mehrtausendfachen Wert bringen, indem man den Innenraum der Spule mit einem Weicheisenkern füllt. Man führt diese Verstärkung auf „Molekularmagneten“ zurück. Der Eisenkern enthält eine große Zahl winziger Magnete. Solange diese Molekularmagneten ungeordnet durcheinanderliegen, heben sich ihre Wirkungen auf. Das Eisen erscheint unmagnetisch. Dreht man dagegen die Molekularmagneten so, daß sämtliche Nordpole nach einer, die Südpole nach der anderen Seite weisen, verstärken sie sich in ihrer Wirkung. Der Magnetismus macht sich nach außen hin bemerkbar.

Im Weicheisenkern der Spule werden die Molekularmagneten durch den Spulenstrom ausgerichtet. Sie unterstützen dadurch das Kraftfeld der Spulenwindungen. Schalten wir den Strom ab, fallen die Molekularmagneten wieder durcheinander. Nur wenige bleiben ausgerichtet; daraus erklärt sich, daß der Weicheisenstab stets einen gewissen Restmagnetismus aufweist. In Stahl bewahren die Molekularmagneten auch nach Abschalten des Stromes ihre Stellung. Der Stab wird zum „Dauermagneten“. Man kann daher mit Hilfe einer stromdurchflossenen Spule Dauermagneten vorgegebener Stärke herstellen.



Bringt man ein Eisen- oder Stahlstück in ein Magnetfeld, so verändert dieses seine Form. Es scheint, als konzentrierten sich die Kraftlinien im Eisen. Wickelt man eine Spule auf einen ring- oder rahmenförmigen Eisenkern, treten überhaupt keine Kraftlinien in die Luft über; sie verlaufen sämtlich im Eisen.



Allerlei Anziehendes und Abstoßendes

Bereits ein kleiner Elektromagnet kann tausendfach stärkere Kräfte ausüben als der größte natürliche Magnet. Daß man die Anziehungskraft des Elektromagneten überdies an- und abstellen oder regulieren kann, hat den Elektromagneten zu einem der verbreitetsten Bauelemente der Elektrotechnik werden lassen.

Wir brauchen dabei nicht unbedingt sofort an die Monteuire zu denken, die sich mittels elektromagnetischer Schuhsohlen auf der Außenhaut eines Raumschiffes gefahrlos bewegen können. Weit- aus irdischer und seit langem bewährt sind Hubmagneten zum Befördern von Eisen- oder Stahlteilen. Man ist heute nicht mehr darauf angewiesen, Maschinenteile oder Haufen sperrigen Schrotts mit Drahtseilen oder in Transportgefäßen am Kranhaken aufzu- hängen. Es genügt, einen Lasthebemagneten herabzusenken und den Strom einzuschalten. Schon hängen die Teile fest und können befördert werden. Wieviel Arbeitskraft und Arbeitszeit dadurch gespart werden, bedarf keiner Erörterung.

Seit Jahrzehnten werden Werkstücke auf Werkzeugmaschinen magnetisch eingespannt. Die Stelle der Klemmbacken nehmen Elektromagneten ein. Ein Knopfdruck genügt, um die Werk- stücke festzu-, „klemmen“, ein zweiter gibt sie nach der Bearbeitung wieder frei.

Als „Metallabscheider“ ziehen Elektromagneten selbsttätig Eisen- und Stahlteile aus Schüttgut, das über Transportbänder zur weiteren Verarbeitung gleitet. Auf ähnliche Weise trennt man magnetische Erze vom tauben Gestein. In der Chirurgie werden Eisenteilchen, die etwa in das Auge gedrungen sind, mit Hilfe von Elektromagneten entfernt.

Saatgut kann von Unkrautsamen befreit werden, indem man es mit feuchtem Eisenpulver bestreut und auf einer rotierenden Trommel über einen Elektromagneten führt. Weil das Pulver an den rauen Unkrautsamen, nicht aber an den glatten Saatgut- körnern haftet, werden nur die Unkrautsamen vom Magneten festgehalten.

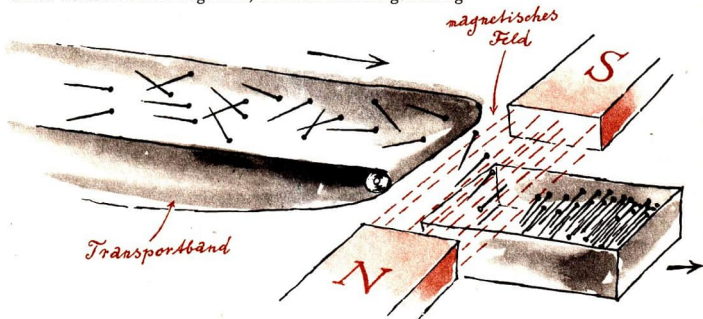
Sowjetische Techniker entwickelten eine auf ähnlichen Prinzipien beruhende Vorrichtung zum Reinigen von Kühl-Schmiermitteln, die im Maschinenbau in großen Mengen anfallen. An der Innenseite einer Aluminiumtrommel sind zahlreiche kleine Elektromagneten angebracht. Die Trommel sitzt in einem Messingzylinder, der so bemessen ist, daß zwischen Zylinder und Trommel nur ein enger Spalt bleibt. Dabei werden Eisen- und Stahlspäne fest-

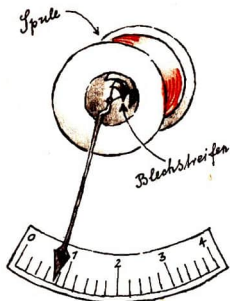
gehalten und bilden „Bürsten“, die als Filter für alle weiteren Verunreinigungen wirken. Haben sich diese Bürsten vollgesetzt, wird durch Drehen der Trommel der Schmutz mitsamt den Bürsten abgestreift. Der Reinigungsvorgang kann erneut beginnen.

Die Form von Flugzeugen und Raketen wird durch eingehende Versuche im Windkanal bestimmt. Modelle von Überschallflugzeugen und Raketen müssen bei sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten untersucht werden. Dabei verfälschen die Aufhängebeziehungsweise Stützvorrichtungen der Modelle die Meßwerte erheblich. Man umgeht neuerdings diese Schwierigkeiten durch eine „magnetische Aufhängung“. Die Modelle, die nunmehr aus Weicheisen bestehen oder einen Weicheisenstab enthalten müssen, werden ausschließlich durch magnetische Kräfte getragen; diese rühren von Elektromagneten außerhalb des Windkanals her. Selbsttätige Steuervorrichtungen sorgen dafür, daß jeder Versuch des Modells, zur Seite auszuscheren, sofort durch magnetische Gegenkräfte vereitelt wird.

Im vergangenen Jahrhundert hat man sich, wenn auch vergeblich, bemüht, Schußwaffen zu konstruieren, deren Geschosse durch elektromagnetische Kräfte auf die notwendige Geschwindigkeit beschleunigt werden sollten. Auch Projekte für Schnellbahnen und für die Postbeförderung tauchten auf; ihre Antriebskräfte sollten Magnetspulen liefern, die den Bahnkörper in dichter Folge umfaßten.

Nägel, lange Schrauben, Nadeln und andere Kleinteile der Massenfertigung liegen meistens säuberlich parallel in ihren Verpackungen. Hätten Sie vermutet, daß oftmals ein Elektromagnet die Teile in die Parallellage dreht? Auf dem Transportband werden die Teile, nach allen Richtungen durcheinanderliegend, herangeführt. Wenn sie vom Vorderende des Bandes in die Schachtel fallen, passieren sie ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien fast geradlinig von einem Magnetpol zum anderen verlaufen. Im Fallen werden die Teile so gedreht, daß sie in ihrer Längsrichtung





von den Kraftlinien durchsetzt werden. Sie gelangen daher sämtlich in gleicher Stellung in den Verpackungskarton.

Da die magnetischen Wirkungen von der Stromstärke abhängen, kann man sie benutzen, um Stromstärken zu messen. Für erste Versuche würde es genügen, einen Draht in einigen Windungen um einen Kompaß zu schlingen. Die Auslenkung der Kompaßnadel durch den Strom gibt dann ein Maß für die Stromstärke. Tatsächlich hat man für Forschungszwecke Meßinstrumente nach diesem Prinzip gebaut. Für einen Einsatz in der Technik sind sie jedoch wenig geeignet.

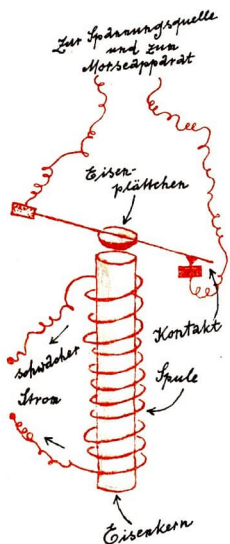
Weit verbreitet ist das „Dreheiseninstrument“. In seiner Spule finden wir zwei Eisenblechstreifen. Einer ist an der Spule befestigt, der andere kann zur Seite ausweichen, wobei er einen Zeiger gegen die Spannkraft einer Feder dreht. Wird die Spule von Strom durchflossen, werden die Eisenstreifen magnetisiert, und da an ihren Vorder- und Hinterenden gleiche Magnetpole entstehen, stoßen sie einander nach einem Grundgesetz des Magnetismus ab. Der bewegliche Streifen weicht, der abstoßenden Kraft und damit der Stromstärke entsprechend, zur Seite aus und führt den Zeiger über die Skala.

Der Magnet und die Kontakte

Immer wieder stießen die Pioniere der Telegrafentechnik auf das gleiche Problem: Über größere Entfernungen waren ihre Verbindungen nicht betriebssicher. Die Telegrafierströme wurden auf den langen Strecken so geschwächt, daß sie die robusten Morseapparate nicht mehr zum Ansprechen brachten. Die Fahrer der Überlandpost hatten es besser. Sie konnten nach einer bestimmten Wegstrecke ihre ermüdeten Pferde in einer „Relaisstation“ gegen ausgeruhten Vorspann tauschen. Ließen sich nicht auch die schwachen Telegrafierströme durch kräftige Ströme ersetzen?

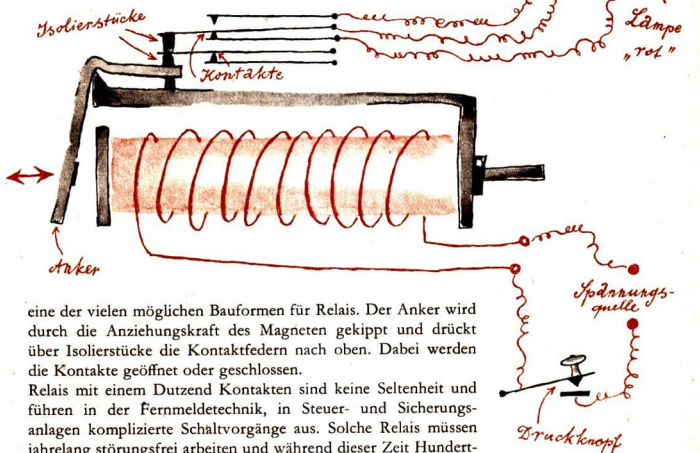
Betrachten wir die Skizze. Vor einer Magnetspule, die einen Eisenkern und sehr viele Drahtwindungen enthält, schwebt eine federnde Zunge mit einem Eisenplättchen. Sie wird angezogen, solange Strom durch die Spule fließt. Dabei schließt sich der Schaltkontakt. Damit haben wir schon das gesuchte „Relais“: Durch die Magnetspule werden die schwachen Telegrafierströme geschickt; der Schaltkontakt wird mit dem Morseapparat und einer leistungsfähigen Spannungsquelle zu einem Stromkreis verbunden. Hat die Magnetspule genügend viele Windungen, reichen die im Takte der Morsezeichen fließenden Telegrafierströme aus, die leichte Zunge anzuziehen. Diese steuert den Telegrafienapparat im Rhythmus der Morsezeichen.

Die Erfindung des Relais vervielfachte die Reichweiten der Telegrafieverbindungen; denn man konnte auf langen Strecken mehrere Relais einfügen.



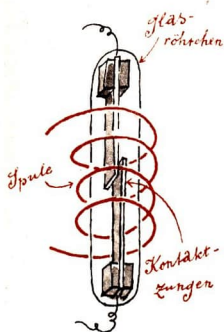
Die Eigenschaft des Relais, starke Ströme durch schwache zu steuern, ist auch an anderer Stelle sehr begehrt. Soll ein leistungs fähiger Motor, ein Scheinwerfer oder ein leistungsstarkes Elektro wärmegerät von entfernter Stelle aus bedient werden, kann man Installationskosten und Leitungsverluste durch Zwischenschalten eines Relais erheblich verringern. Das Kabel, das dem Verbraucher den kräftigen Betriebsstrom zuführt, wird auf kürzestem Wege verlegt. In diesen Stromweg wird ein Relais eingefügt, von dem aus eine Leitung zum Schalter führt. Sie kann aus dünnem Draht bestehen, braucht nur für die geringe Steuerspannung isoliert zu sein und ist deshalb entsprechend billiger. Sogar bei der Woh nungsinstallation bewährt sich diese Methode. Die Relais werden zentral zusammengefaßt; von ihnen führen einfache „Klingel leitungen“ zu Druckknöpfen in den Zimmern. Die Starkstrom leitungen zu den Leuchten und Steckdosen können vorgefertigt und rasch installiert werden.

Durch ein Relais können gleichzeitig mehrere Kontakte betätigt werden. In der Skizze zum Beispiel leuchtet die rote Lampe, so lange der Knopf nicht gedrückt wird. Betätigt man ihn, flammt statt der roten die grüne Birne auf. Das Bild zeigt gleichzeitig



eine der vielen möglichen Bauformen für Relais. Der Anker wird durch die Anziehungskraft des Magneten gekippt und drückt über Isolierstücke die Kontaktfedern nach oben. Dabei werden die Kontakte geöffnet oder geschlossen.

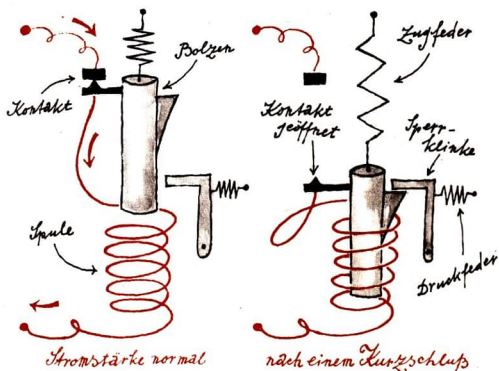
Relais mit einem Dutzend Kontakten sind keine Seltenheit und führen in der Fernmeldetechnik, in Steuer- und Sicherungsanlagen komplizierte Schaltvorgänge aus. Solche Relais müssen jahrelang störungsfrei arbeiten und während dieser Zeit Hundert-tausende oder Millionen Schaltungen ausführen. Dabei werden besonders die Kontakte beansprucht. Damit sie nicht oxydieren, werden sie aus hochwertigem Werkstoff – oft aus einem Edel-metall – hergestellt. Das Eindringen von Schmutz, Staub und



Feuchtigkeit zwischen die Kontaktstücke muß nach Möglichkeit verhindert werden. Deshalb werden die Kontakte durch Staubkappen geschützt oder sogar luftdicht abgeschlossen.

In jüngster Zeit wird in immer größerer Stückzahl ein neuartiger Relais typ gefertigt. Die aus Nickleisen bestehenden Kontaktzungen sind im Inneren einer Magnetspule angebracht. Sie ziehen einander an und schließen den Kontakt, wenn Strom durch die Spule fließt. Die Kontaktzungen sind in ein Glasröhrchen eingeschlossen, das mit chemisch trägem Stickstoffgas gefüllt ist. Relais dieser Bauart zeichnen sich durch hohe Betriebssicherheit und lange Lebensdauer aus. Sie sind klein, leicht und eignen sich wegen ihres einfachen Aufbaus gut dazu, in großen Stückzahlen automatisch gefertigt zu werden.

Durch die Magnetspule eines Relais fließen meist nur schwache Ströme. Doch der Elektromagnet kann, wie aus der Skizze hervorgeht, uns auch vor Kurzschlüssen oder zu starken Strömen schützen. Der Betriebsstrom einer Anlage durchfließt eine Spule.



Ihre Anziehungskraft ist so bemessen, daß bei normaler Stromstärke der Eisenbolzen durch eine Feder zurückgehalten wird. Bei einem Kurzschluß steigt die Stromstärke stark an. Der Bolzen wird in die Spule gerissen. Dadurch öffnet sich der Kontakt und unterbricht den Strom. Eine Sperrklinke hält den Bolzen in der Ausschaltstellung fest. Zahlreiche elektrische Geräte und Anlagen werden durch derartige Schutzschalter vor größerem Schaden bewahrt. Die „Sicherungsautomaten“ unserer Wohnungen benutzen dasselbe Prinzip.

Mitunter müssen elektrische Geräte auch dann vom Netz getrennt werden, wenn Stromstärke und Spannung einen gewissen Wert

unterschreiten oder wenn das Netz plötzlich ausfällt. Größere Motoren zum Beispiel dürfen nicht mit voller Stromstärke angefahren werden. Das wäre aber der Fall, wenn nach einem Netzausfall der Strom plötzlich wiederkäme. Außerdem könnte eine unkontrolliert anlaufende Anlage auch das Bedienungspersonal gefährden. In diesem Falle wird der Schutzschalter abgeändert. Die Spule enthält so viele Windungen, daß sie den Bolzen unter normalen Betriebsverhältnissen festhält. In dieser Stellung ist auch der Kontakt geschlossen. Unterschreiten Stromstärke oder Spannung einen Mindestwert, zieht die Feder den Bolzen zurück und öffnet den Kontakt.

Hätten wir im Überstrom-Schutzschalter die Sperrklinke weggelassen, so könnten wir bei großer Stromstärke ein fortwährendes Auf- und Abwärtsschwingen des Bolzens beobachten. Die Erklärung ist einfach: Sobald der Bolzen in die Spule gerissen wird, öffnet er den Kontakt, Stromfluß und Anziehungskraft hören auf. Die Feder zieht den Bolzen zurück, wobei sich der Kontakt wieder schließt. Infolgedessen wird der Bolzen erneut nach unten gerissen und unterbricht den Strom. Dieses Spiel wiederholt sich, solange der zu starke Strom fließt.

Sehen Sie sich eine elektrische Klingel von innen an, so werden Sie erkennen, daß sie ebenso arbeitet. Eine federnde Zunge unterbricht jedesmal den Strom durch eine Magnetspule, wenn sie der Anziehungskraft der Spule nachgibt. Die Zunge schwingt wegen der aussetzenden Anziehung zurück, schaltet den Strom wieder ein usw. Das Vorderende der Zunge trägt einen Klöppel, der fortwährend gegen eine Glockenschale schlägt. Durch geeignete Ausbildung der Zunge kann man die Frequenzen der Schwingungen so steigern, daß ein hörbarer Ton entsteht. Eine Glockenschale und ein Klöppel sind dann überflüssig. Aus der Klingel ist ein „Summer“ geworden.



FERNBEDIENEN – FERNMESSEN – REGELN

Und wieder Elektromagneten...

Weiträumige Anlagen von zentraler Stelle aus zu kontrollieren, zu steuern und zu koordinieren ist ein Wesenszug der modernen Technik. Chemische und metallurgische Betriebe, Kesselanlagen und Kraftwerke werden von *einer* Schaltwarte aus geleitet. Die Signale und Weichen verzweigter Gleisanlagen werden von *einem* Stellwerk bedient. *Eine* Dispatcherzentrale sichert und koordiniert die Elektroenergieerzeugung eines ganzen Landes, im sozialistischen Teil der Welt sogar mehrerer Länder (s. S. 167).

Voraussetzung für die Erfüllung solcher Aufgaben ist es, Ventile, Absperrschieber, Getriebe, Hebel, Schalter, Motoren und andere

Hilfseinrichtungen auf große Entfernung bedienen zu können. Eine mechanische Fernbedienung ist sehr umständlich und nur auf geringe Distanz durchführbar. Um auch nur eine Bahnschranke oder ein Signal vom nächsten Stellwerk durch Drahtzüge betätigen zu können, sind außer dem Zugseil zahlreiche Rollen, Stützen und Spannvorrichtungen nötig – ganz abgesehen von der mühsamen Wartung und Kontrolle. Bei mechanischen Fernbedienungseinrichtungen an anderer Stelle ist es ähnlich.

Erst mit Hilfe der Elektrotechnik konnten Fernsteuerungen und Fernbedienungen aufgebaut werden, die keine Entfernungsbegrenzung kennen, trotz einfacher Wartung betriebssicher funktionieren und nur wenig Material erfordern. Der kleine Finger auf dem Schaltknopf kann dabei größte Kräfte auslösen und eine Klingel ebenso einschalten wie eine Walzenstraße, einen Ventilator ebenso wie den Greifer eines Riesenbaggers.

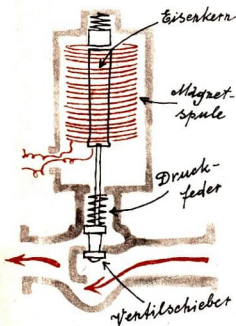
Sehr oft verlassen wir uns bei Fernsteueranlagen auf die Kräfte von Elektromagneten. Viele Haustüren sind ein Beispiel dafür. Sobald wir – gleich, ob im ersten, vierten oder sechsten Stock – den Knopf des elektrischen Türöffners drücken, entriegelt ein Elektromagnet das Haustürschloß. Gleichzeitig fordert ein Summton den Besucher auf, einzutreten.

Weitverzweigte Rohrleitungen, Gas- und Flüssigkeitsfernleitungen enthalten zahlreiche Ventile, Drosselklappen, Absperrhähne und Schieber. Wie sollte man sie zentral bedienen, wenn es keine elektrische Fernsteuerung gäbe? Unsere Abbildung zeigt eine vereinfachte Schnittdarstellung eines elektromagnetisch betätigten Ventils. Bei stromloser Magnetspule drückt eine Feder den Ventilschieber in die Verschußstellung. Wird der Strom eingeschaltet, ziehen die magnetischen Kräfte den Eisenkern und damit den Ventilschieber hoch. Der Zufluß ist geöffnet.

Selbstverständlich muß der Techniker am Kontrollpult jederzeit wissen, wie der Ventilschieber steht. Die Schalterstellung gibt darüber keine genügend sichere Auskunft; denn ihr ist nicht zu entnehmen, ob das Schaltkommando tatsächlich ausgeführt oder durch einen Defekt in der Anlage verhindert wurde.

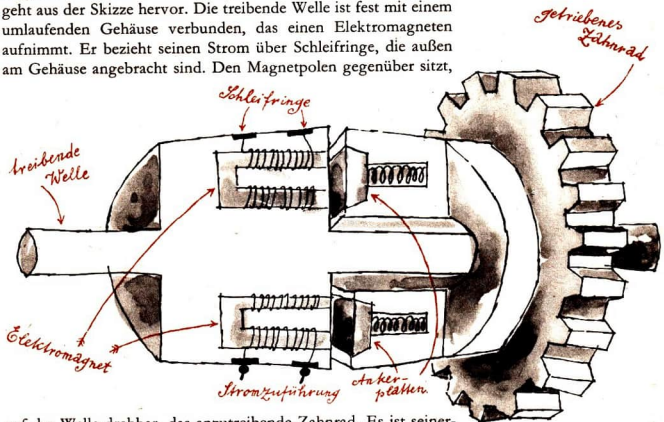
Diesen Mangel beseitigt eine Rückmeldeschaltung, die die tatsächliche Ventilstellung anzeigt. Man kann zum Beispiel an der Schubstange einen Nocken anbringen, der entsprechende Umschaltkontakte betätigt. Ist das Ventil geschlossen, fließt Strom durch eine Signallampe; bei offenem Ventil wird ein anderer Lampenkreis eingeschaltet. Um die Ventilstellung auch bei Stromausfall anzuzeigen, wird die Rückmeldeeinrichtung häufig aus einer besonderen Spannungsquelle gespeist.

Rückmeldeanlagen werden überall da eingesetzt, wo es darauf ankommt, die Ausführung von Steuerkommandos jederzeit kontrollieren zu können. In den sogenannten Steuerquittungsschaltern sind Steuer- und Kontrollorgan vereint. Dadurch werden Fernsteueranlagen besonders übersichtlich.



Mechanisch bewegte Teile müssen gleichfalls oft aus größerer Entfernung gesteuert werden. Beim Lüften von Bremsen an Werkzeugmaschinen, Getrieben oder Transporteinrichtungen finden „Magnetbremslüfter“ Verwendung. Sie enthalten einen kräftigen Elektromagneten, der einen beweglichen Anker in seine Spulen zieht, wenn diese vom Strom durchflossen werden. Mit dem Anker ist das Bremsgestänge gekuppelt.

Mit elektromagnetischen Kupplungen können Getriebe oder Zahnräder auf beliebige Entfernung durch Knopfdruck ein- oder ausgerückt werden. Die Wirkungsweise einer solchen Kupplung geht aus der Skizze hervor. Die treibende Welle ist fest mit einem umlaufenden Gehäuse verbunden, das einen Elektromagneten aufnimmt. Er bezieht seinen Strom über Schleifringe, die außen am Gehäuse angebracht sind. Den Magnetpolen gegenüber sitzt,

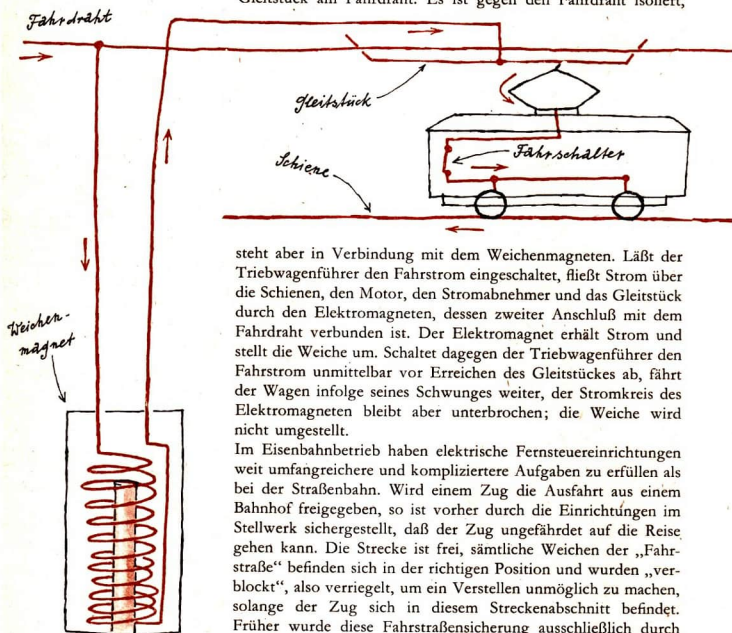


auf der Welle drehbar, das anzutreibende Zahnrad. Es ist seinerseits fest mit den Ankerplatten verbunden. Solange der Elektromagnet stromlos bleibt, nimmt die Welle das Zahnrad nicht mit. Schaltet man den Strom ein, zieht der Magnet die Ankerplatten an. Dabei drücken sich (nicht eingezeichnete) Reibungsscheiben gegeneinander. Das Zahnrad dreht sich mit der Welle.

Die Kupplung läßt sich noch erweitern, so daß verschiedene Drehzahlen und Drehrichtungen eingeschaltet werden können. Hin- und herlaufende Schlitten an Werkzeugmaschinen, etwa an Fräs- und Hobelmaschinen, können ihre Laufrichtung selbsttätig umkehren. Zu diesem Zwecke betätigt der Schlitten während seiner Bewegung Schaltkontakte, die das elektromagnetische Getriebe umsteuern.

Wo Straßenbahnen eine verkehrsreiche Unterführung passieren, ist häufig in einiger Entfernung vor der Unterführung eine Lampe angebracht, die vor der nahenden Bahn warnt. Selbstverständlich wird eine solche Leuchte nicht von Hand ein- und ausgeschaltet.

Die Bahn überfährt beim Näherkommen einen „Schienenkontakt“, einen Schalter, der auf den von den Rädern ausgeübten Schienenenddruck anspricht und die Lampe einschaltet. Das Ausschalten kann über einen zweiten Schienenkontakt hinter der Unterführung erfolgen. Die Blinklichter an Bahnübergängen werden von herannahenden Zügen oft auf gleiche Weise betätigt. Straßenbahnweichen sind häufig so eingerichtet, daß sie von den Triebwagen aus gestellt werden können, ohne daß diese anhalten müssen. Die Weichenzungen werden durch einen Elektromagneten betätigt. Die Steuerung geschieht folgendermaßen: Kurz vor der Weiche trifft der Stromabnehmer des Triebwagens auf ein Gleitstück am Fahrdrabt. Es ist gegen den Fahrdrabt isoliert,



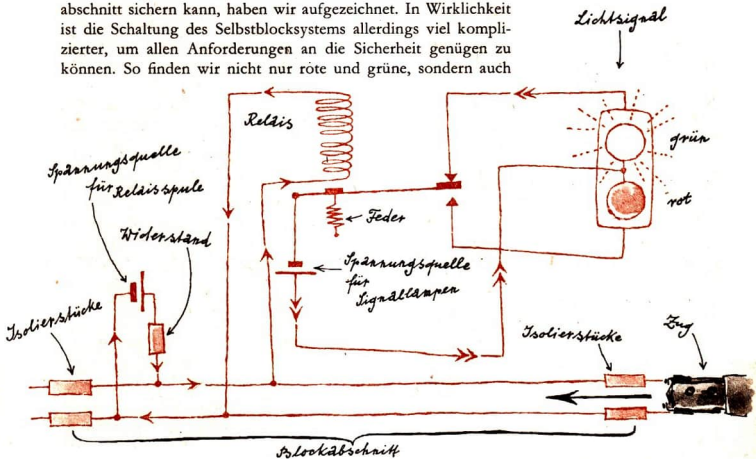
steht aber in Verbindung mit dem Weichenmagneten. Läßt der Triebwagenführer den Fahrstrom eingeschaltet, fließt Strom über die Schienen, den Motor, den Stromabnehmer und das Gleitstück durch den Elektromagneten, dessen zweiter Anschluß mit dem Fahrdrabt verbunden ist. Der Elektromagnet erhält Strom und stellt die Weiche um. Schaltet dagegen der Triebwagenführer den Fahrstrom unmittelbar vor Erreichen des Gleitstückes ab, fährt der Wagen infolge seines Schwunges weiter, der Stromkreis des Elektromagneten bleibt aber unterbrochen; die Weiche wird nicht umgestellt.

Im Eisenbahnbetrieb haben elektrische Fernsteuereinrichtungen weit umfangreichere und kompliziertere Aufgaben zu erfüllen als bei der Straßenbahn. Wird einem Zug die Ausfahrt aus einem Bahnhof freigegeben, so ist vorher durch die Einrichtungen im Stellwerk sichergestellt, daß der Zug ungefährdet auf die Reise gehen kann. Die Strecke ist frei, sämtliche Weichen der „Fahrstraße“ befinden sich in der richtigen Position und wurden „verblockt“, also verriegelt, um ein Verstellen unmöglich zu machen, solange der Zug sich in diesem Streckenabschnitt befindet. Früher wurde diese Fahrstraßensicherung ausschließlich durch sinnreiche mechanische Sperren im Stellwerk erreicht. Heute treten mehr und mehr elektrische Methoden an ihre Stelle. Weichen und Signale werden durch Motoren oder Elektromagnete bedient, die Sicherung der Fahrstraßen übernehmen vielfältig

zusammenspielende Relais. Die Reihen der Weichen- und Signalstellhebel werden durch ein „Gleisbild“ ersetzt. Es ist ein verkleinertes, vereinfachtes Bild des Stellwerkbezirkes mit sämtlichen Gleisen, Weichen und Signalen. Besetzte Gleisabschnitte leuchten auf, die Stellung der Weichen und Signale wird im Gleisbild angezeigt. Die Fahrstraßen werden durch Tasten eingestellt, die im Gleisbild an der Stelle untergebracht sind, wo sich die Weichen und Signale in Wirklichkeit befinden. Gleisbildstellwerke erlauben wegen ihrer Übersichtlichkeit ein rasches Arbeiten bei erhöhter Sicherheit.

Eine wichtige und bewährte Sicherungsmaßnahme im Bahnbetrieb ist das „Blocksystem“. Die Strecke wird in Abschnitte bestimmter Länge, „Blockabschnitte“, geteilt. Im Abschnitt darf sich auf einem Gleis jeweils nur ein Zug aufhalten. Deshalb steht das Einfahrtssignal des Blockabschnittes auf „Halt“, solange dieser von einem Zug befahren wird. Es kann erst dann wieder auf „Freie Fahrt“ gestellt werden, wenn der Zug den Blockabschnitt verlassen hat. Es lösen einander also stets die gleichen Sicherungsmaßnahmen ab: Sperren der Einfahrt, wenn sich ein Zug im Blockabschnitt aufhält, Freigabe der Einfahrt, wenn er den Blockabschnitt verlassen hat. Es liegt nahe, die Blocksicherung vom Zug selbst betätigen zu lassen. Das „Selbstblocksystem“ wurde zuerst bei Stadtschnellbahnen erprobt und eingeführt. Inzwischen wendet man es auch auf vielbefahrenen Strecken des Fernverkehrs an.

Wie ein Zug sich selbst während der Fahrt durch einen Blockabschnitt sichern kann, haben wir aufgezeichnet. In Wirklichkeit ist die Schaltung des Selbstblocksystems allerdings viel komplizierter, um allen Anforderungen an die Sicherheit genügen zu können. So finden wir nicht nur rote und grüne, sondern auch



gelbe Signallampen. Bei elektrifizierten Strecken sind besondere Vorkehrungen zu treffen, die verhindern, daß die Signaleinrichtungen durch „Fremdstrome“ beeinflusst werden können. Immerhin geht aus unserer Skizze das Wesentliche hervor.

Die Schienen der Blockabschnitte werden in die Signalstromkreise einbezogen. Sie sind deshalb durch Isolierstücke von den Schienen der Nachbarabschnitte elektrisch getrennt. Im Bild ist der uns interessierende Gleisabschnitt frei für die Einfahrt eines Zuges. In diesem Fall steht das Einfahrtssignal des Blockabschnitts auf „Grün“. Aus einer Spannungsquelle fließt Strom über die Schienen in die Spule des Relais, das das Lichtsignal steuert. Der Relaisanker ist angezogen und hält den Kontakt für die grüne Lampe geschlossen.

Nähert sich ein Zug, so schließt er, sobald er die Isolierstrecke überfahren hat, mit seinen Achsen den Strom durch die Relaispule kurz. Der zwischengeschaltete Widerstand verhindert dabei, daß auch die Spannungsquelle kurzgeschlossen wird. Der Anker des Relais fällt ab und schaltet damit das rote Signallicht ein, das leuchtet, solange sich der Zug im Blockabschnitt befindet; denn während dieser ganzen Zeitspanne kann kein Strom zur Relaispule gelangen. Die Einfahrt ist gesperrt. Hat der Zug das am Blockende liegende Isolierstück passiert, wird der Kurzschluß aufgehoben. Das Relais zieht wieder an und stellt das Lichtsignal auf „Grün“. Der nächste Zug kann in den Blockabschnitt einfahren.

Was nützen aber alle selbsttätigen Signalanlagen, wenn der Lokomotivführer ein Signal übersieht? Auch dagegen gibt es einen Schutz, der auf zahlreichen Fernstrecken eingeführt wurde. Er arbeitet mit Elektromagneten, die an der Lokomotive und am Gleis angebracht sind und sich gegenseitig beeinflussen. Steht das Vorsignal eines Streckenabschnittes nicht auf „Freie Fahrt“, setzt die Wirkung bereits ein: Ein „Gleismagnet“ beeinflusst einen Magneten an der Lokomotive; wenn der Lokführer nicht innerhalb einer bestimmten, kurzen Zeitspanne eine „Wachsamkeitstaste“ drückt, lassen Relais die Bremsen wirksam werden. Zwischen Vorsignal und Hauptsignal wacht ein weiterer Gleismagnet darüber, ob der Zug seine Geschwindigkeit bis auf einen bestimmten Wert vermindert hat. Ein dritter Magnet vor dem Hauptsignal endlich gebietet „Halt“ und leitet die „Zwangsbremse“ ein, wenn der Lokführer unachtsam war.

Wie voll ist der Tank?

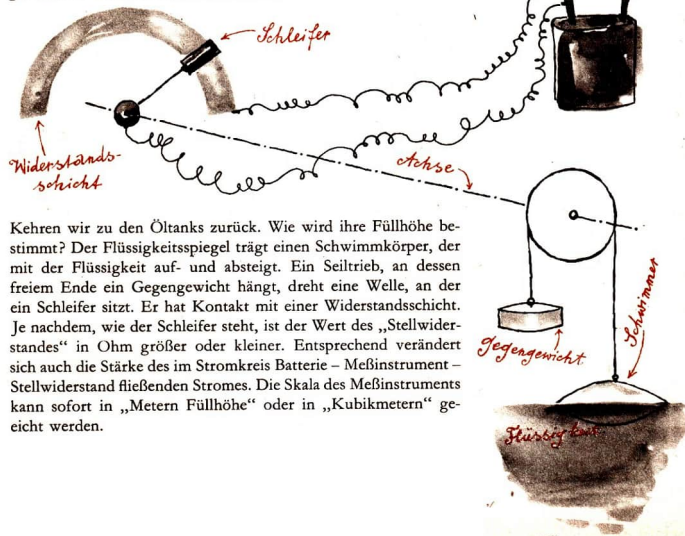
Eine Reihe silberglänzender Tanks am Rande des Chemiewerkes nimmt das Öl auf, das die Rohrleitungen über Hunderte Kilometer heranbringen. Selbstverständlich werden die Pumpen und Ventile der Öltanks fernbedient. Doch woher weiß der Techniker am Steuerpult, wann er eine Pumpe einschalten oder ein Ventil

betätigen muß? Woher kennt er überhaupt die Flüssigkeitshöhe in den Tanks? Ganz einfach: Instrumente am Bedienungspult zeigen sie an.

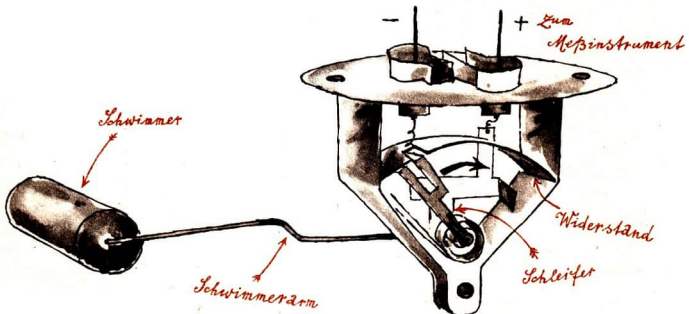
Neben der Fernsteuerung gibt es nämlich noch die *Fernmessung*, und diese ist mindestens genauso wichtig wie jene; denn oft bildet die Fernmessung die Voraussetzung der Fernsteuerung. In unserem Beispiel wäre es sinnlos, die Pumpen ohne Kenntnis des Ölstandes an- oder abzustellen. Vorbedingung für die Fernsteuerung eines Kraftwerkes ist, daß alle wichtigen Betriebswerte in der Steuerzentrale zu überblicken sind.

Die verschiedensten Größen müssen ferngemessen werden: Spannungen, Stromstärken, Widerstände, Füllhöhen von Behältern, Drücke, Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten, Dichten, Drehzahlen, Längen- und Dickenänderungen. Die Fernmessung elektrischer Größen ist besonders einfach. Die Werte aller nichtelektrischen Größen dagegen müssen elektrisch übertragen und angezeigt werden. Das heißt, man muß die Meßwerte erst in elektrische Größen umsetzen: in Spannungs- oder Stromänderungen, in Strom- oder SpannungsschöÙe wechselnder Länge, Höhe oder Folgegeschwindigkeit oder in Wechselspannungen verschiedener Frequenz.

Wir wollen uns hier auf Spannungs- und Stromänderungen und auf die Hilfe der elektrischen Bauelemente beschränken, deren Prinzipien wir in den vorausgegangenen Kapiteln kennenlernten. Wir werden feststellen, daß sich mit ihnen bereits zahlreiche Aufgaben der Fernmeßtechnik lösen lassen.



Bei geringfügigen Schwankungen des Flüssigkeitsspiegels wird der Seilzug durch einen drehbaren Hebel ersetzt. Auf diese Weise kann zum Beispiel der Füllstand der Tanks von Kraftfahrzeugen gemessen und am Armaturenbrett angezeigt werden.



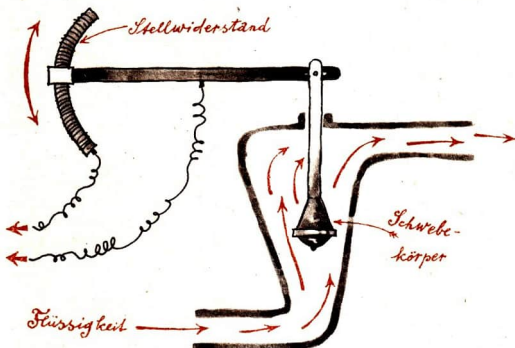
Immerhin sind an dieser Art der Füllstandsmessung noch viele mechanische Vorrichtungen beteiligt, und das schließt Störungsmöglichkeiten ein. Das Seil kann sich verklemmen oder auf der Rolle rutschen, der Schwimmerarm hängenbleiben.

Bei Flüssigkeiten, die den elektrischen Strom leiten, kommt man mitunter auf viel einfachere Weise zum Ziel: In die Flüssigkeit werden zwei Elektroden getaucht, die mit einer Spannungsquelle und dem Meßinstrument einen Stromkreis bilden. Die Flüssigkeit setzt dem Stromübergang von einer Elektrode zur anderen einen Widerstand entgegen, der um so geringer ist, je größer die benetzte Elektrodenfläche ist. Diese Fläche hängt aber von der Höhe des Flüssigkeitsspiegels ab. Damit ändern sich Widerstand, Stromstärke und Instrumentenanzeige in Abhängigkeit von der Füllhöhe. Ein Nachteil dieser einfachen Anordnung ist, daß Änderungen in der Konzentration oder in der Zusammensetzung der Flüssigkeit das Meßergebnis verfälschen. Höchstens durch einen Kunstgriff kann man den Einfluß dieser Störungsquellen auf das Meßergebnis unwirksam machen.

Für nichtleitende Flüssigkeiten steht ein ähnlich einfaches Verfahren zur Verfügung, bei dem an die Stelle des Widerstandes eine andere elektrische Größe tritt. Dieses Verfahren ist sogar für pulverförmiges oder körniges Meßgut anwendbar.

Um die Strömungsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit oder die Durchflußmenge zu messen, kann man einen Schwebekörper mit dem Stellwiderstand verbinden. Die von unten in das konische

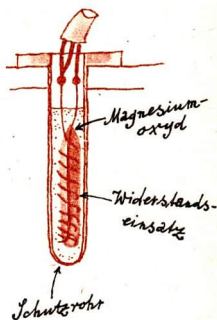
Rohr strömende Flüssigkeit drückt den Schwebekörper um so höher, je größer ihre Geschwindigkeit ist. Die Bewegung des Schwebekörpers wird auf den Schleifer des Stellwiderstandes übertragen.



Mit einer ähnlichen Vorrichtung lassen sich die Drücke von Flüssigkeiten und Gasen fernmessen. Die Flüssigkeit oder das Gas schiebt einen Kolben in einem Zylinder nach oben, bis die Druckkraft und die Gegenkraft der sich spannenden Feder einander die Waage halten. Die Kolbenbewegung wird auf den Stellwiderstand übertragen. Auch andere Druckmesser lassen sich mit einem Stellwiderstand koppeln und für Fernmessungen einsetzen.

Häufig müssen Temperaturen ferngemessen werden. Auch dabei ist es üblich, die Temperaturwerte über einen sich ändernden Widerstand in elektrische Größen umzuformen. Auf den Stellwiderstand kann man diesmal verzichten. Man nutzt vielmehr die Tatsache, daß der Widerstand eines Leiters temperaturabhängig ist. Ein Platindraht zum Beispiel ändert seinen Widerstand je Grad Temperaturschwankung um etwa 0,4%. In „Widerstandsthermometern“ wird ein dünner Platindraht zu einer Wendel gewickelt und in ein Quarzglasröhrchen eingeschmolzen. Dieses kommt, in Magnesiumoxyd oder eine andere Füllmasse eingebettet, in ein Schutzrohr, das an die Meßstelle gebracht wird. Der durch das Widerstandsthermometer fließende Strom ändert sich in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Ein Meßinstrument, das in Celsiusgraden geeicht ist, zeigt sie an.

Ein Platindraht-Widerstandsthermometer reagiert auf Temperaturänderungen nur mit verhältnismäßig kleinen Widerstandsänderungen. Es eignet sich daher vor allem für die Messung



hoher Temperaturen und ist empfindlich gegenüber Schwankungen der Betriebsspannung und anderen äußeren Störeinflüssen, zum Beispiel gegenüber der Erwärmung und Abkühlung der Zuleitungen. Durch Einsatz besonderer Kompensationschaltungen kann man diese Mängel zwar beseitigen, doch bevorzugt man heute „Temperaturfühler“, die bereits auf kleine Temperaturänderungen mit großen Widerstandsänderungen reagieren. Es sind die „Thermistoren“ oder „Heißleiter“, kleine Halbleiterbauelemente, deren Herstellung billig ist und die auch noch an Stellen untergebracht werden können, wo sich der Einsatz des Platindraht-Widerstandsthermometers aus räumlichen Gründen verbietet.

Der Widerstand eines Heißleiters sinkt bei Erwärmung – er verhält sich also umgekehrt wie die Metalle, bei denen Erwärmung eine Widerstandsvergrößerung hervorruft. Bei einer Temperaturänderung um 1°C lassen sich an einem Heißleiter bereits Widerstandsänderungen bis zu 4%, also zehnmal soviel wie beim Platindraht-Widerstandsthermometer, erreichen. Bei solchen Änderungen genügen relativ einfache Meßinstrumente. Auch braucht man nicht so sorgfältig auf die Ausschaltung störender Einflüsse bedacht zu sein, da sie nur noch wenig ins Gewicht fallen. Andere Temperaturfühler arbeiten auf der Grundlage von „Thermoelementen“, die Wärmeenergie unmittelbar in elektrische Energie umwandeln. Wir werden später noch auf ihre Arbeitsweise eingehen.



Regeltechnik auf dem Bügelbrett

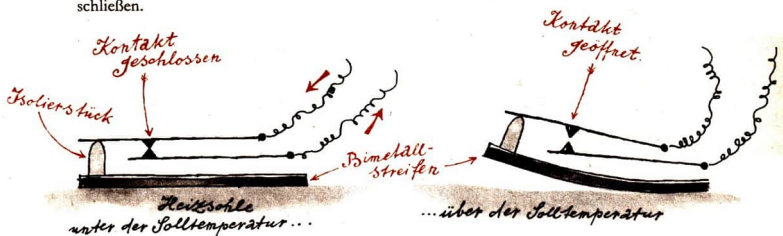
Seit 70 Jahren gibt es elektrische Bügeleisen. Bis vor kurzem hatten sie sich nicht wesentlich verändert. In einem massiven, schweren Heizkörper verlief der Heizleiter, durch Glimmer oder andere hitzebeständige Isolierstoffe sorgfältig gegen eine Berührung mit dem Metall geschützt.

Seit 70 Jahren hatten auch alle Bügeleisen den gleichen Mangel: Ließ man sie längere Zeit eingeschaltet, „überhitzten“ sie sich. Schaltete man sie aber aus, reichte die wärmespeichernde Wirkung des Eisenkörpers nur für verhältnismäßig kurze Zeit. Die Hausfrau war gezwungen, durch mehr oder weniger starken Druck, durch schnellere oder langsamere Bewegungen die richtige Dosis Wärme auf die Wäsche zu übertragen. Vergaß sie, das Bügeleisen abzustellen – trotz aller Vorsicht kam das immer wieder vor –, konnte unter Umständen ein Brand ausbrechen.

Heute steht uns im Reglerbügeleisen ein Gerät zur Verfügung, bei dem diese Nachteile wegfallen. Das Bügeleisen hält seine Temperatur selbständig auf einem bestimmten Wert; sie kann überdies so eingestellt werden, daß jeder Stoff bei der für ihn günstigsten Temperatur gebügelt wird. Ein Überhitzen des Eisens ist ausgeschlossen. Damit entfällt auch die Brandgefahr. Der massive

Eisenkörper zur Wärmespeicherung ist überflüssig; ein Eisen wiegt nur etwa halb soviel wie seine Vorgänger, und man braucht nicht mehr „mit Druck“ zu plätten. Das alles wird durch eine einfache Vorrichtung erreicht, durch einen „Bimetallregler“.

Es ist bekannt, daß Wärme die Körper ausdehnt und die Größe der Ausdehnung von der Temperaturerhöhung und vom Material abhängt. Verbinden wir zwei Metallstreifen gleicher Abmessungen, aber aus verschiedenen Werkstoffen, unverrückbar fest miteinander und erwärmen wir sie, wird der Streifen mit der größeren „Wärmeausdehnungszahl“ länger als sein Nachbar. Infolgedessen verbiegen sich die Streifen, und zwar so, daß der Streifen mit der geringeren Wärmeausdehnung die Innenseite des entstehenden Bogens bildet. Werden die Streifen abgekühlt, nehmen sie ihre Ausgangsstellung wieder ein. Das kann man ausnutzen, um einen Kontakt in Abhängigkeit von der Temperatur zu öffnen und zu schließen.

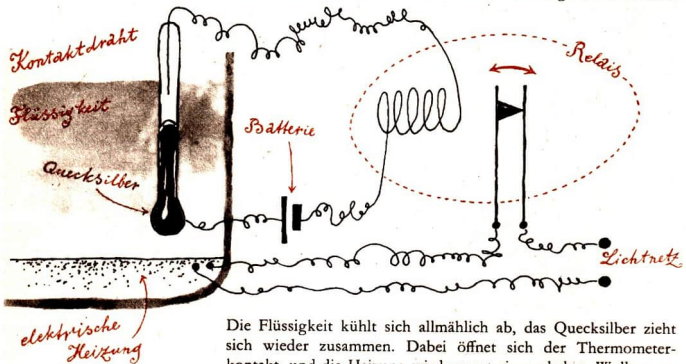


Unmittelbar über der „Heizsohle“ des Reglerbügeleisens ist ein Bimetallstreifen angebracht. Wird das Bügeleisen eingeschaltet, hält der noch kalte Bimetallstreifen den Kontakt geschlossen. Wenn die Heizsohle die Bügeltemperatur erreicht und überschreitet, hat sich der Streifen so weit gebogen, daß er den Kontakt öffnet. Der Stromkreis ist unterbrochen, das Bügeleisen wird nicht weiter geheizt. Kühlt es sich ab, geht die Krümmung des Bimetallstreifens wieder zurück. Der Stromkreis schließt sich erneut, und der Strom heizt weiterhin das Bügeleisen. Es ist ein ständiges Wechselspiel von Erwärmen und Abkühlen, wobei die Sohle des Reglerbügeleisens eine mittlere Temperatur annimmt und einhält. Ihre Höhe läßt sich durch eine Nockenscheibe einstellen, die den Abstand der Kontaktflächen verändert.

Ein Reglerbügeleisen ist sparsamer im Betrieb als ältere Bügeleisen; denn es verbraucht tatsächlich nur solange Strom, wie zum Erreichen der Bügeltemperatur notwendig ist. Ungeregelte Bügeleisen werden dagegen meistens zu lange geheizt; anschließend wartet man, bis sie sich auf die richtige Temperatur abgekühlt haben. Als „Thermometer“ dient dabei der angefeuchtete Finger...

Selbstverständlich lassen sich auch andere Temperaturregeleinrichtungen mit Bimetallstreifen ausstatten. Der Sicherheitsschalter in einem Heizkissen ist ein Bimetallschalter, in Heißwasserspeichern schaltet ein Bimetallregler den Strom aus, bevor das Wasser Siedetemperatur erreichen kann; in viele industrielle Wärmanlagen, aber auch in selbsttätige Feuermelder baut man Bimetallstreifen ein.

Auch das Kontaktthermometer bewährt sich als Wärmefühler. In ihm schaltet ein sich ausdehnender oder zusammenziehender Quecksilberfaden den Stromkreis aus und ein. Das Bild zeigt die Temperaturregeleinrichtung eines chemischen Bades. Sobald der Quecksilberfaden die der eingestellten Temperatur entsprechende Kontaktstelle erreicht hat, fließt der Strom durch die Spule des Steuerrelais und setzt die elektrische Heizanlage außer Betrieb.

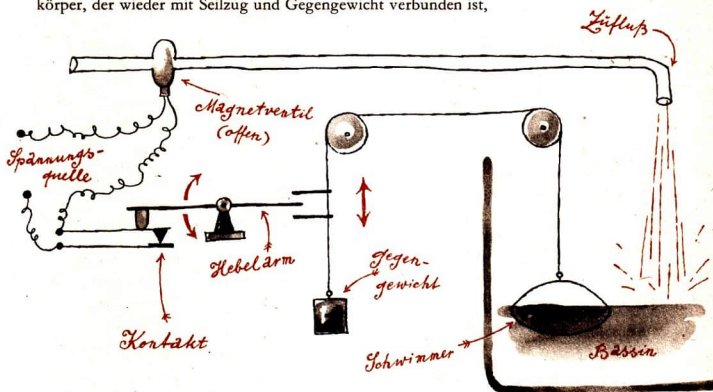


Die Flüssigkeit kühlt sich allmählich ab, das Quecksilber zieht sich wieder zusammen. Dabei öffnet sich der Thermometerkontakt, und die Heizung wird erneut eingeschaltet. Wollte man die Temperatur von Hand konstant halten, müßte man das Thermometer ständig beobachten und den Heizkörper entsprechend ein- und ausschalten. Die selbsttätige Temperaturregelung dagegen erfordert keinerlei Bedienung.

In selbsttätigen Temperaturregeleinrichtungen begegnen wir einem Grundgedanken, der für die gesamte Technik von allergrößter Bedeutung ist. Es ist das Prinzip der automatischen Regelung. Es gibt heute wohl kaum noch einen Betrieb, in dem nicht irgendwelche Regelanlagen Verwendung finden. So verschieden ihre Aufgaben und dementsprechend ihre Konstruktion sein mögen, ihre grundsätzliche Arbeitsweise bleibt sich stets gleich: Eine physikalische Größe (Temperatur, Druck, elektrische Spannung usw.) ist trotz störender Einflüsse von außen (Wärmeabgabe des Bügeleisens bei unterschiedlicher Umgebungstemperatur) auf einen Sollwert zu bringen und auf ihm zu halten. Dazu wird

die Größe fortlaufend gemessen (Bimetallstreifen), die festgestellten Abweichungen veranlassen Gegenmaßnahmen (Ein- und Ausschalten der Heizung).

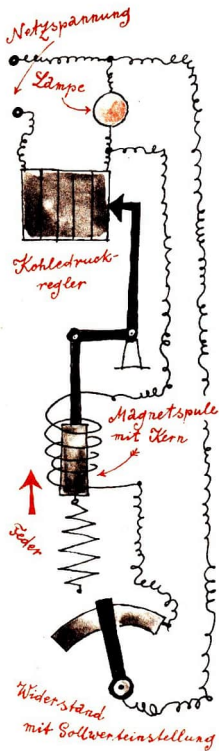
Sehen wir uns noch eine Regelanlage an, mit der sich in einem Behälter ein mittlerer Flüssigkeitspegel selbsttätig aufrechterhalten läßt. Ein mit der Flüssigkeit auf- und absteigender Schwimmkörper, der wieder mit Seilzug und Gegengewicht verbunden ist,



steuert über einen Schalter das Magnetventil des Zuflusses. Fällt der Flüssigkeitsspiegel, so wird nach einer bestimmten Zeit der Steuerstrom eingeschaltet. Das Magnetventil öffnet sich, Flüssigkeit strömt nach. Infolgedessen hebt sich der Schwimmer und schaltet, sobald der gewünschte Flüssigkeitsstand erreicht ist, das Magnetventil wieder aus.

Die Regelanlagen, die wir soeben kennenlernten, arbeiten unstetig. Der Bimetallregler schaltet die Heizung des Bügeleisens aus oder ein, kann sie aber nicht auf Zwischenwerte einstellen. Das Magnetventil der Füllstandregelung ist entweder geöffnet oder geschlossen, kann den Zufluß aber nicht stetig drosseln. Man nennt solche Regler „Zweipunktregler“. Genau läßt sich ein Sollwert mit ihnen nicht einhalten. Die Temperatur des Reglerbügeleisens pendelt fortwährend um eine mittlere Temperatur; im Behälter steht der Flüssigkeitsspiegel abwechselnd etwas ober- oder unterhalb der Sollfüllhöhe. Trotzdem reicht die Zweipunktregelung für viele Zwecke aus, unter anderem auch für die Temperaturregelung eines Kühlschranks.

Sehr oft allerdings ist eine stetige Regelung notwendig, zum Beispiel bei der Konstanzhaltung von Drehzahlen, bei der Korrektur von Werkstückabmessungen in der automatischen Ferti-



gung, bei der Einhaltung der Feuchte von Papierbahnen oder beim Überwachen der Konzentration von Chemikalien. Doch wir brauchen gar nicht so weit zu gehen. Die Schwundregelung Ihres Rundfunkempfängers, die Lautstärkeschwankungen beim Empfang ausgleicht, ist eine stetige Regelung; der automatische Spannungsregler, den Sie vor Ihren Fernsehempfänger schalten, gleicht Netzspannungsschwankungen stetig aus und nicht durch „Springen“ um einen Mittelwert.

Blieben wir bei der Regelung einer elektrischen Spannung. Sie erfolgt hier mit Hilfe eines „Kohle-druck-reglers“. Das ist ein Widerstand, der aus einem Stapel übereinanderliegender Kohlescheiben besteht. Der Übergangswiderstand zwischen den Scheiben ist um so geringer, je fester man diese zusammenpreßt. Im Spannungsregler wird dieser Druck durch eine Feder ausgeübt. Die unregelte Spannung wird dem Stromverbraucher nicht unmittelbar, sondern über den Kohle-druck-regler zugeführt. Parallel zum Stromverbraucher ist ein Elektromagnet geschaltet, dessen verschiebbarer Eisenkern über ein Hebelsystem auf den Kohle-druck-regler einwirkt.

Steigt die Netzspannung, wird der Kern tiefer in die Spule hineingezogen. Infolgedessen sinkt die Kraft, die die Scheiben zusammendrückt. Der Widerstand des Kohle-druck-reglers steigt. Damit aber tritt an ihm ein größerer Spannungsabfall auf; die Spannung am Stromverbraucher sinkt.

Hat das Netz Unterspannung, lassen die magnetischen Kräfte nach. Der Kern wird von der Feder ein Stück aus der Spule gezogen. Dadurch werden die Kohlescheiben stärker aneinandergepreßt. Der Widerstand des Kohle-druck-reglers nimmt ab; es geht an ihm nicht mehr soviel Spannung „verloren“. Das bedeutet, daß die Spannung am Stromverbraucher steigt. Mit dem veränderlichen Widerstand im Magnetstromkreis wird der Sollwert festgelegt.

ELEKTROTECHNIK VON GESTERN?

Das Elektrizitätswerk in der Postkarte

Sicherlich schwirrt Ihnen vor lauter Relais, Steuerschaltungen und Stromkreisen inzwischen der Kopf. Gönnen wir uns daher auf den folgenden Seiten ein wenig Ruhe, und gönnen wir diese Pause auch den Elektronen, die bisher unentwegt durch Leitungen, Schalter und Magnetspulen wandern mußten. Nehmen wir uns die ruhende, die „statische“ Elektrizität vor. Sie ist um Jahrtausende länger bekannt als der elektrische Strom; denn schon im Altertum hatte man bemerkt, daß Wollfasern und andere leichte Teilchen von manchen Stoffen angezogen werden, wenn man diese vorher kräftig reibt. Ein Stoff, als „Gold des Nordens“

ohnehin geheimnisumwittert, zeigte diese Eigenschaft so deutlich, daß sein Name nicht nur bis zur Gegenwart bewahrt wurde, sondern sogar aus Wissenschaft und Technik nicht wegzudenken ist: Bernstein heißt altgriechisch „elektron“.

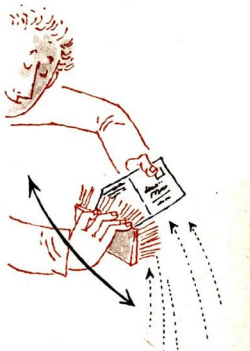
Immer wieder stieß man im Laufe der Jahrhunderte auf die elektrischen Eigenschaften mancher Stoffe. Man beobachtete, daß sich aus Schwefel, Glas oder Bernstein Funken ziehen ließen, nachdem man sie gerieben hatte. Man erschreckte und ergötzte, nachdem Leidener Flasche und Elektrisiermaschine erfunden waren, seine Mitmenschen durch elektrische Schläge.

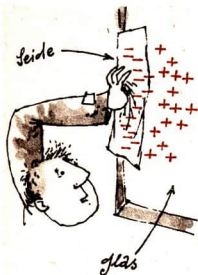
Bald stellte man fest, daß scheinbar zwei Arten von Elektrizität existierten: Elektrisch „geladene“ Glasstäbe stießen einander ab, einen geladenen Harzbrocken aber zogen die gleichen Glasstäbe an. Man lernte zwischen der (positiven) „Glaselektrizität“ und der (negativen) „Harzelektrizität“ unterscheiden und formulierte den wichtigen Satz: Ladungen gleichen Vorzeichens stoßen sich ab, Ladungen ungleichen Vorzeichens ziehen sich an.

Zu praktischen Anwendungen der Elektrizität stieß man nicht vor. Die Gesellschaft, die noch mit der Kraft der Muskeln, des Windes und des Wassers auskam, benötigte die „neue“ Naturkraft zunächst nicht. Um so ansehnlicher war die Auswahl an Schauversuchen und Kunststückchen, für die die Elektrizität herhalten mußte. Noch in einem 1856 in Berlin erschienenen „Populären Handbuch der Physik zum Selbstunterricht für die Gebildeten jedes Standes“ befaßt sich der Teil über die Elektrizitätslehre mit seitenlangen Anleitungen für „den elektrischen Tanz“, „die elektrische Schaukel“, „das Elektrisieren von Personen“, „das elektrische Planetarium“, „die elektrische Pistole“.

Heute werden solche Experimente allenfalls einmal als Kuriosum vorgeführt. Das heißt aber nicht, daß die statische Elektrizität – man nannte sie auch Reibungselektrizität – aus unserem Leben verschwunden ist. Im Gegenteil, wir haben täglich mit ihr zu tun. Es ist eine Folge der statischen Elektrizität, daß trockene Haare beim Kämmen mit dem Kamm aus Plaste „zu Berge“ stehen. Staub, der hartnäckig auf Schallplatten haftet, wird durch elektrische Anziehungskräfte festgehalten. Schreibpapier, das sich nicht von der Kunststoffunterlage lösen läßt, klebt „elektrisch“. Es ist eine Folge der Reibungselektrizität, daß kunstseidene Wäsche beim Ausziehen knistert.

Trocknen wir eine Postkarte oder eine zusammengefaltete Zeitung gründlich auf dem Ofen und bürsten sie anschließend kräftig, erhalten wir ein regelrechtes „Elektrizitätswerk in der Postkarte“: Papierstückchen, Asche oder Fasern werden auf Spannenslänge angezogen. Unsere Haare sträuben sich, wenn wir ihnen das „Elektrizitätswerk“ nähern. Aus dem gebürsteten Teil der Zeitung oder der Postkarte springen knisternde, bei völliger Dunkelheit deutlich sichtbare Funken zum Finger oder zu Gegenständen, die in leitender Verbindung mit der Erde stehen.





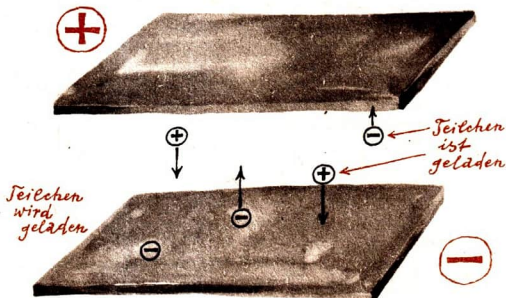
Die Spannungen sind bei solchen Versuchen überraschend hoch. Schon beim Kämmen mißt man mit geeigneten Instrumenten Spannungen von 10000 V und mehr zwischen den Haaren und dem Kamm. Die Elektrizitätsmengen bleiben dabei allerdings so gering, daß sie völlig ungefährlich sind.

Wo kommt die Spannung her? Wie entsteht überhaupt „Reibungselektrizität“? Reiben wir Glas mit einem Seidenlappen, werden elektrische Ladungen „getrennt“. Der Seidenlappen „wischt“ Elektronen von der Glasoberfläche. Dadurch wird das Glas positiv, die Seide, auf der sich die Elektronen häufen, negativ. Auf ähnliche Weise werden elektrische Ladungen angesammelt, wo immer Reibungselektrizität in Erscheinung tritt.

Inzwischen hat man herausgefunden, daß die Reibung nicht das Entscheidende ist. Wichtig ist nur eine möglichst innige Berührung der Oberflächen. Das Reiben verzahnt die winzigen Unebenheiten der Oberflächen miteinander und vervielfacht dadurch die Zahl der Berührungsstellen.

Verbinden wir einen geladenen Körper leitend mit der Erde, etwa durch Darüberstreichen mit der Hand, so fließt die Ladung sofort zur Erde ab. Sie verteilt sich im Erdreich oder wird durch Elektronen aus dem Erdball ergänzt. Andererseits können wir die durch Reibung gewonnene elektrische Ladung auch auf leitende Körper übertragen, wenn diese sorgfältig gegen die Erde isoliert sind.

Wir laden auf diese Weise zwei Metallplatten auf, eine positiv, die andere negativ, und stellen die Platten einander waagrecht in gewissem Abstand gegenüber. Wenn wir Zigarettenasche oder Papierschnitzel zwischen die Platten bringen, ist ein lebhaftes Auf- und Abtanzen der Teilchen zu beobachten. Sie liegen einen Augenblick ruhig auf der unteren Platte, springen zur oberen, wo sie für eine kurze Zeitspanne hängenbleiben, „fallen“ zur unteren Platte zurück usw. Dieses Verhalten ist nicht schwer zu verstehen: Liegen die Teilchen auf der unteren Platte, nehmen



sie Elektronen auf. Da sich gleichnamige Ladungen abstoßen, werden die Teilchen hochgeschwungen, sobald sie sich bis auf einen kritischen Wert aufgeladen haben. An der oberen Platte geben sie ihre Ladung ab und laden sich anschließend mit umgekehrtem Vorzeichen auf, bis sie wieder zurückgeschleudert werden. Das Spiel währt jedoch nicht lange, weil jedes springende Teilchen Elektronen zur oberen Platte transportiert und so zum Ladungsausgleich beiträgt.

Wir stellen die Platten senkrecht und verbinden sie für kurze Zeit mit den Anschlüssen einer Elektrisiermaschine. Die Platten laden sich auf eine Spannung von vielen Tausenden Volt auf, die auch dann erhalten bleibt, wenn die Anschlüsse zur Elektrisiermaschine entfernt werden. Kleine Papierfähnchen oder kurze Fadenstücke, die wir in den Plattenzwischenraum bringen, werden so ausgerichtet, daß sie von Platte zu Platte weisen. Die Richtwirkung verschwindet, wenn wir die Platten durch Berühren mit dem Finger entladen.

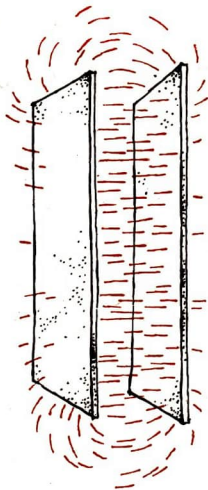
Streuen wir auf eine Unterlage im Plattenzwischenraum leichte Papierfitterchen oder pulverisierte Gipskristalle, können wir etwas beobachten, das an die Vorgänge in der Nähe eines Magneten erinnert: Die Teilchen ordnen sich zu Linien, die von Platte zu Platte verlaufen. Es ist leicht nachzuweisen, daß es sich hierbei nicht um magnetische Erscheinungen handelt. Ebenso einfach ist festzustellen, daß das Ordnen der Teilchen mit der Ladung auf den Platten zusammenhängt: Bei entladenen Platten bleibt der Versuch aussichtslos, Linien zu erhalten.

Wir müssen schließen: Im Raum zwischen den geladenen Platten sind Veränderungen eingetreten; er hat einen besonderen Zustand angenommen, den wir „elektrisches Feld“ nennen. Die „elektrischen Kraftlinien“ – wie die magnetischen Kraftlinien nur eine Hilfsvorstellung – geben in jedem Punkte die Richtung der elektrischen Kräfte an.

Die elektrischen Kraftlinien enden auf der Leiteroberfläche; an ihren Enden sitzen die Ladungen, also die Stellen, an denen Elektronen fehlen oder im Überschuß vorhanden sind.

Im Inneren eines Leiters können sich keine ruhenden elektrischen Ladungen halten. Weil sie sich abstoßen, suchen sie sich so weit wie möglich voneinander zu entfernen und wandern daher stets zur Leiteroberfläche. Säßen wir im Inneren einer allseitig geschlossenen Metallkugel (oder eines beliebig geformten Hohlkörpers aus Metall), könnte man diese getrost auf eine Spannung von Hunderttausenden Volt aufladen. Es würde uns nichts geschehen, selbst dann nicht, wenn wir die Innenwand berührten. Auch ein empfindliches Meßinstrument schläge nicht aus. Bringen wir elektrische Ladung auf die Innenwand, wandert sie sofort nach außen; es ist nicht möglich, sie innen wieder abzunehmen.

Man nennt die Kugel, die ebensogut aus engmaschigem Drahtgeflecht angefertigt sein könnte, nach ihrem Entdecker „Faraday-





schen Käfig“ (Michael Faraday, 1791–1867). Man benutzt ihn, um Meßapparaturen gegen den störenden Einfluß elektrischer Felder abzuschirmen. Daß mit Kofferempfängern im Eisenbahn-
 abteil meistens nur sehr schlechter Rundfunkempfang möglich ist, geht ebenfalls auf die „Käfigwirkung“ des aus Metall bestehenden Wagens zurück, der elektrische und magnetische Felder kaum in das Wageninnere dringen läßt (das gilt natürlich nur, wenn sich auch die Antenne im Inneren des Wagens befindet). Elektrische Kraftlinien stehen stets senkrecht auf der Leiteroberfläche. An stark gekrümmten Teilen eines geladenen Körpers rücken deshalb ihre Enden besonders dicht zusammen. In diesem Fall kann es geschehen, daß elektrische Ladungen aus der Leiteroberfläche „ausbrechen“ und den Kraftlinien folgen. Umgekehrt können Ladungen durch diese „Spitzenwirkung“ angesaugt werden. In der Höchstspannungstechnik muß man scharfe Krümmungen, Kanten oder Spitzen an spannungsführenden Körpern sorgfältig vermeiden. Trotzdem können wir an Hochspannungsleitungen oft eine durch den Spitzeneffekt hervorgerufene „Sprühentladung“ beobachten.

Zwei einander dicht gegenüberstehende Metallplatten lassen sich durch eine bestimmte Spannung weit stärker ungleichnamig aufladen als zwei gleich große, aber durch einen erheblichen Zwischenraum getrennte Platten. Die auf einer Einzelplatte unterzubringende Ladung wird zunächst dadurch begrenzt, daß sich alle Ladungen gleichen Vorzeichens abstoßen. Es ist, als wehre sich die auf der Platte vorhandene Ladung gegen das Hinzukommen weiterer Ladungen. Stellt man jedoch zwei Platten verschiedener Ladung einander gegenüber, wird ein großer Teil der Ladungen durch die entgegengesetzten Ladungen auf der anderen Platte gebunden. Damit läßt der „Gegendruck“ nach, und die „Unterbringungsmöglichkeit“ für weitere Ladungen steigt.

Schon ehe es eine Elektrotechnik gab, wurde diese Tatsache in der „Leidener“ oder „Kleistchen“ Flasche zur Elektrizitätsspeicherung ausgenutzt. Eine Leidener Flasche besteht aus zwei dünnen Metallbelägen; der eine ist auf der Innenseite, der andere

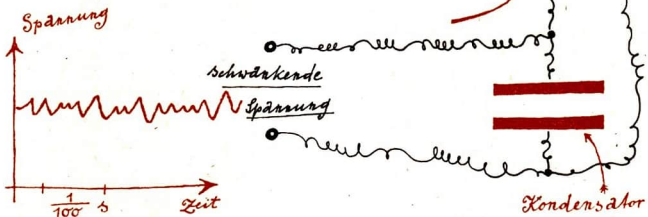
auf der Außenseite eines flaschenähnlichen Körpers aus Glas oder aus einem anderen Isolierstoff angebracht. Die Wirkungen, die man mit einer Elektrisiermaschine erzielt, lassen sich bedeutend verstärken, wenn man mit dieser zunächst eine Leidener Flasche auflädt. Auch der elektrische Funke und das Berühren sind dann nicht mehr ganz harmlos. Man kann von einer geladenen Leidener Flasche einen recht kräftigen elektrischen Schlag erhalten. Es gibt wohl keinen Experimentator, der das zu seinem Leidwesen nicht schon erfahren mußte.

Elektronen im Fahrstuhl

Die moderne Form der Leidener Flasche ist der „Kondensator“, ein wichtiges Bauelement der Nachrichtentechnik und Elektronik. Er wird in vielen Ausführungen hergestellt. Schon bei der Leidener Flasche nutzte man die Tatsache aus, daß die Größe der Ladungsmenge auch durch den Stoff zwischen den Platten beeinflusst wird. Setzen wir das Fassungsvermögen zweier gegenüberstehender Platten für elektrische Ladungen, die „Kapazität“ dieses einfachsten Kondensators, gleich 1, wenn der Plattenzwischenraum mit Luft ausgefüllt ist, so steigt die Kapazität auf das 5fache, wenn wir den Plattenzwischenraum mit Glas füllen, bei Glimmer auf das 7fache und bei einigen Werkstoffen, die eigens für diesen Zweck entwickelt wurden, sogar auf das 1000- bis 7000fache.

Auf die Konstruktion der verschiedenen Kondensatoren können wir nicht ausführlich eingehen. Man fertigt zum Beispiel Kondensatoren an, deren „Platten“ aus langen, zu einem Wickel aufgerollten Stanniolstreifen bestehen. Diese sind durch eine Papierbahn oder durch eine Kunststoffolie voneinander getrennt. Andere Kondensatoren benutzen hauchdünne Metalloxydschichten als isolierendes „Dielektrikum“, oder man brennt dünne Metallbeläge auf einen Keramikkörper.

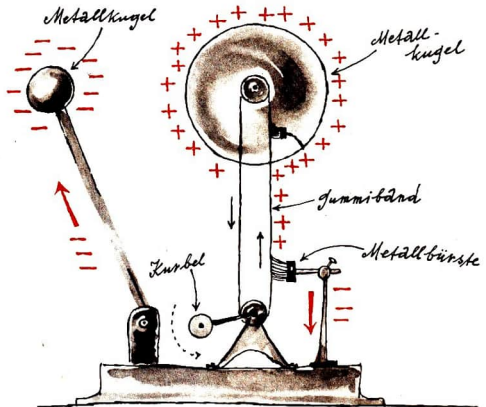
Eine Anwendungsmöglichkeit des Kondensators wollen wir bereits hier kennenlernen. Es kommt oft vor, daß eine Spannung schnell und um geringe Beträge schwankt. Solche Schwankungen



kann man mit Hilfe eines Kondensators abfangen. In der skizzierten Schaltung lädt sich der Kondensator auf einen mittleren Spannungswert. Sinkt die Spannung für kurze Zeit, ergänzt er den Spannungsabfall aus seinem Ladungsvorrat. Überschreitet die Spannung den mittleren Wert, so wandert zusätzliche Ladung auf den Kondensator, die er beim nächsten Absinken der Spannung wieder zur Verfügung stellt. Der Kondensator wirkt also ähnlich wie ein Staubecken, das trotz unregelmäßigen Zuflusses einen gleichbleibenden Wasserstrom abgibt.

Der Kondensator ist ein energiespeicherndes Bauelement. Für die Speicherung größerer Energiemengen ist der Kondensator jedoch nicht geeignet. Verglichen mit den Ladungsmengen, die durch elektrische Geräte fließen, ist sein Fassungsvermögen gering. Wollte man eine Taschenlampenbatterie durch einen gleich „leistungsfähigen“ Kondensator ersetzen, müsste man einen geradezu gigantischen, unerschwinglichen Kondensator zusammenbauen.

Für viele Untersuchungen der Elektrotechnik, zum Beispiel zur Prüfung von Hochspannungsanlagen und Isolierstoffen, benötigt man sehr hohe elektrische Spannungen. Der „Reibungselektrizität“ verdanken wir eine einfache Apparatur, mit der sich Spannungen von mehreren Millionen Volt erzeugen lassen. Dieses Gerät ist der sogenannte Bandgenerator (Van de Graaffsche Generator). Sein wichtigster Teil ist ein endloses Band aus Gummi oder aus einem anderen Isoliermaterial. Es läuft – von einem Motor angetrieben – über zwei Walzen. Nahe der unteren Walze schleift eine geerdete Metallbürste über das Band. Sie „streift“ Elektronen vom Band, die sofort zur Erde abfließen. Durch den Elektronenmangel wird das Band positiv elektrisch.



Die zweite Walze ist im Inneren einer großen, sorgfältig gegen die Erde isolierten Metallkugel angebracht. Dicht vor der Walze sitzt ein mit feinen Spitzen versehener Kamm. Er „sprüht“ die fehlenden Elektronen auf das Band, oder – anders ausgedrückt – er entzieht dem Band die positive Ladung. Durch die ständige Elektronenabgabe wird die Metallkugel immer stärker positiv gegenüber der Erde.

Bereits mit Bandgeneratoren einfachster Ausführung kann man auf diese Weise Spannungen von einigen Hunderttausend Volt erzeugen. Bei Generatoren, die noch höhere Spannungen abgeben sollen, werden statt der unteren Bürste unmittelbar vor dem Band weitere Drahtspitzen angebracht. Man verbindet sie so mit den Anschlüssen einer Hochspannungsquelle, daß elektrische Ladungen aus den Spitzen auf das Band gesprüht werden. Trotz der hohen Spannung ist allerdings die vom Bandgenerator gelieferte elektrische Leistung gering. Ein Kraftwerk ließe sich mit Bandgeneratoren nicht aufbauen.

Leider kommen derartige Aufladungen nicht nur beim Bandgenerator vor. Treibriemen aus Isoliermaterial laden sich in trockener Luft während des Laufens häufig so auf, daß man aus ihnen lange Funken ziehen kann. Ähnlich verhalten sich trockene Papier- und Stoffbahnen. Das ist nicht so nebensächlich, wie es auf den ersten Blick scheint. Durch Funken an Treibriemen ist schon manche Explosion verursacht worden. Sogar die Papierstreifen von Fernschreibern zeigen oft störende elektrische Aufladungen, und Papierbogen haften bisweilen durch elektrische Aufladung aneinander.

Ein Mensch, der mit Gummisohlen über einen Teppich oder über einen isolierenden Fußbelag läuft, lädt sich unter Umständen elektrisch auf. Zwar wird er keine „Funken sprühen“ oder seinem Nächsten beim Händeschütteln einen elektrischen Schlag versetzen – aber unter Umständen ist das Aufladen eben doch nicht harmlos. Als man in einem Werk zur Herstellung von Transistoren nach der Ursache für rätselhafte Ausfälle während des Fertigungsablaufs suchte, kam man dahinter, daß die Arbeiterinnen selbst völlig unbeabsichtigt diese Ausfälle verursacht hatten: Durch Laufen und durch Hin- und Herrutschen auf dem Stuhl hatten sie sich elektrisch aufgeladen, und bei der Montage der Transistoren entstand ein winziger Stromstoß, der ausreichte, um die Transistoren ausfallen zu lassen. Auch eine andere gefährliche Folge von elektrischen Aufladungen ist noch erwähnenswert: In Operationsräumen kam es schon des öfteren zur Explosion von Narkosemitteldämpfen.

Strömen isolierende Flüssigkeiten durch Rohre, Filter oder Siebe aus Isoliermaterial, treten unter Umständen sehr hohe elektrische Spannungen auf. Das trifft leider auch für Benzin und für einige andere brennbare Flüssigkeiten zu. Es versteht sich von selbst, wie gefährlich das werden kann. Tatsächlich wurde vor Jahren



ein Treibstofflager der US-Luftstreitkräfte durch eine solche elektrostatische Entladung in Brand gesetzt.

Staub lädt sich unter Umständen gleichfalls elektrisch auf, besonders wenn er in trockener Luft durcheinandergewirbelt wird. Wenn dabei auch im Staub selbst kaum Funken überspringen, kann es doch vorkommen, daß ein Funken zu einer Kante oder Spitze schlägt und eine Staubexplosion auslöst. Man kann sich dagegen schützen, indem man die Luftfeuchtigkeit in staubgefährdeten Räumen künstlich erhöht und alle Ecken und Kanten abrundet, um die Spitzenwirkung zu verringern.

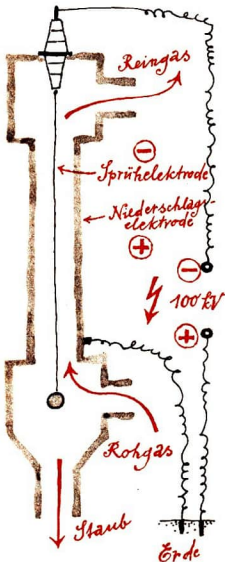
Wer jemals eine Zementfabrik besuchte, kennt den grauweißen Staub, der sich auf Häuser, Pflanzen und Boden der näheren Umgebung legt. Auch in manchen anderen Betrieben fallen große Mengen Flugstaub an. Sie in die Atmosphäre abzulassen, ist nicht ohne weiteres möglich. Der Staub schadet den Menschen, der Tier- und Pflanzenwelt, den Werken gehen wertvolle Stoffe verloren. Die Abgase von Hüttenbetrieben zum Beispiel enthalten oft Metallstaub, darunter sogar die Edelmetalle Gold und Silber; bei der Verhüttung von Zinkerzen fällt das für die Halbleitertechnik so wichtige Germanium an.

Man hat also allen Grund, den Flugstaub aus den Abgasen zu entfernen, bevor diese durch den Schornstein in die Luft austreten. Besonders wirksam und wirtschaftlich sind Elektrofilteranlagen.

Wie arbeitet ein derartiges Elektrofilter? Im Inneren eines senkrechten Metallzylinders ist ein dünner Draht als „Sprühelektrode“ ausgespannt. Seine Durchführung durch die Deckfläche wird sorgfältig gegen den Zylinder, die „Niederschlagselektrode“, isoliert. Zylinder und Draht werden mit den Anschlüssen einer Hochspannungsquelle von etwa 30 000 V bis 100 000 V verbunden. Der Zylinder ist geerdet, damit er keine Spannung gegen seine Umgebung führt.

Längs des Drahtes tritt wieder der Spitzeneffekt auf. Elektronen verlassen den Draht und fliegen in Richtung der Zylinderwand. Wenn das verunreinigte Gas den Zylinder durchströmt, laden die Elektronen die vorbeifliegenden Schmutzteilchen negativ auf. Die Teilchen werden infolgedessen von der positiven Zylinderwand angezogen und fallen, nachdem sie diese erreicht haben, in den konischen Teil der Filteranlage. Teilchen zwischen 0,01 μm und 1 mm Durchmesser lassen sich mit derartigen Anlagen abscheiden. Der Energieverbrauch ist sehr niedrig.

Beim Farbspritzen wendet man häufig ein ähnliches Verfahren an. Die Spritzpistole und das zu besprühende Metallwerkstück werden mit den Polen einer Hochspannungsquelle verbunden. Die vom Zerstäuber kommenden Farbteilchen werden aufgeladen und folgen den elektrischen Kraftlinien. Die Farbe wird völlig gleichmäßig verteilt, der Farbverbrauch ist entsprechend gering.



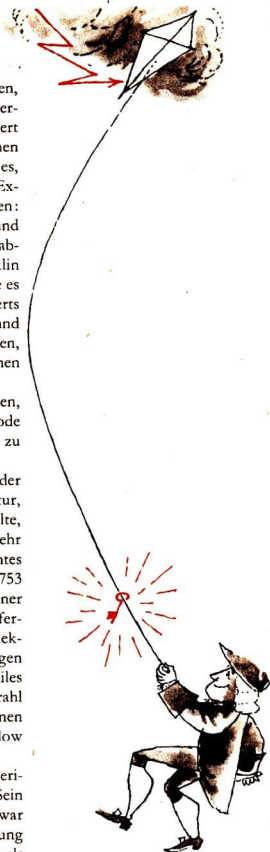
Es blitzt und donnert

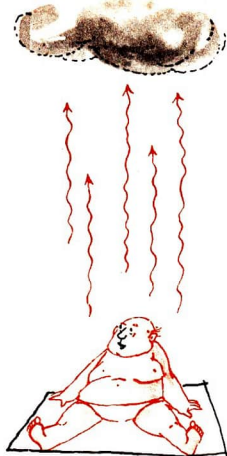
Ein Gewitter zählt zu den eindrucksvollsten Naturerscheinungen, und der Blitz ist wohl der auffälligste elektrische Vorgang überhaupt. Allerdings weiß man erst seit wenig mehr als zweihundert Jahren, daß es sich beim Blitz um einen gewaltigen elektrischen Funken handelt. Benjamin Franklin (1706–1790) unternahm es, diesen Nachweis zu führen. Bei einer Wiederholung seiner Experimente würden sich jedem Fachmann die Haare sträuben: Franklin ließ während eines Gewitters einen Drachen steigen und bemühte sich, die Lufterlektrizität durch die Drachenschnur abzuleiten. Der Erfolg blieb zunächst bescheiden, doch als Franklin einen Schlüssel an das Ende der Schnur knüpfte, bekam er, wie es in einem Physikbuch aus der Mitte des vorigen Jahrhunderts heißt, „zu seinem lebhaften Vergnügen deutlich sichtbare und fühlbare Fünkchen davon, die noch lebhafter und rascher wurden, als bald darauf Regen eintrat und dadurch die Schnur sich in einen Leiter verwandelte“.

Sicherlich wäre Franklins Vergnügen weniger lebhaft gewesen, wenn er gewußt hätte, wie nahe er bei seinen Versuchen dem Tode war, ja daß es wohl nur besonders glücklichen Umständen zu verdanken ist, daß er sie überlebte.

Ein Jahr nach Franklins Experiment wurde in Petersburg der Physiker Georg Richmann (1711–1753) durch eine Apparatur, mit der er die Lufterlektrizität beobachten und messen wollte, erschlagen: „Als nun der wackere Gelehrte (der übrigens sehr wohl die Gefahr ahnte, ihr aber, wie er selbst sagte, seines Amtes wegen mit Unerschrockenheit entgegentrat) am 6. August 1753 bei einem in der Ferne aufsteigenden Gewitter, dessen Donner schon deutlich hörbar wurde, mit einem Freunde, dem Kupferstecher der Petersburger Akademie Sokolow, zu seinem elektrischen Apparat eilte und, um ihn zu beobachten, sich dagegen bückte, fuhr ein Blitz aus dem Ende des isolierten oberen Theiles gegen das Haupt des Beobachters. Der weißbläuliche Feuerstrahl traf die Stirn und hinterließ daselbst einen mit Blut unterlaufenen Fleck. Der Unglückliche stürzte todt nieder, und auch Sokolow wurde beschädigt und betäubt . . .“

Mit mehr Vorsicht und besserer technischer Ausrüstung experimentierte – ebenfalls 1753 – de Romas in Südfrankreich. Sein Drachen war größer als der Franklins; in die Drachenschnur war ein dünner Draht eingezogen, um eine gut leitende Verbindung zu sichern; zwischen Schnurende und Experimentator wurde als Schutz eine isolierende Seidenschnur eingefügt. Nach zeitgenössischen Berichten waren die Ergebnisse mehr als eindrucksvoll: Schon beim Nahen eines Gewitters erhielt de Romas Funken, deren Knallen zweihundert Schritt weit zu hören war. Im Umkreis von mehreren Schritt richteten sich Strohhalme auf und hüpfen umher. Während des Gewitterregens leuchtete die Drachenschnur in ihrer ganzen Länge, und bei einem späteren





Versuch fuhren innerhalb einer Stunde 30 Feuerstrahlen von 10 Fuß Länge aus der Schnur zur Erde.

Harmlos waren demnach auch diese Experimente nicht, und wenn wir ausführlich auf sie eingingen, so nur, um zu zeigen, wie riskant Versuche sein können, bei denen aus Unwissenheit Naturgesetze nicht beachtet werden. Beenden wir unseren Abstecher mit der Feststellung, daß man auch gegenwärtig Blitze für Forschungszwecke einfängt (allerdings unter größten Vorsichtsmaßnahmen), zum Beispiel im Blitzforschungsinstitut auf dem Monte Salvatore bei Lugano.

Der Blitz zeigt mit aller Deutlichkeit, daß während eines Gewitters gewaltige elektrische Spannungen auftreten. Messungen haben Werte bis zu mehreren Hundert Millionen Volt ergeben.

Beim Entstehen eines Wärmegewitters, wie es an schwül-heißen Sommertagen auftritt, wird feuchtwarne Luft mit großer Geschwindigkeit in die Höhe gerissen. Die senkrechte Luftströmung erreicht dabei orkanartige Geschwindigkeit. In der Höhe bilden sich durch Abkühlen der Luft und Kondensieren des in ihr enthaltenen Wasserdampfes mächtige Haufenwolken, darüber der aus feinsten Eisnadeln bestehende „Zirruschirm“ der Gewitterwolke. Die emporgerissenen Wassertropfchen vereinigen sich zu größeren Tropfen, fallen – häufig gefroren – an den Seiten der emporsteigenden Warmluft nach unten, dabei eine kalte, abwärtsgerichtete Luftströmung erzeugend.

Diese heftigen, wirbelnden Luftbewegungen verursachen eine Ladungstrennung innerhalb der Wolken. Die Regentropfen werden durch die stürmischen Windstöße zerrissen oder zerstäubt. Dabei zeigen die „abgesprengten“ Tropfenteilchen negative elektrische Ladung, der weiterfallende Tropfen wird positiv. Im Verlauf dieser Vorgänge sammeln sich in den oberen Schichten der Gewitterwolken positive Ladungen, in den unteren negative Ladungen, die oft noch ein kleines Gebiet positiver Ladungen einschließen.

Der Blitz entsteht in der Gewitterwolke selbst, und zwar meistens zwischen dem negativen Wolkenteil und der eingeschlossenen positiven Ladung. Ausgangspunkt ist ein Wassertropfen oder ein Eiskristall in einem Gebiet großer Ladungsunterschiede. Der Blitz wächst, sich vielfältig verästelnd, ruckartig weiter. Dabei bahnt er sich seinen Weg selbst, indem er die unmittelbar vor seiner Spitze liegende Luft in elektrisch leitenden Zustand versetzt. So kommen Blitze zustande, die mehrere Kilometer lang sind und die Ladungen innerhalb der Wolken ausgleichen. Zahlreiche Blitze wandern nicht durch die Wolken weiter, sondern nehmen ihren Weg zur Erdoberfläche.

Natürlich interessierte man sich für die technischen Daten eines Blitzes. Man ist dabei auf die verschiedensten Werte gekommen. Es wurden Stromstärken von mehr als 200 000 A beobachtet; als Durchschnitt darf man jedoch nur etwa 20 000 A ansetzen.

Die Spannung erreicht bei schweren Gewittern mehrere Hundert Millionen Volt; für den „Durchschnittsblitz“ werden in der Fachliteratur etwa 2 000 000 V angegeben. Als Durchschnittswert für die Entladungsdauer finden wir 0,2 ms. Berechnen wir einmal den „Preis“ eines „Durchschnittsblitzes“: Wir erhalten die Energie, indem wir die Leistung mit der Blitzdauer multiplizieren.

$$\begin{aligned}
 E &= 2\,000\,000\,V \cdot 20\,000\,A \cdot 0,0002\,s \\
 &= 8\,000\,000\,Ws \\
 &= 8\,000\,kWs \\
 &= 2,22\,kWh
 \end{aligned}$$

Da die Kilowattstunde 8 Pfennig kostet, hätten wir für den Blitz nicht einmal zwanzig Pfennige zu bezahlen – ein recht billiges Feuerwerk!

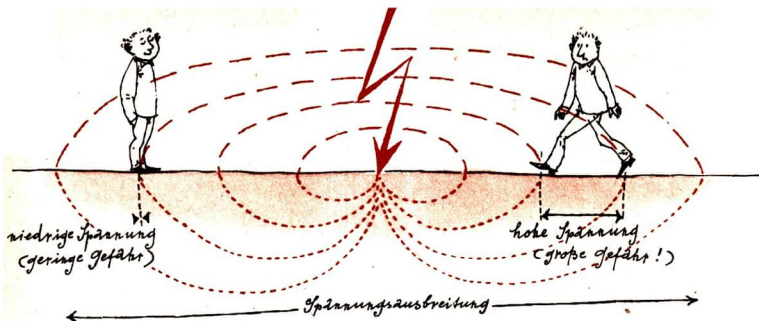
Das Ergebnis scheint im Widerspruch zur zerstörenden Wirkung eines Blitzes zu stehen. Wir dürfen aber nicht übersehen, daß diese Energie innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne wirksam wird. Die *Leistung* ist deshalb sehr groß; sie beträgt in unserem Beispiel 40 000 MW, das ist etwa die zehnfache Leistung des sibirischen Wasserkraftwerkes Bratsk.

Bei einem Blitzschlag sind meistens die Wärmewirkungen besonders folgenschwer. Brennbare Stoffe werden entflammt, Drähte schmelzen oder verdampfen. Bei Einschlägen in den Boden sind häufig deutliche Schmelzspuren sichtbar.

Fährt der Blitz in einen Baum, so nimmt er seinen Weg längs der gut leitenden Saftbahnen. Die Flüssigkeit verdampft dabei innerhalb kürzester Zeit, und durch den hohen Druck des Dampfes wird der Baum oftmals explosionsartig zersplittert oder auseinandergerissen. Auch bei der „Explosion“ von Mauerwerk infolge eines Blitzschlages spielt wahrscheinlich das in die Mauer gedrungene und plötzlich verdampfende Wasser eine große Rolle.

Jahr für Jahr tauchen Berichte auf, welche merkwürdige Wege ein einschlagender Blitz mitunter wählt. Selbst wenn man die „frei nach der Phantasie gestalteten“ Meldungen unberücksichtigt läßt, bleibt noch genug an Staunenswertem übrig – zum Beispiel jener Blitz, der ein Haus in Brand setzte, dabei in den Feuermelder fuhr und die Feuerwehr alarmierte.

Für einen Menschen bedeutet es meistens den Tod, vom Blitz getroffen zu werden. Nur selten kommt jemand mit Verbrennungen, Lähmungen oder anderen Schäden davon. Es gibt reichlich statistisches Material über die Zahl der Todesfälle durch Blitzschlag. In den USA wird durchschnittlich täglich ein Mensch durch den Blitz getötet. Von 1899 bis 1908 wurden in Deutschland laut Statistik 1634 Menschen vom Blitz erschlagen.



Nicht immer wird dabei das Opfer unmittelbar getroffen. Ein Blitz, der in den Boden fährt, ruft im näheren Umkreis eine Ansammlung elektrischer Ladung hervor, deren „Dichte“ nach außen hin rasch abnimmt. Zwischen zwei Punkten, die verschieden weit von der Einschlagstelle entfernt sind, entsteht daher eine elektrische Spannung. Läuft oder steht ein Mensch in diesem Bereich, kann diese „Schrittspannung“ so groß werden, daß sie einen tödlichen Strom durch den Körper treibt.

... doch die Buchen sollst du suchen !

Wer bei einem Gewitter völlig sicher sein möchte, müßte sich in einen Faradayschen Käfig setzen. Tatsächlich hat man hier und da Brennstofftanks und Sprengstofflager durch eine Art „Käseglocke“ aus engmaschigem Drahtgeflecht geschützt. Aber auch wir befinden uns während eines Gewitters häufig in einem Faradayschen Käfig – nämlich dann, wenn wir ein Verkehrsmittel benutzen.

Entgegen mancher noch immer verbreiteten Meinung ist es ungefährlich, im Eisenbahnzug durch ein Gewitter zu fahren. Die Metallkarosserie der Wagen, die überdies durch das Schienennetz geerdet ist, schützt uns. Schläge der Blitz in einen Wagen ein, so kämen die Passagiere mit dem Schrecken davon. Ebenso ist es, wenn wir uns während eines Gewitters in einer Schiffskabine aufhalten.

Völlig falsche Vorstellungen gibt es auch über die Blitzgefahr während einer Flugreise. Hier wäre zunächst zu sagen, daß die Maschinen des Linienflugverkehrs Gewittern stets auszuweichen suchen. Man tut das weniger aus Sorge vor Blitzschlägen als vielmehr deswegen, weil man durch Böen und heftige Winde die Fluggäste nicht gar zu sehr durchschütteln lassen möchte. Natürlich werden nun Leser fragen: „Wenn aber doch ein Blitz ins Flugzeug schlägt?“ Auch das ist schon vorgekommen, und bei

einem großangelegten Programm zur Erforschung von Gewittern hat man derartige Blitzschläge regelrecht provoziert, indem man Maschinen in die aktivsten Teile der Gewitterwolken schickte. Dabei kam es mehrfach zu Einschlägen. Sie wurden dem Flugzeug, das im Grunde auch einen großen Faradayschen Käfig darstellt, in keinem Falle gefährlich. Langjährige Untersuchungen mehrerer großer Fluggesellschaften hatten das gleiche Resultat. Lediglich Störungen an den Navigationseinrichtungen und den Funkgeräten wurden beobachtet, führten aber weder zu Unfällen noch zu Notlandungen.

Ein geschlossener Kraftwagen mit Metallkarosserie ist ebenfalls ein Faradayscher Käfig; wir können uns in ihm recht sicher fühlen. Allerdings muß die Antenne des Autoradios eingezogen oder wenigstens zusammengeschoben werden; denn sie böte dem Blitz unter Umständen einen Durchschluß ins Wageninnere. Falsch wäre es, sich (wie bisweilen empfohlen wurde) bei einem schweren Gewitter unter den Wagen zu legen. Die Schutzwirkung des Faradayschen Käfigs fehlte dann, ein Blitz würde wahrscheinlich vom Chassis über unseren Körper in die Erde fahren.

Die isolierenden Gummireifen des Wagens sind völlig bedeutungslos. Der Blitz überspringt sie ohne weiteres; außerdem sind sie bei einem Gewitter ohnehin meistens naß. Deshalb sind auch Radfahrer oder Motorradfahrer *nicht* geschützt – im Gegenteil: Sie ragen oft über das umliegende Gelände und werden daher vom Blitz „bevorzugt“.

Verkehrsunfälle bei Gewitter werden meist durch „sekundäre“ Wirkungen verursacht: Ein dicht vor dem Fahrzeug niedergehender Blitz blendet den Fahrer oder ruft eine Schockwirkung hervor; es geschieht auch, daß Lichtsignalanlagen an Schranken oder Verkehrsampeln durch das Gewitter gestört werden. Fahren Sie also trotz des Faradayschen Käfigs vorsichtig, wenn es ringsum blitzt und kracht!

Am ehesten schlägt der Blitz in hohe, gut leitende Gegenstände ein. Aus diesem Grunde sind Fußgänger im Wald stets sicherer als auf freiem Feld, wo sie in weitem Umkreis die einzige Erhebung darstellen. Überrascht uns aber ein schweres Gewitter auf ebener Fläche, legen wir uns klugerweise flach auf den Boden.

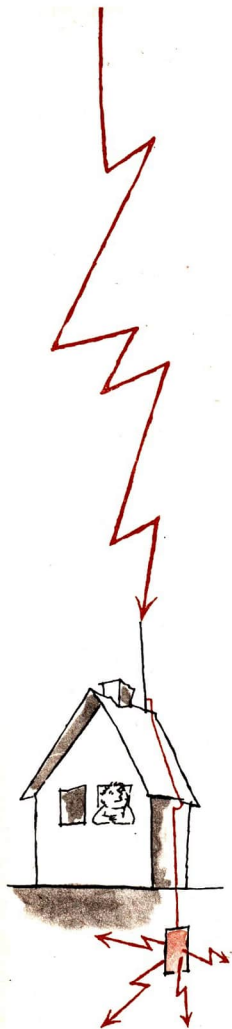
Jedermann kennt das Sprichwort: „Vor den Eichen sollst du weichen, doch die Buchen sollst du suchen.“ Sein Wert ist noch umstritten. Langjährige Beobachtungen haben zwar ergeben, daß Eichen tatsächlich öfter Blitzspuren aufweisen als Buchen; man ist sich jedoch nicht darüber einig, ob das auf die tiefreichenden, weitverzweigten Wurzeln der Eichen zurückzuführen ist oder einfach darauf, daß Eichen sehr alt werden und infolgedessen öfter Ziel eines Blitzes waren. Wie dem auch sei – alleinstehende Bäume, gleich welcher Art, sind immer blitzgefährdet. Gleiches gilt für Feldscheunen, Heuschöber und Strohdieimen.



so nicht

... sondern so





Gebäude werden durch Blitzableiter geschützt. Sie fangen den Blitz ab und leiten ihn zur Erde, bevor er am Gebäude selbst Schaden anrichten kann. Als Erfinder des Blitzableiters gilt Benjamin Franklin. Immer wieder jedoch haben Historiker und Physiker alte Berichte und Legenden dahingehend ausgelegt, daß schon den Priesterkasten des Altertums der Blitzableiter nicht nur bekannt gewesen ist, sondern daß er zur Einschüchterung des „gemeinen Volkes“ benutzt wurde.

So deutete man die Stiftshütte und die Bundeslade der alttestamentarischen Juden als Leidener Flasche, die von zahlreichen hohen Stangen über Metallketten aufgeladen wurde und jeden Unberufenen, der sich dem „Allerheiligsten“ näherte, durch „himmlisches Feuer“ tötete.

Der Herodianische Tempel in Jerusalem soll, obwohl auf einem hohen Felsen gelegen, nie durch einen Blitz Schaden gelitten haben. Manche Gelehrte führen das auf eine geschickte Verbindung von Blitzschutz- und Wasserversorgungsanlage zurück. Das Tempeldach war mit Metallplatten belegt. Vom Dachrande aus liefen zahlreiche kupferne Röhren zu Trinkwasserzisternen im Felsen. Außerdem trug das Dach eine große Zahl von Metallspitzen – angeblich, um ein Beschmutzen des Heiligtums durch Vögel zu verhindern. Dem widerspricht, daß die Spitzen so lang waren, daß sie bei der Belagerung des Tempels durch die Römer als Wurfgeschosse verwendet wurden.

Der Blitzableiter hatte sich nach Franklins Tod schnell allgemein durchgesetzt, trotz des anfänglichen Widerstandes der Kirche, die im Anbringen eines Blitzableiters einen unerlaubten Eingriff in Gottes Gerichtsbarkeit sah. Doch „daß in den Kirchen gepredigt wird, macht deshalb die Blitzableiter auf ihnen nicht unnötig“ – diesem Wort des geistvollen Spötters Lichtenberg mußte man schließlich zustimmen.

Wie wirksam Blitzableiter zu schützen vermögen, geht aus zahlreichen und umfangreichen Untersuchungen der Feuerversicherungsgesellschaften in aller Welt hervor. In Österreich zum Beispiel sanken innerhalb weniger Jahre durch umfassenden Blitzableiterbau die Blitzschäden von der ersten auf die vierte Stelle aller Brandursachen.

Wichtigster Teil jeder Blitzableiteranlage sind die „Fangstangen“. Es sind freistehende, oftmals zugespitzte Metallstangen, die an den höchsten Stellen eines Gebäudes errichtet werden. Sie sind durch eine Leitung mit metallischen Erdplatten, sogenannten Erdern, verbunden, die bis in Grundwassertiefe versenkt werden. Da der Blitz auch in andere Metallteile des Daches einschlagen kann, sind Dachrinnen, Schneefanggitter und ähnliche Vorrichtungen gleichfalls an die Erdleitung anzuschließen. Für die Errichtung von Blitzableiteranlagen gelten strenge, aber notwendige Vorschriften, die von Fachgremien ausgearbeitet wurden. Eine nicht sachgemäße Blitzableiteranlage kann nämlich mehr schaden

als nützen, da sie den Blitz auf Gebäudeteile oder Leitungen überspringen läßt.

Leider sind Verstöße gegen die Vorschriften beim Blitzableiterbau nicht selten; ihre Zahl hat in den vergangenen Jahren sogar zugenommen. Zu den „anderen Metallteilen“, die in die Blitzableiteranlage einzubeziehen sind, gehören nämlich auch Rundfunk- und Fernsehantennen. In vielen Ländern – auch in unserer Republik – beobachtet man seit mehreren Jahren eine Zunahme der Blitzschläge in Antennen. Teilweise wurden dabei erhebliche Zerstörungen angerichtet, größere Brände verursacht und sogar Fernsehzuschauer vor dem Bildschirm getötet. In jedem dieser Fälle war die Blitzschutzanlage der Antennen nicht sachgemäß ausgeführt. Dem steht die Tatsache gegenüber, daß bei Einschlügen in vorschriftsmäßige Antennenanlagen stets nur geringfügige Schäden angerichtet wurden.

Wir sollten daher unsere Fernsehantenne unbedingt von einem Fachmann errichten lassen. Das „Argument“, es habe in der ganzen Gegend noch niemals eingeschlagen, löscht keinen Brand.

VON MORSE BIS TELEX

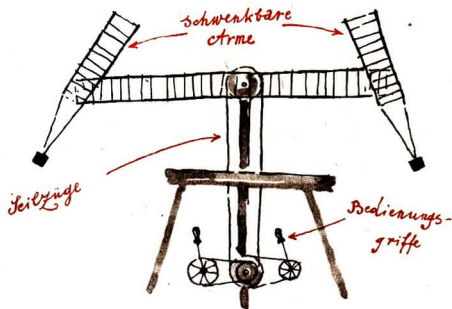
Punkte, Striche, Buchstaben

Von alters her ist man um schnelle Nachrichtenübermittlung bemüht. Boten, akustische und optische Zeichen trugen die Meldungen – anfänglich handelte es sich meistens um Mitteilungen militärischen Inhalts – über weite Strecken und in oftmals überraschend kurzer Zeit. Mit dem Aufkommen der Industrie und der Ausweitung des Handels wurde das Bedürfnis nach rascher und sicherer Nachrichtenübermittlung immer größer; denn auch Kaufleute und Fabrikanten forderten jetzt bessere Verständigungsmöglichkeiten.

Der erste Telegraf, der weite Verbreitung fand, war der „Balkentelegraf“ der Gebrüder Chappe (Claude Chappe, 1763–1805). Er arbeitete mit weithin sichtbaren, beweglichen Hebeln, deren Stellung jeweils einem Buchstaben oder einer Zahl entsprach. Die Hebel wurden auf Türmen an erhöhten Geländepunkten angebracht. Durch eine Kette solcher Türme konnten Mitteilungen über große Entfernungen weitergegeben werden.

Im Jahre 1792 legten die Gebrüder Chappe die Beschreibung ihres optischen Telegrafen dem französischen Nationalkonvent vor. Ihre Prioritätsansprüche wurden jedoch nicht anerkannt, denn einen ähnlichen Telegrafen hatte Robert Hooke schon 1684 vorgeschlagen. Allerdings hinderte das die Chappes nicht, sich auch weiterhin eifrig für ihre Erfindung einzusetzen. In Frankreich, später auch in Deutschland, entstanden lange Telegrafennetze nach dem „System Chappe“.





Die Geschwindigkeit der Telegrammübermittlung war am Tage und bei guten Sichtverhältnissen beachtlich. Versuche, nachts mit Lampen zu arbeiten, brachten keine rechten Erfolge, und bei Nebel oder starkem Dunst war es unmöglich, von einem Turm bis zum nächsten zu sehen. Man suchte daher trotz der Chappeschen Telegrafien nach anderen Möglichkeiten der schnellen Nachrichtenübermittlung und stieß dabei sehr bald auf die Elektrizität. Sie machte keinen Unterschied zwischen Tag und Nacht, und sie war so schnell, daß alle Versuche, ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit zu bestimmen, vorerst fehlgeschlagen waren.

Die ersten Versuche, elektrisch zu telegrafieren, fallen sogar in die Zeit vor Chappe. Allerdings ist nicht belegt, ob diese Experimente Erfolg hatten. So wird 1753 in einer Zuschrift an das englische „Scott's Magazine“ ein elektrischer Telegraf vorgeschlagen; ein weiteres Projekt soll um 1775 Friedrich II. unterbreitet worden sein. Auch liegen Berichte aus den letzten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts über elektrische Telegrafien in Spanien vor, und in Frankreich soll ein gewisser Lomond einen elektrischen Telegrafien erfunden haben.

Sieht man von Bemühungen ab, die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes zur Nachrichtenübermittlung zu benutzen, so führten die Experimente mit der elektrischen Telegrafie erst zum Erfolg, nachdem die elektromagnetischen Wirkungen des Stromes entdeckt und leistungsfähige Batterien als Spannungsquellen entwickelt worden waren. Ampère schlug einen Telegraf vor, bei dem für jeden Buchstaben eine Magnetsadel vorgesehen war, die über eine besondere Leitung zum Ausschlagen gebracht werden sollte. Schon der Aufwand für die Leitungen machte diesen Telegrafien unausführbar. Bescheidener war der Apparat, den Baron Pawel Schilling von Canstatt 1833 in Petersburg vorführte: Acht Leitungen genügten für die elektrische Übertragung von Buchstaben, die wiederum mit Hilfe von Magnetsadeln angezeigt wurden. Auch dieser Telegraf aber hatte noch viele Mängel, die seine Einführung verhinderten.

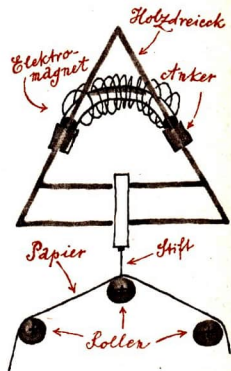
Besser funktionierte der Telegraf, den Karl Friedrich Gauß (1777–1857) und Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) in Göttingen zwischen der Sternwarte und dem Magnetischen Observatorium in Betrieb nahmen. Er benötigte nur noch zwei Leitungen und arbeitete gleichfalls mit Magnetenadeln. Sie wurden durch Stromstöße verschiedener Richtungen nach zwei Seiten zum Ausschlagen gebracht. Verschiedene Kombinationen der Ausschläge entsprachen den Buchstaben des Alphabets. Der Gauß-Webersche Telegraf fand viele Nachfolger. Sie hatten allerdings einen Mangel: Die Schriftzeichen mußten am Empfangsort erst abgelesen und dann niedergeschrieben werden. Die Bezeichnung Telegraf, Fernschreiber, trifft im Grunde auf diese Geräte nicht zu.

Den ersten schreibenden Telegrafen verdanken wir dem Münchner Professor Karl August Steinheil (1801–1870). Auch dieser Telegraf setzte sich nicht durch. Neben technischen Mängeln waren es vor allem die Zerrissenheit Deutschlands in kleine Fürstentümer, alte Vorurteile, kleinliche Bedenken und Interessengegensätze, die seine Einführung verhinderten. Eine Entdeckung Steinheils aber sollte von größter Bedeutung für die Telegrafie werden, setzte sie doch den Aufwand an Leitungsmaterial um die Hälfte herab: Bei Versuchen, die er an der Bahnstrecke Nürnberg–Fürth ausführte, fand Steinheil heraus, daß man einen der beiden stromführenden Drähte durch das elektrisch leitende Erdreich ersetzen konnte.

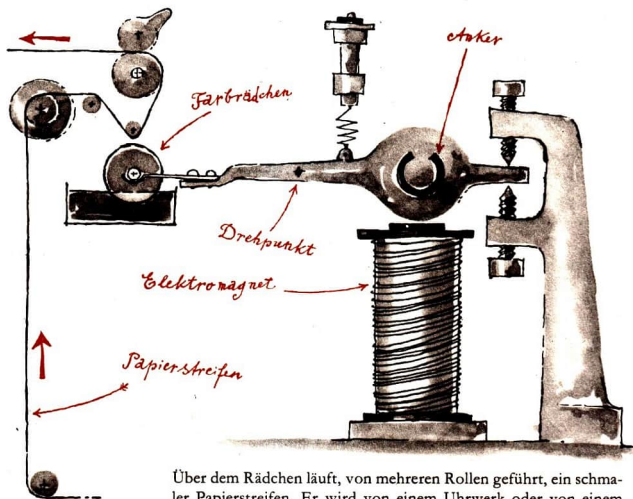
Der berühmteste und verbreitetste Telegraf, der auch heute noch verwendet wird, war der des amerikanischen Malers Samuel Morse (1791–1872). MorSES erster Apparat konnte den Beruf seines Erfinders nicht verleugnen, denn er wurde mit Hilfe einer Staffelei montiert. Vor den Polen eines kräftigen Elektromagneten hing ein Holzdreieck. Den Polen gegenüber waren zwei Eisenplättchen als Anker festgeschraubt, an der Basis des Dreiecks war ein Schreibstift befestigt. Er glitt über einen Papierstreifen, der von einem Uhrwerk langsam unter dem Dreieck vorbeigezogen wurde.

Schickte man Stromstöße durch den Magneten, wurde der Anker angezogen und wieder freigegeben. Auf dem Papierstreifen entstand eine Zackenlinie. Ein Zacken bedeutete eine „1“, drei Zacken eine „3“ usw. Morse telegrafierte also zunächst Ziffernfolgen. Sie mußten mit Hilfe eines Codebuches in Buchstaben und Wörter übersetzt werden. 1844 führte Morse, dessen Apparat nach der ersten Ausführung viele Verbesserungen erfahren hatte, eine Telegrafieverbindung von Washington nach Baltimore über eine Distanz von fast 70 km vor.

Am bekanntesten wurde der Name MorSES durch das „Morsealphabet“. Es ordnete jedem Buchstaben und jeder Ziffer eine Kombination von langen und kurzen Stromstößen zu, also zum Beispiel – für a, – – – – für z, – für 6. Wieweit Morse selbst an der Festlegung dieses Systems beteiligt war, ist um-



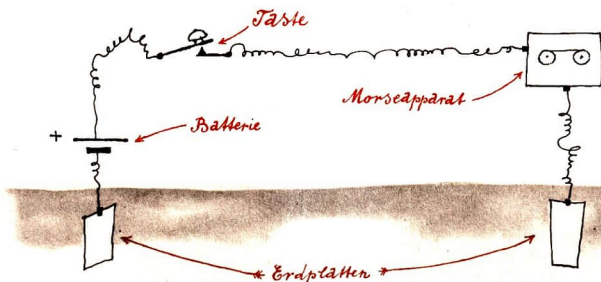
stritten. Auf alle Fälle stammt die heute international gültige Festlegung des Morsealphabets aus der Zeit nach Morse. Der „Morseapparat“ erhielt seine endgültige Form in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Das Bild zeigt seinen Aufbau. Wichtigster Teil ist der Elektromagnet, der von Stromstößen im Rhythmus der Morsezeichen durchflossen wird. Er zieht den an einem Hebel befestigten Anker an, der nach jedem Stromstoß durch eine Feder in die Ruhestellung zurückgezogen wird. Am Hebelende ist das leicht drehbare „Farbrädchen“ angebracht. Es taucht mit seinem unteren Rande in einen kleinen Farbbehälter.



Über dem Rädchen läuft, von mehreren Rollen geführt, ein schmaler Papierstreifen. Er wird von einem Uhrwerk oder von einem Elektromotor transportiert. Das Farbrädchen wird im Rhythmus der Morsezeichen gegen das Papier gedrückt. Da sich das Papier bewegt, werden Punkte und Striche geschrieben.

„Gegeben“ werden die Morsezeichen mit der Morsetaste, einem Schalter, der den Stromkreis schließt, solange der am Ende eines Hebels sitzende Knopf herabgedrückt wird. Der Kontakthub und die nötige Druckkraft können so eingestellt werden, daß Finger und Handgelenk auch bei längerer Betätigung der Taste nicht ermüden.

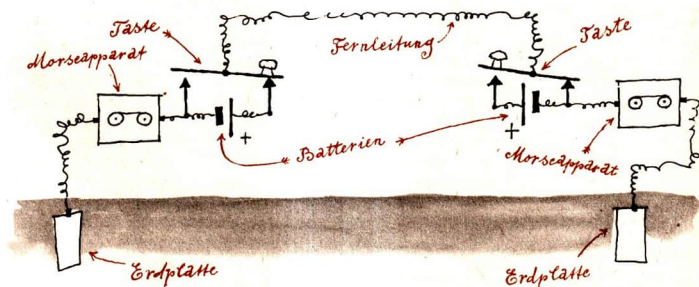
Den Stromlaufplan einer einfachen Morseverbindung zeigt unsere Skizze. Sie ist allerdings nur einseitig, ein Telegrafieren in Gegenrichtung ist nicht möglich. Selbstverständlich wäre es denkbar,



eine zweite Anlage in umgekehrter Richtung zu betreiben, doch kann man den in diesem Falle notwendigen zweiten Leitungsdraht durch einen Kunstgriff sparen.

Die Morsetasten sind jetzt mit einem weiteren Kontakt ausgerüstet, so daß einer der beiden Kontakte jeweils offen, der andere geschlossen ist. In der gezeichneten Stellung fließt der Strom der linken Spannungsquelle durch die Fernleitung über die Morsetaste der Gegenstelle zum dortigen Morseapparat und von da aus durch die Erde und den Morseapparat der Sendestelle zur Batterie zurück. Beide Apparate schreiben; an der Sendestelle ist jederzeit eine Kontrolle des durchgegebenen Textes möglich. Bei der Antwort werden beide Morseapparate von der zweiten Spannungsquelle gespeist.

Besondere Schwierigkeiten bereitete anfänglich das Überwinden größerer Entfernungen, weil die Ströme durch die langen Leitungen und durch den Widerstand des Erdbodens geschwächt wurden. Man half sich zunächst, indem man die Windungszahlen der Spulen in den Morseapparaten erhöhte. Eine wirklich befriedigende Lösung aber brachte erst die Erfindung des Relais.

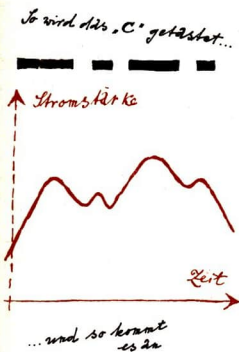


Mit dem Morseapparat, dem „Farbschreiber“, ließen sich in der Minute 50 bis 70 Buchstaben übermitteln. Gegenüber den ersten Telegrafen, die es nur auf 6 bis 8 Buchstaben je Minute brachten, war das ein beachtlicher Fortschritt. Der Morseapparat genügte den Ansprüchen, solange nur wenige und kurze Meldungen durchzugeben waren. Er reichte nicht mehr aus, als sich der Kundenkreis des Telegrafen erweiterte und vor allem längere Telegramme übermittelt werden sollten. 40 Minuten wären nötig, diese Buchseite mit dem Farbschreiber zu übermitteln. Das Telegrafieren von ausführlichen Presseberichten oder Kommentaren würde Stunden beanspruchen.

Besonders unangenehm war die geringe Telegrafiergeschwindigkeit bei Unterseekabeln; denn die Herstellung und das Auslegen hatten enorme Summen verschlungen. Technische Schwierigkeiten kamen hinzu. Die Telegrafierströme wurden durch die lange Wegstrecke, in die man keine Relais schalten konnte, sehr geschwächt. Man mußte neuartige, besonders empfindliche Empfangsapparate entwickeln. Trotzdem kamen die Zeichen undeutlich am Kabelende an und flossen beim Versuch, schneller zu telegrafieren, ineinander.

Zweierlei kann man tun, um die Leistungsfähigkeit einer Telegrafienlinie zu steigern; die Telegrafiergeschwindigkeit erhöhen oder die Leitungen besser ausnutzen, indem man gleichzeitig mehrere Telegramme in beiden Richtungen übermittelt.

Auf vielen Linien hätte man schneller telegraphieren können, wenn nicht die physische Leistungsfähigkeit der Telegraphisten eine Grenze gezogen hätte. Man mußte daher versuchen, die Morse-taste durch eine schneller arbeitende, mechanisierte Einrichtung zu ersetzen. Das gelang mit dem „Schnellmorsegerät“.



Der Telegrammtext wird zunächst in einen „Locher“ getippt. Er besitzt eine Tastatur wie eine Schreibmaschine. Drückt man eine Buchstaben- oder Zifferntaste, wird eine dem jeweiligen Morsezeichen entsprechende Lochkombination in ein Papierband gestanzt. Auf diese Weise wird das ganze Telegramm als „Lochstreifen“ gespeichert.

Ein Elektromotor zieht den Streifen durch den „Lochstreifensender“. Der Streifen wird zwischen einer Metallwalze und „Fühlern“ hindurchgeführt. Wenn ein Loch unter den Fühlern durchläuft, besteht eine leitende Verbindung zwischen Walze und Fühler, und es wird ein entsprechender Stromstoß in die Fernleitung gegeben. Auf diese Weise können in der Minute mehr als 2000 Buchstaben abgetastet werden.

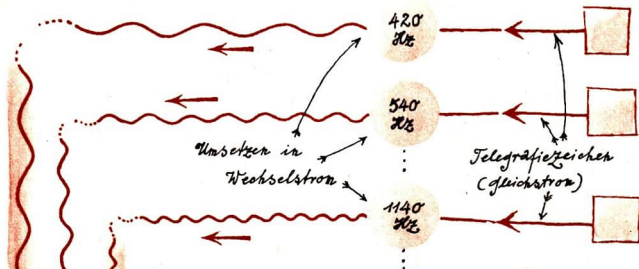
Der Farbschreiber ist für den Schnellmorsebetrieb viel zu träge. Seine Stelle nehmen „Recorder“ ein. Ihr Elektromagnet führt einen sehr leichten Schreibhebel über ein Papierband. Dabei wird eine Wellenlinie geschrieben, deren Ausbuchtungen den Morsezeichen entsprechen. Ein Telegrafist, an dem der Streifen vorbeiläuft, überträgt die Recorderschrift mit der Schreibmaschine in Druckbuchstaben.

Bei der hohen Arbeitsgeschwindigkeit einer Schnellmorseanlage kann ein Telegrafist den Lochstreifensender nicht ständig auslasten. Es sind daher häufig mehrere Locher je Sender vorhanden, die vorgefertigte Streifen für das ununterbrochene Arbeiten des Senders liefern. Auf der Empfängerseite kann der Recorderstreifen zerschnitten und von mehreren Bearbeitern gleichzeitig in Druckschrift übertragen werden. Wichtige Meldungen können wiederholt durchgegeben werden.

Jahrzehntelang war der Schnellmorsebetrieb auf langen Telegrafienlinien weit verbreitet. Heute tritt mehr und mehr die Fernschreibmaschine an seine Stelle. Im Weitstrecken-Funkverkehr sind Schnellmorseanlagen noch oft anzutreffen, weil man ihre Arbeitsgeschwindigkeit leicht den jeweiligen Verkehrsverhältnissen anpassen kann. Bei schlechten Empfangsbedingungen setzt man die Arbeitsgeschwindigkeit herab; bei guten Empfangsverhältnissen erhöht man sie. Die Locher können unabhängig davon mit stets gleichbleibender Geschwindigkeit arbeiten.

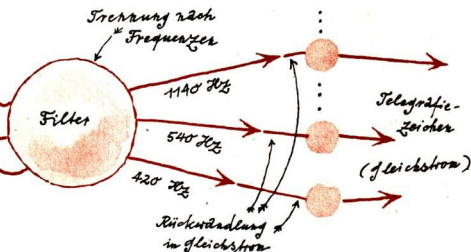
Der nächste Schritt der Mechanisierung wäre es gewesen, auch die Rückübertragung der Recorderschrift in Druckbuchstaben selbsttätig ablaufen zu lassen. Diesen Schritt hat man nicht getan. Stattdessen hat man sich um einen Telegrafen bemüht, in dessen Sender unmittelbar Druckbuchstaben eingegeben werden und der alle weiteren Schritte von allein erledigt, während das Telegramm auf der Empfängerseite sofort in Druckschrift niedergeschrieben wird. Derartige „Typendrucktelegrafen“ gibt es seit langem. Sie haben im Fernschreiber ihre bisher beste technische Lösung gefunden. Ehe wir diese kennenlernen, sei noch etwas über die bessere Ausnutzung der Kabel- und Leitungswege gesagt.





Eine hohe Telegraphiergeschwindigkeit verliert ihren Sinn, wenn durch Übermittlungsfehler Rückfragen und Wiederholungen erforderlich werden. Fremde Störimpulse, die mancherlei Ursache haben können, dürfen die Zeichen nicht verfälschen. Dieses Ziel läßt sich auf verschiedene Weise erreichen. Es gibt zum Beispiel den „Doppelstrombetrieb“. Bei ihm fließt auch zwischen den Morsepunkten und -strichen Strom durch das Kabel, allerdings in umgekehrter Richtung. Die Zeichen werden dadurch eindeutiger und leichter erkennbar. Auch wurden – vor allem für den Kabel- und Fernschreibverkehr – besondere Telegrafenalphabete geschaffen, deren Zeichen aus fünf oder sieben Stromstößen wechselnder Richtung zusammengesetzt sind.

Die „Wechselstromtelegrafie“ ermöglicht es, gleichzeitig Dutzende von Telegrammen über eine Leitung zu schicken. Wir können das Arbeitsprinzip nur andeuten: Die Telegraphiezeichen der einzelnen Sendeapparate werden in Wechselströme verschiedener Frequenz umgesetzt, zum Beispiel in Wechselstrom von 420 Hz, 540 Hz, 660 Hz usw. Diese Ströme laufen gemeinsam über eine Leitung beziehungsweise durch ein Kabel. Am Leitungsende werden sie durch elektrische Filter wieder voneinander getrennt und den Schreibgeräten zugeleitet.



Auch das Fernsprechnetz läßt sich nebenbei zur Telegrammübermittlung heranziehen. Bei der „Überlagerungstelegrafie“ werden die Telegrafiezeichen mit Wechselstrom so hoher Frequenz übertragen, daß sie den Telefonverkehr nicht stören. Am Leitungsende werden die Telegrafiezeichen dann durch entsprechende Filter wieder aussortiert.

Telegrafieren per Schreibmaschine

Man hat, wie wir sahen, vielerlei ausgedacht, um den Telegrafieverkehr zu verbessern. Trotzdem ging der Telegrammverkehr, der seit dem letzten Drittel des 19. Jahrhunderts stürmisch angewachsen war, nach 1920 wieder zurück. Die Hauptschuld daran trug der Fernsprecher. Dank seiner technischen Vervollkommenung und seiner Verbreitung konnte man jederzeit auch mit weit entfernten Partnern sprechen, ohne zum Postamt zu gehen und ohne ein Telegrammformular auszufüllen.

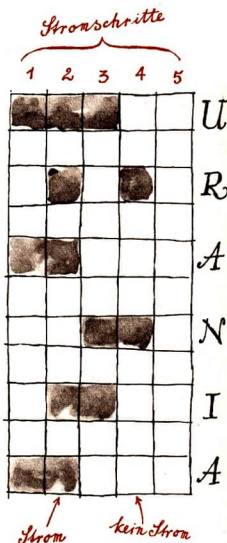
Wollte die Telegrafie mit dem Fernsprecher Schritt halten, mußte sie ihren Kunden ähnliche Annehmlichkeiten bieten. Dazu genügte es nicht, jedem, der es wünschte, „seinen“ Telegrafengerät auf den Tisch zu stellen, sondern dieser Apparat durfte nicht schwieriger zu handhaben sein als ein Telefon.

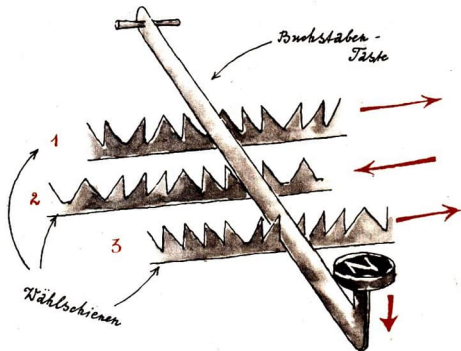
Die Fernschreibmaschine erfüllt diese Bedingungen. Sie ist Sender und Empfänger zugleich. Der Text, den der Absender in die Tasten seiner Fernschreibmaschine tippt, wird von der Maschine des Empfängers sofort niedergeschrieben. Der Empfänger kann seine Antwort unmittelbar zurückschreiben. Dabei liefert die eigene Maschine gleichzeitig eine Kopie des zu übermittelnden Textes.

Über die Verbindungsleitung zwischen den Fernschreibpartnern laufen keine Morsezeichen, sondern die Impulse des „Fünferalphabets“. Da es international vereinbart wurde, können Fernschreibmaschinen auch im zwischenstaatlichen Betrieb zusammenarbeiten. Jedes Zeichen des Fünferalphabets setzt sich aus fünf gleichlangen Schritten „Strom“ oder „kein Strom“ zusammen.

Präzisieren wir nun die Aufgabe der Fernschreibmaschine: Sobald beim Sender eine Taste – etwa der Buchstabe „B“ – gedrückt wird, muß die Maschine eine entsprechende Impulskombination in die Leitung schicken. In der Gegenstelle, in der als Empfänger dienenden Fernschreibmaschine, müssen die ankommenden Impulse den Typenhebel „B“ hochschnellen und den Buchstaben „B“ drucken. Auch wer wenig von Technik versteht, wird sich vorstellen können, daß eine Maschine, die derart komplizierte Arbeitsschritte selbsttätig ausführt, nicht einfach gebaut ist.

Quer unter den Tastenhebeln der Fernschreibmaschine liegen sechs parallele, in ihrer Längsrichtung verschiebbare „Wählschienen“. Sie tragen zahlreiche Kerben mit nach rechts oder links abgeschrägten Flanken.





Fünf von diesen Schienen dienen dazu, die Impulskombinationen vorzubereiten, die von der Fernschreibmaschine in die Leitung geschickt werden sollen.

Wird eine Buchstabentaste gedrückt, trifft sie in jeder Schiene auf eine Kerbe. Dabei wird die Schiene nach rechts oder links verschoben, je nachdem, welche Kerbenflanke abgeschrägt ist. In der Skizze, in der nur drei Schienen dargestellt sind, werden die 1. und die 3. Schiene nach rechts, die 2. nach links verschoben.

Jede Schiene steuert einen Kontakthebel. Wurde sie durch Tastendruck nach rechts verschoben, entriegelt sie ihren Kontakthebel und gibt ihm damit die Möglichkeit, einen Kontakt zu schließen. Wurde die Schiene dagegen nach links verrückt, sperrt sie ihren Kontakthebel; er kann seinen Kontakt nicht schließen.

Die durch den Druck einer Taste fixierte Stellung der Wahlschienen wird also durch die Kontakthebel gespeichert. Entsperrte Hebel können einen Strom zum Fließen bringen, gesperrte Hebel dagegen nicht.

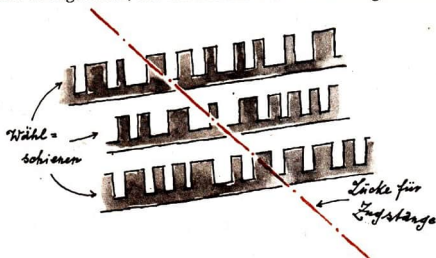
Die sechste, bei jedem Tastendruck nach rechts gestellte Schiene betätigt eine Kupplung. Diese verbindet eine Nockenwelle mit einem Motor, der bei eingeschalteter Maschine ständig läuft. Die Nockenwelle dagegen führt, wenn sie durch Drücken einer Buchstabentaste mit dem Motor gekuppelt wurde, nur eine Umdrehung aus und steht dann wieder still.

Die Nockenwelle dreht sich vor den sechs Kontakthebeln (auch die 6. Schiene betätigt einen Hebel), und zwar läuft eine Nockenscheibe vor jeweils einem Kontakthebel. Die Scheiben weisen Ausschnitte auf, die gegeneinander versetzt sind und die Kontakthebel nacheinander passieren. Dabei schließen die „entsperrten“ Kontakthebel für einen Augenblick einen Stromkreis und senden je einen kurzen Stromstoß in die Fernleitung. Die „gesperrten“

Kontakthebel werden durch das Vorbeilaufen des Ausschnitts nicht beeinflusst; das entspricht den Schritten „kein Strom“ des Fünferalphabets. Die 6. Nockenscheibe und der 6. Kontakthebel sorgen dafür, daß die Nockenwelle im Sender und der Mechanismus im Empfänger gleichzeitig anlaufen und wieder stillgesetzt werden.

Die umlaufende Nockenwelle fragt die durch die Kontakthebelsstellungen vorbereiteten Signalschritte „Strom“ und „kein Strom“ ab und veranlaßt, daß sie als Fernschreibzeichen über die Leitung gehen.

Auf der Gegenstelle arbeitet eine gleiche Fernschreibmaschine als Empfänger. In ihrem Empfangsteil wirken die ankommenden Impulse auf einen Elektromagneten. Er betätigt fünf kleine Anker, die ihrerseits fünf Wählschienen in eine der eingetroffenen Impulskombination entsprechende Position rücken. Auch diese Wählschienen haben Einschnitte, die aber im Gegensatz zu denen der Sendeschienen senkrechte Flanken aufweisen. Die Einschnitte sind so angeordnet, daß bei der einem Buchstaben zugeordneten



Impulskombination gerade unter dem Typenhebel dieses Buchstabens fünf Lücken hintereinanderstehen. In die so entstandene „durchgehende“ Lücke wird durch Federkraft eine mit dem Typenhebel verbundene „Zugstange“ gezogen. Eine „Falle“ faßt sie und reißt sie ein Stückchen in waagerechter Richtung. Dabei wird der Typenhebel gegen das Papier geschnellt.

Beim nächsten Zeichen werden die Wählschienen erneut verstellt, eine andere Zugstange fällt in eine „durchgehende“ Lücke und veranlaßt das Drucken eines Buchstabens. Besondere Zugstangen sind für den Wortzwischenraum, den Übergang von Buchstaben auf Ziffern und Zeichen oder, wenn nötig, für Zeilenwechsel und Wagenrücklauf vorgesehen.

Wir unterscheiden „Streifendrucker“ und „Blattdrucker“. Streifendrucker schreiben auf schmale Papierstreifen; von den Telegrammen der Deutschen Post sind sie uns allgemein bekannt. Auch Presseagenturen und Redaktionen arbeiten häufig mit dem Streifendrucker. Im Verkehr zwischen Behörden und Betrieben

werden meistens Blattdrucker benutzt. Sie schreiben wie eine Schreibmaschine auf Papierbogen, und es ist nicht nötig, die Streifen zu zerschneiden und aufzukleben.

Die Arbeitsgeschwindigkeit der Fernschreibmaschine ist hoch: 428 Zeichen können in der Minute geschrieben werden, das sind $7\frac{1}{7}$ Zeichen in jeder Sekunde. Da diese Geschwindigkeit beim Handbetrieb kaum ausgenutzt werden kann, hat man als Zusatzgeräte für Fernschreibmaschinen Lochstreifengeber entwickelt, mit denen auf Vorrat gearbeitet werden kann. Ein weiterer Vorteil der Lochstreifen-Zusatzgeräte ist, daß die Streifen nur einmal vorbereitet werden müssen, dann aber beliebig oft und in verschiedenen Zeitabständen an mehrere Gegenstellen durchgegeben werden können.

Eine Fernschreiblinie zwischen nur zwei Teilnehmern wäre selten ausgelastet. Sollen die Vorzüge des Fernschreibens zur Geltung kommen, muß man ein weitläufiges Verbindungsnetz ausbauen, in dem der Teilnehmer jederzeit und ohne langes Warten mit jedem anderen Teilnehmer schriftlich verkehren kann.

Derartige „Teilnehmer-Fernschreibnetze“, kurz „TELEX-Netze“ genannt, gibt es in vielen Ländern. Unsere Republik nimmt, was den Ausbau des Teilnehmer-Fernschreibnetzes anbelangt, in der Welt eine führende Stellung ein. Allein zwischen 1960 und 1962 hat sich die Zahl der TELEX-Anschlüsse um 40% erhöht.

Damit die Teilnehmer eines Fernschreibnetzes miteinander verbunden werden können, müssen Vermittlungseinrichtungen vorhanden sein, wie sie beim Fernsprechen benutzt werden (s. S. 116). Neben der Handvermittlung, bei der die gewünschte Verbindung durch das Personal einer Vermittlungszentrale hergestellt wird, setzt sich mehr und mehr der vollautomatische Betrieb durch. In unserer Republik ist er seit mehreren Jahren eingeführt.

Der Fernschreibteilnehmer wählt bei diesem System seinen Partner mit einer Nummernscheibe, wie sie an Fernsprechern zu finden ist. Ein Warten auf das Herstellen der Verbindung gibt es nicht. Um zu kontrollieren, ob tatsächlich der gewünschte Schreibpartner erreicht wurde, kann eine „Wer-da-Taste“ gedrückt werden. Sie löst an der Gegenstelle eine charakteristische Impulsfolge aus, und die eigene Maschine schreibt das Rufzeichen des Partners nieder. Das ist besonders deswegen wichtig, weil die Fernschreibmaschine dem Telefon in einem sehr wichtigen Punkt überlegen ist: Die Gegenstelle braucht nicht besetzt zu sein und bedient zu werden. Ihre Maschine wird vom Absender ferngeschaltet und bringt das Fernschreiben ohne menschliches Zutun auf das Papier. Nach Schluß des Fernschreibens wird die Maschine wieder abgeschaltet.

Das Ziel ist, auch den internationalen TELEX-Verkehr vollständig zu automatisieren. Gegenwärtig wird in den meisten Ländern der Auslandsverkehr noch halbautomatisch abgewickelt. Bei dieser Verkehrsart wählt eine Vermittlungszentrale den ausländischen



dischen Partner. Zur Zeit steht unsere Republik mit mehr als 50 Ländern im TELEX-Verkehr.

Ist bereits jedes Fernschreiben eine „dokumentarische Unterlage“, so besteht doch häufig der Wunsch, nicht nur einen Text zu übertragen, sondern auch das Schriftbild, eingestreute Diagramme, Zeichnungen usw. Diese Aufgabe wird durch „Faksimileschreiber“ gelöst, deren Verbreitung gleichfalls ständig zunimmt. Wir wollen jedoch auf ihre Arbeitsweise, die den beim Fernsehen verwendeten Prinzipien nahekommt, nicht eingehen.

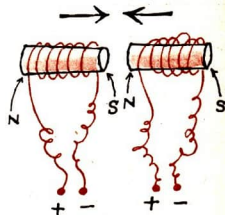
ELEKTROMOTOREN – MUSKELN DES 20. JAHRHUNDERTS

Magneten unter sich

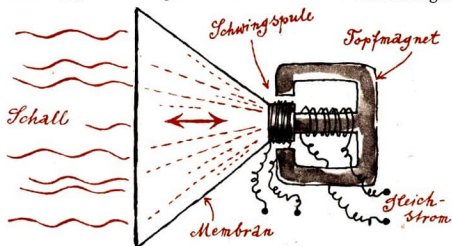
Wir müssen schon wieder von Magneten sprechen. Allerdings interessieren wir uns jetzt für das, was vor sich geht, wenn zwei Magneten zusammentreffen. Sie wissen es noch aus der Schule: Zwei nahe beieinander stehende Magnetnadeln wenden sich stets einen Nord- und einen Südpol zu; niemals suchen sich die Nordpole oder die Südpole näherzukommen. Auch für Magneten gilt: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Elektromagneten unterliegen analogen Gesetzmäßigkeiten. Die beiden Spulen in der Skizze ziehen sich an, weil sich ein Nord- und ein Südpol gegenüberstehen. Vertauschen wir die Anschlüsse einer der Spannungsquellen, wechseln auch die Pole der zugehörigen Spule ihren Platz. Es stehen sich nunmehr gleichnamige Pole gegenüber, die Spulen stoßen sich ab.

Und wenn wir in die linke Spule Wechselstrom schicken? Dann kehrt sich die Stromrichtung dauernd um, die rechte Spule wird abwechselnd angezogen und abgestoßen. Ist sie leicht und beweglich, schwingt sie mit der Frequenz des Wechselstromes hin und her. Würden wir für unseren Versuch Netzwechselstrom wählen, hörten wir einen leisen Brummtönen der Frequenz 50 Hz. Er entsteht, weil die rechte Spule bei ihrem Hin- und Herschwingen periodische Luftverdichtungen und -verdünnungen hervorruft, die wir als Schall empfinden. Kleben wir an die rechte Stirnseite der beweglichen Spule eine an den Rändern eingespannte Postkarte, würde der Ton viel lauter.

Dieser Versuch demonstriert grob die Arbeitsweise der Mehrzahl aller Lautsprecher. Lassen wir nämlich durch eine der beiden Spulen Wechselstrom fließen, der seine Frequenz und Stärke im Rhythmus von Schallwellen verändert (solche Ströme erhalten wir von jedem Mikrophon), so pendelt auch die bewegliche Spule im Rhythmus dieser Schwingungen. Da sie aber wieder entsprechende Luftverdichtungen und -verdünnungen hervorruft, hören wir Töne.



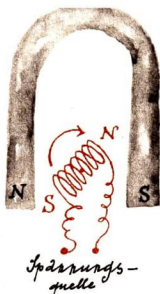
Die technische Ausführung eines „elektrodynamischen Lautsprechers“ sieht etwas anders aus. Die feste Spule ist als „Topfmagnet“ ausgebildet. Sie wird von Gleichstrom durchflossen. Die Magnetpole sind so geformt, daß sie durch einen kreisrunden Spalt getrennt werden, in dem besonders starke magnetische Felder auftreten. In diesem Spalt kann sich, ohne anzustoßen, die „Schwingspule“ bewegen. Sie ist mit einer trichterförmigen



Membran aus Spezialpapier verbunden. Die Membran muß alle Spulenbewegungen mitmachen und erzeugt – bei entsprechenden Frequenzen der Bewegungen – Schallschwingungen. Die wiederzugebenden Töne werden der Schwingspule als Wechselströme zugeleitet. Sie schwingt im Spalt vor und zurück und nimmt dabei die Membran mit.

Der Topfmagnet hat nur die Aufgabe, ein kräftiges Magnetfeld zu erzeugen. Er ist daher technisch eine wenig befriedigende Lösung, weil zu seiner Herstellung Tausende Meter dünnen Kupferdrahtes benötigt werden und er wegen des elektrischen Widerstandes seiner Windungen Strom verbraucht. Deswegen hat man versucht, den Elektromagneten durch einen Dauermagneten zu ersetzen. Lange Jahre führten diese Versuche zu keinem Erfolg, weil sich mit Dauermagneten keine hinreichend starken Felder erzeugen ließen. Als später hochwertige Magnetwerkstoffe geschaffen worden waren, wurde der Elektromagnet überflüssig. Gegenwärtig sind die meisten Lautsprecher in Rundfunk- und Fernsehgeräten mit Dauermagneten ausgestattet. Sie werden als „permanent-dynamische“ Lautsprecher bezeichnet.

Wird die bewegliche Spule entsprechend gelagert, so kann sie Drehbewegungen ausführen. Im Bild wird durch Einschalten des Stromes das obere Spulenende zum Nordpol, das untere zum Südpol. Infolgedessen dreht sich die Spule im Uhrzeigersinn, bis ihr Nordpol vor dem Südpol und ihr Südpol vor dem Nordpol des festen Magneten stehen. Kehren wir die Stromrichtung durch die Spule um, so vertauschen Nord- und Südpol die Plätze. Jetzt stehen sich gleichnamige Pole gegenüber; da sich gleichnamige Pole abstoßen, vollführt die Spule eine Drehung von 180°.



Die drehbare Spule im Magnetfeld wird um so stärker abgestoßen oder angezogen, je stärker der sie durchfließende Strom ist. Wenn sie bei ihrer Drehung eine Feder spannt, dreht sie sich soweit, bis Drehung und wachsende Gegenkraft der Feder einander die Waage halten. Im „Drehspulinstrument“, das auf diese Weise arbeitet, ist eine leichte, im Feld eines Dauermagneten drehbare Spule mit einem Zeiger verbunden, der vor einer Skala spielt. Drehspulinstrumente sind weit verbreitet, lassen sich allerdings nur für Gleichstrommessungen verwenden, da bei den ständigen Richtungswechseln eines Wechselstromes die Spule dauernd nach verschiedenen Richtungen angestoßen würde und den raschen Wechseln nicht folgen könnte.

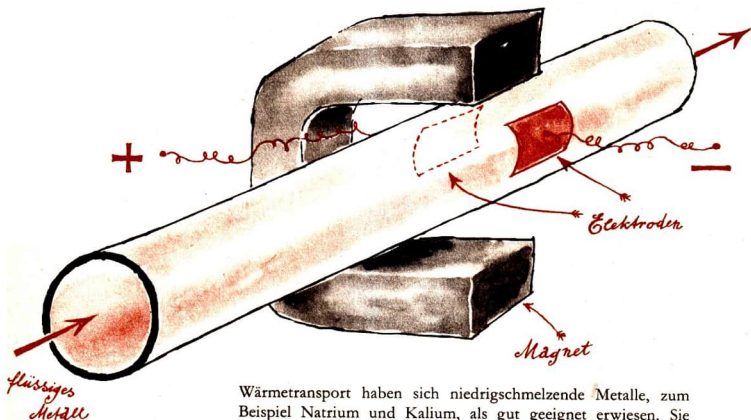
Ersetzen wir den Dauermagneten des Drehspulinstruments durch eine Spule, erhalten wir ein „dynamometrisches“ Meßwerk. Beide Spulen werden nacheinander vom Strom durchflossen. Die magnetischen Kräfte suchen die Spulen so zu stellen, daß die Spulenachsen parallel stehen. Das wird jedoch wiederum durch eine Feder erschwert. Kehren wir die Richtung des durch ein dynamometrisches Meßinstrument fließenden Stromes um, ändert sich am Ausschlag nichts. Diesmal werden die Pole beider Magnet-



spulen vertauscht, so daß Anziehung beziehungsweise Abstoßung erhalten bleiben. Daher sind dynamometrische Meßwerke auch für Wechselstrommessungen geeignet.

Schickt man voneinander unabhängige Ströme durch die Spulen, ist der Zeigerausschlag dem Produkt dieser Ströme proportional, das Meßinstrument „multipliziert“. Das ist wichtig; denn oft müssen in der Meßtechnik zwei Größen miteinander malgenommen werden. So ist, wie wir wissen, die elektrische Leistung das Produkt aus Spannung und Stromstärke. Man kann dynamometrische Meßwerke so einrichten, daß sie die elektrische Leistung unmittelbar anzeigen.

Die in Kernreaktoren entstehende Wärme muß, wenn sie nutzbar gemacht werden soll, nach außen abgeführt werden. Für den



Wärmetransport haben sich niedrigschmelzende Metalle, zum Beispiel Natrium und Kalium, als gut geeignet erwiesen. Sie lassen sich durch „elektromagnetische Pumpen“ in Bewegung setzen. Am Rohr, durch das Metall strömen soll, wird ein Elektromagnet so angebracht, daß seine Kraftlinien senkrecht auf der Strömungsrichtung stehen. Außerdem wird durch zwei Elektroden Strom quer zur Strömungsrichtung durch die Flüssigkeit geschickt. Die Felder dieses Stromes und des Elektromagneten „schieben“ die Elektronen in der Strömungsrichtung. Dabei wird das flüssige Metall „mitgenommen“. Die Pumpen enthalten keine beweglichen Teile und arbeiten daher sehr zuverlässig.

Kraftmaschine dringend gesucht!

Die Dampfmaschine, die sich am Beginn des vergangenen Jahrhunderts die Welt zu erobern begann, erfüllte nicht alle Wünsche. Sie war unförmig, schwer, kompliziert zu bedienen, lief erst nach umständlichen Vorbereitungen an und arbeitete mit schlechtem Wirkungsgrad.

Kein Wunder also, daß man sich nach anderen Möglichkeiten umsah, die menschliche oder tierische Muskelkraft zu ersetzen und zu vervielfachen. Neben dem Bestreben, einen brauchbaren Gasmotor zu entwickeln, waren es vor allem die elektromagnetischen Erscheinungen, mit deren Hilfe man eine neuartige Kraftmaschine schaffen wollte.

Wie kräftig Elektromagneten sein können, hatte man schon erfahren; es handelte sich jetzt darum, diese Kraft in einer Maschine nutzbar zu machen. Den ersten Versuchen, einen „Elektromotor“ zu schaffen, ist deutlich anzumerken, daß bei ihnen die Dampf-

maschine Pate gestanden hatte. Es sind eigentlich nichts anderes als Dampfmaschinen, deren Zylinder durch Elektromagneten ersetzt wurden.

Die Skizze zeigt den Aufbau eines solchen Modells. Zwei Elektromagneten ziehen abwechselnd Eisenkerne in sich hinein und setzen über ein Hebelgestänge ein Schwungrad in Bewegung. Das Umschalten besorgt eine von der Maschine selbst gesteuerte Kontaktvorrichtung.

Irgendwelche praktische Bedeutung haben diese Maschinen nicht erlangt. Sie liefen erst, nachdem sie von Hand in Schwung gebracht worden waren; ihr Lauf war unregelmäßig, ihr Arbeitsvermögen stand in keinem vernünftigen Verhältnis zur aufgewendeten Elektroenergie.

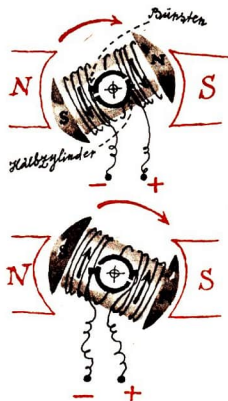
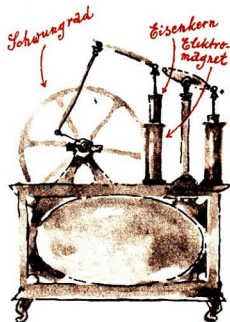
Dieser Umweg über eine hin- und hergehende Bewegung war nicht notwendig. Ein Elektromagnet konnte unmittelbar eine Drehbewegung verursachen.

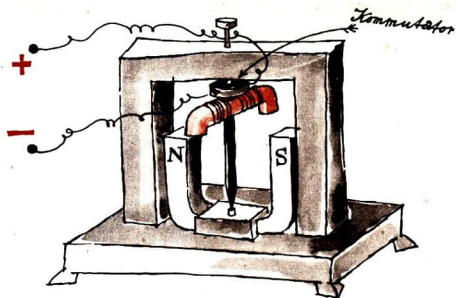
Nur eine Schwierigkeit war zu überwinden: Eine Spule zwischen den Polen eines Magneten dreht sich, wenn sie von Gleichstrom durchflossen wird, im günstigsten Fall um 180° . Sie bleibt stehen, sobald ihre Pole den (entgegengesetzten) Polen des feststehenden Magneten am nächsten gekommen sind. Gelänge es, in diesem Augenblick die Magnetpole zu vertauschen, ginge die Anziehung in eine Abstoßung über, die Spule würde sich weiterdrehen. Könnte man das nach jeweils 180° wiederholen, erhielte man eine ständige Drehbewegung.

Um die Magnetpole zu vertauschen, brauchen wir nur im richtigen Moment die Anschlüsse der Spannungsquelle umzuklemmen, und schon wird jedes Spulenende vom gleichen Magnetpol, der es eben noch anzog, abgestoßen. Hat sich die Spule um eine halbe Umdrehung weiterbewegt, schalten wir wieder um usw.

Soll das Umschalten der Stromrichtung immer im richtigen Augenblick erfolgen, so muß man es vom Motor selbst ausführen lassen. Das ist verhältnismäßig einfach zu erreichen. Der Umschalter wird auf die Welle der drehbaren Spule, des „Läufers“, geschoben. Dieser „Kommutator“ besteht aus zwei gegeneinander isolierten metallischen Halbzylindern. Jeder Halbzylinder wird mit einem Spulenende verbunden. Auf der Oberfläche der Halbzylinder schleifen zwei feststehende „Bürsten“ aus leitendem Werkstoff. Sie führen der Spule den Strom zu. Wenn die Läuferpole vor den Polen des festen Magneten stehen, den man „Feldmagneten“ nennt, gleiten die Bürsten von einem Halbzylinder auf den anderen. Dadurch wird die Richtung des Spulenstromes umgekehrt. Da Kommutator und Läuferspule fest miteinander verbunden sind, geschieht das zwangsläufig immer genau im richtigen Augenblick.

Zahlreiche Kleinmotoren, zum Beispiel für mechanische Spielzeuge und Trockenrasierer, sind wie der Motor unserer Skizze gebaut. Dabei wird die Läuferspule stets mit einem Eisenkern





ausgestattet. Schon „elektromagnetische Maschinchen“, wie man Konstruktionen aus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts nannte, weisen diese typischen Merkmale auf.

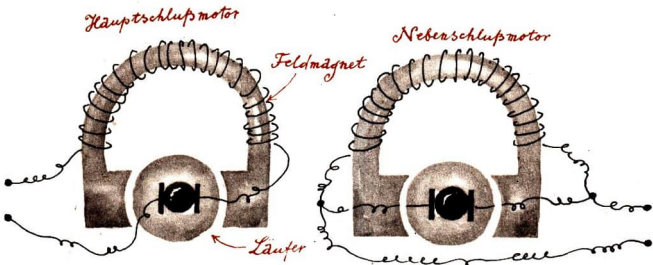
Soll ein Motor leistungsfähiger werden und gleichmäßiger laufen, wickelt man nicht nur eine, sondern mehrere Spulen auf den Läufer, die jeweils um einen bestimmten Winkel gegeneinander verdreht sind. Jede Spule ist an zwei einander gegenüberliegende, schmale Kommutatorsegmente angeschlossen.

Ein Vorläufer dieser Motoren ist der „Radmotor“ aus der Mitte des vergangenen Jahrhunderts. Bei ihm sind allerdings Feldmagnet und Läufer vertauscht: Auf dem trommelförmigen Läufer sind acht Magnetstäbe festgeschraubt. Umgeschaltet werden die außenliegenden Spulen. Der Kommutator ähnelt einem Zahnrad, über das Kontaktfedern gleiten.

Das Magnetfeld eines Dauermagneten ist in seiner Stärke begrenzt; demzufolge lassen sich mit Elektromotoren, die Dauermagneten besitzen, keine großen Leistungen erzielen. Diese Beschränkung entfällt, wenn man Läufer und Feldmagneten als Elektromagneten ausführt. Bereits Moritz Hermann von Jacobi (1801–1874), der seit 1837 in Petersburg wirkte, hatte das erkannt. Sein erster Elektromotor enthielt acht hufeisenförmige Elektromagneten. Sie waren in zwei Gruppen aufgeteilt. Eine bildete den „Ständer“ des Motors, das heißt die ruhenden Feldmagneten, die andere diente als Läufer. Jacobi verbesserte seinen Motor und baute ihn im Jahre 1838 in ein Boot ein, mit dem er 12 Passagiere befördern konnte. Dies war der erste elektrische Fahrzeugantrieb in der Geschichte. Moderne Gleichstrommotoren ähneln dieser Ausführung nur noch im prinzipiellen Aufbau. Ihr Läufer wird als „Trommelanker“ ausgeführt. Das ist ein aus Spezialblechen (s. S. 99) zusammengesetzter Zylinder. Er weist Längsnuten auf, in denen die Spulenwicklungen untergebracht sind. Mit möglichst geringem Spielraum schließen sich die Pole des Ständers um den Trommelanker.

Ständer und Läufer des Gleichstrommotors werden aus der gleichen Spannungsquelle gespeist. Für den Weg, den der Strom





durch den Motor nimmt, gibt es zwei hauptsächliche Möglichkeiten: Der Strom kann nacheinander durch Feldmagneten und Läuferspulen fließen; er kann sich aber auch verzweigen, so daß ein Teil durch die Spulen der Feldmagneten, der andere durch die Läuferspulen fließt. Im ersten Fall spricht man von einem Hauptschlußmotor, im zweiten von einem Nebenschlußmotor. Beide Motorarten unterscheiden sich in ihrem Betriebsverhalten voneinander.

Der Hauptschlußmotor zieht sehr kräftig an. Im Betrieb hängt seine Drehzahl stark von der Belastung des Motors ab. Ist sie groß, läuft er langsam; ist sie niedrig, dreht er sich schneller. Wird der Motor völlig entlastet – das könnte etwa durch Abspringen eines Treibriemens oder durch Bruch einer Welle geschehen –, „geht er durch“. Seine Drehzahl steigt rasch an und erreicht, wenn nicht besondere Schutzmaßnahmen vorgesehen sind, so hohe Werte, daß Fliehkräfte den Läufer auseinanderreißen.

Bei Bahnen, Kranen und Aufzügen sind gerade während des Anfahrens große Zugkräfte notwendig, um die Trägheit der zu transportierenden Massen zu überwinden. Für derartige Aufgaben, bei denen auch ein belastungsunabhängiges Schwanken der Drehzahl – etwa beim Bergauffahren – keine große Rolle spielt, sind Hauptschlußmotoren besonders geeignet.

Der Nebenschlußmotor hat ein geringeres Anzugsvermögen als der Hauptschlußmotor. Seine Drehzahl ändert sich bei schwankender Belastung nur sehr wenig. Die Drehzahl läßt sich außerdem leicht und stetig verändern. Diese Eigenschaften machen den Nebenschlußmotor besonders geeignet für den Antrieb von Werkzeugmaschinen. Auch in mechanisierten und automatisierten Produktionsanlagen wird der Nebenschlußmotor bevorzugt, da er sich leicht durch elektronische Geräte steuern und regeln läßt (s. S. 223).

Wird ein Motor eingeschaltet, fließt zunächst ein sehr kräftiger Strom durch seinen Läufer. Seine Stärke nimmt ab, je schneller sich der Läufer dreht. Dieses Verhalten hat folgende Ursache:

Im rotierenden Läufer entsteht eine elektrische Spannung (s. S. 93). Sie ist der von außen angelegten Spannung entgegengerichtet und hebt diese mehr oder weniger auf.

Wegen der geringen Drehzahl bleibt diese Spannung niedrig, wenn der Motor zu laufen beginnt. Die Netzspannung kann sich voll auswirken. Es fließt ein starker Läuferstrom.

Mit steigender Drehzahl wächst die Gegenspannung. Die am Läufer insgesamt wirksame Spannung wird weiter vermindert. Entsprechend sinkt auch die Stärke des Läuferstromes.

Würde man größere Motoren plötzlich einschalten, so wären Netz und Motor durch den starken Anlaufstrom gefährdet. Man sieht daher besondere „Anlasserwiderstände“ vor. Sie begrenzen anfänglich den Läuferstrom und werden allmählich ausgeschaltet, wenn die Drehzahl zunimmt.

Durch die Gegenspannung wird die Leistungsaufnahme des Motors in gewissem Grade selbsttätig der vom Motor abzugebenden Leistung angepaßt. Der stark belastete Motor läuft langsam; die Gegenspannung ist gering, die Stromaufnahme aus dem Netz groß. Der weniger belastete Motor läuft schneller. Die Gegenspannung steigt, während sich der dem Netz entnommene Strom verringert.

Die Drehrichtung eines Gleichstrommotors ist unabhängig davon, wie er an seine Spannungsquelle angeschlossen wird; denn bei jeder Umkehr der Stromrichtung werden die Magnetpole des Ständers und des Läufers vertauscht. Daraus folgt, daß sich Hauptschlußmotoren auch mit Wechselstrom betreiben lassen.

In zahlreichen Haushaltsgeräten finden wir Motoren, die ebenso an Gleich- wie an Wechselstromnetzen laufen. Bei diesen „Universalmotoren“ handelt es sich fast immer um Hauptschlußmotoren. In entsprechend vergrößerter Ausführung werden sie auch als Antriebsmotoren für wechselstrombetriebene Bahnen eingesetzt.

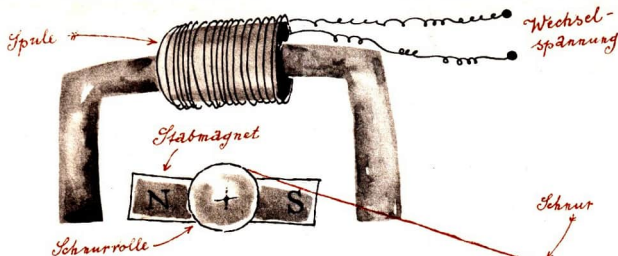
Im Drehfeld

Die Kommutatoren haben den Elektrotechnikern viel Kopfzerbrechen bereitet. Ein Kommutator „feuert“, es treten an ihm elektrische Funken auf. Das bedeutet erhöhten Materialverschleiß und Wärmeentwicklung. Ein „funkender“ Motor kann nicht ohne weiteres in explosions- oder schlagwettergefährdeten Betrieben aufgestellt werden. Außerdem stören die Funken am Kommutator den drahtlosen Nachrichtenverkehr.

Es gibt jedoch sehr einfache Motoren, die keinen Kommutator benötigen und in denen dem Läufer von außen überhaupt kein Strom zugeführt wird. Es sind Motoren, die mit Wechselstrom gespeist werden.

Zwischen den Polen eines Feldmagneten ist als Läufer ein kurzer Stabmagnet angebracht. Dieser „Motor“ kann nicht laufen, wenn





wir den Feldmagneten mit Gleichstrom speisen; der Stabmagnet bleibt, von Feldmagnetpol zu Feldmagnetpol weisend, stehen. Auch wenn wir Wechselstrom in den Feldmagneten schicken, passiert zunächst nichts.

Ziehen wir mit einem kräftigen Ruck den Faden von der Schnurrolle, wird der Stabmagnet in sehr schnelle Rotation versetzt. Erstaunt würden wir feststellen, daß er nicht wieder zur Ruhe kommt. Er dreht sich weiter, bis wir den Strom abschalten oder den Magneten an der Achse abbremmen.

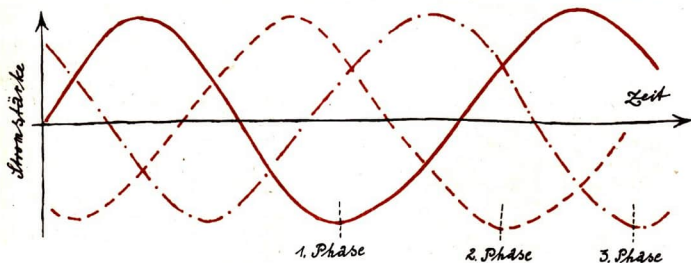
Wie erklärt sich das? Die Frequenz des Netzwechselstromes beträgt 50 Hz. Die beiden Polenden des Feldmagneten sind daher in jeder Sekunde 50mal Nordpol und 50mal Südpol. Der Stabmagnet gelangt, da sich seine Drehzahl durch Reibung ständig vermindert, auch einmal so „in Schritt“, daß sein Nordpol (Südpol) gerade in dem Augenblick am Südpol (Nordpol) des Feldmagneten vorbeiläuft, in dem die Pole wechseln. Der Stabmagnet, dessen Enden eben noch zu den Feldmagnetpolen gezogen wurden, erhält nunmehr einen kleinen, beschleunigenden Stoß. Er dreht sich weiter. Nach der nächsten halben Drehung wiederholt sich dieser Vorgang. Mit der Wechselstromspeisung des Feldmagneten erreicht man also hier dasselbe wie mit dem Kommutator beim Gleichstrommotor; nur wird diesmal nicht der Läufer, sondern der Feldmagnet umgepolt.

Die Drehzahl dieses Motors wird durch die Frequenz des Wechselstromes bestimmt und ist unveränderlich; sie beträgt 3000 Umdrehungen in der Minute ($50 \text{ Hz} \cdot 60 \text{ s}$). Wird der Motor abgebremst, läuft er nicht langsamer, sondern bleibt stehen, weil er „außer Tritt“ gerät und die Anziehung beziehungsweise Abstoßung nicht mehr im richtigen Augenblick erfolgt. Wegen dieser engen Bindung zwischen Drehzahl und Netzfrequenz heißt dieser Motor „Synchronmotor“.

Synchronmotoren finden vor allem dort Verwendung, wo die Drehzahl genau eingehalten werden muß. Wir finden sie zum Beispiel als Antriebsmotoren in Plattenspielern und Tonbandgeräten. Auch sehr einfache Uhren lassen sich mit Synchronmotoren aufbauen, weil alle Hilfsmittel zur Gangregulierung ent-

fallen. Die Ganggenauigkeit solcher Uhren wird dadurch bestimmt, wie genau das Wechselstromnetz seine Frequenz einhält. Neben Synchronmotoren, die angeworfen werden müssen, ehe sie von allein laufen, stehen heute auch Typen zur Verfügung, die von selbst anlaufen.

Motoren für größere Leistungen speist man meistens mit Dreiphasenwechselstrom – kurz Drehstrom genannt. Wir werden später noch mehr über ihn hören. Hier sei vorausgeschickt, daß es sich um einen Strom handelt, der aus drei in bestimmter Weise miteinander kombinierten, „verketteten“ Wechselströmen gleicher Frequenz zusammengesetzt ist. Die Einzelströme, die „Phasen“, sind zeitlich gegeneinander um den gleichen Abstand verschoben.



Jeder Einzelstrom erreicht seine Höchst- und Tiefstwerte zu einem anderen Zeitpunkt und wechselt auch in einem anderen Augenblick die Stromrichtung. Zur Fortleitung des Drehstromes braucht man nur drei Leitungen und eine gemeinsame Rückleitung.

Nehmen wir nun wieder den drehbaren Stabmagneten zur Hand und umgeben ihn so mit drei Spulen, daß ihre Achsen jeweils einen Winkel von 120° miteinander bilden. Jede Spule wird mit einer Zuleitung des Drehstromnetzes und mit der gemeinsamen Rückleitung verbunden.

Sobald wir den Strom einschalten, beginnt der Stabmagnet zu rotieren. Er steigert seine Drehzahl bis auf einen Höchstwert (hier 3000 Umdrehungen je Minute) und läuft dann mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Vertauschen wir zwei der Zuleitungen miteinander, dreht sich der Stabmagnet in der Gegenrichtung.

Den Grund für die Bewegung erkennen wir leicht aus der grafischen Darstellung des Drehstromverlaufs: Die Strom- und Spannungshöchstwerte folgen einander in stetem Wechsel. Hat Spule 1 ihr Strommaximum erreicht, so nähert sich im nächsten Augenblick Spule 2 dem Höchstwert, anschließend Spule 3. Da die magnetischen Kräfte unmittelbar mit der Stromstärke zusammenhängen, „springt“ auch der Pol mit der stärksten An-

ziehung von Spule zu Spule. Es bildet sich ein „magnetisches Drehfeld“, dem auch der Drehstrom seinen Namen verdankt. Das Drehfeld setzt den Stabmagneten in Bewegung und beschleunigt ihn, bis seine Drehzahl mit der Umlaufgeschwindigkeit des Magnetfeldes übereinstimmt. Wenn wir zwei Anschlußdrähte vertauschen, wird die Reihenfolge des „Springens“ umgekehrt. Infolgedessen ändert sich die Drehrichtung.

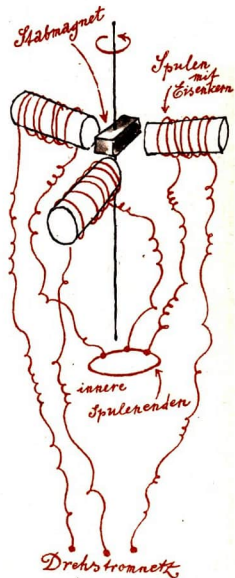
Die Spulen und der umlaufende Stabmagnet bilden einen einfachen Drehstromsynchronmotor. Seine technische Ausführung sieht naturgemäß etwas anders aus. Der Dauermagnet des Läufers wird durch einen Elektromagneten ersetzt, der mit Gleichstrom gespeist werden muß. Um diesen zuzuführen, sind auf der Läuferwelle Schleifringe angebracht. Wo der Gleichstrom herkommt, ist an sich gleichgültig. Bei leistungsfähigen Synchronmotoren setzt man oft auf die Motorwelle einen Gleichstromgenerator als „Erregermaschine“ (s. S. 96); er speist den Läufermagneten. Die durch die Netzfrequenz festgelegte Drehzahl von 3000 U/min ist für viele Zwecke zu hoch. Man kann sie jedoch herabsetzen, indem man die Zahl der Spulengruppen im Ständer erhöht. Verteilt man 6 ($2 \cdot 3$) Spulen auf dem Ständerumfang, läuft der Motor mit 1500 U/min, bei 9 ($3 \cdot 3$) Spulen macht er 1000 U/min. Eine stetige Regelung der Drehzahl ist nicht möglich. Drehstromsynchronmotoren werden für Leistungen bis zu mehreren tausend Kilowatt gebaut.

Ersetzen wir im Modell des Drehstromsynchronmotors den Stabmagneten durch einen unmagnetischen Metallkörper, so beginnt auch dieser, sich mit zunehmender Geschwindigkeit zu drehen. Würden wir die Drehzahl messen, könnten wir feststellen, daß sie nicht ganz die Geschwindigkeit des Stabmagneten erreicht, sondern etwas hinter dem Drehfeld zurückbleibt.

Unser Modell hat sich in einen „Asynchronmotor“ verwandelt, in einen Motor, der nicht mehr ganz so starr an die Frequenz der Netzspannung gebunden ist.

Die Drehbewegung kommt hier nicht durch einfaches „Mitziehen“ wie beim Synchronmotor zustande. Das umlaufende Drehfeld verursacht im Läufer vielmehr zunächst elektrische Spannungen und Ströme – mehr darüber erfahren wir im folgenden Kapitel. Auch diese besitzen ein Magnetfeld. Durch das Wechselspiel der magnetischen Kräfte des Ständers und des Läufers wird der Motor in Bewegung gesetzt. Das „Nachhinken“ des Läufers gegenüber dem Drehfeld erklärt sich ebenfalls aus diesem Wechselspiel. Nähert sich nämlich die Drehzahl des Läufers der Umlaufgeschwindigkeit des Magnetfeldes, werden die im Läufer hervorgerufenen Spannungen und Ströme schwächer, und infolgedessen vermindert sich auch wieder die Drehzahl des Läufers.

Der Läufer eines Drehstromasynchronmotors wird besonders häufig als „Kurzschlußläufer“ ausgeführt. In einen aus Spezialblechen zusammengesetzten Metallzylinder sind Längsnuten ein-



gearbeitet, in die Kupfer- oder Aluminiumstäbe eingelegt werden. Diese sind an den Enden durch Metallringe elektrisch leitend miteinander verbunden.

Ein Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer ist demnach sehr einfach gebaut. Besonders günstig ist, daß es bei ihm weder einen Kommutator noch Schleifringe gibt. Damit fallen nicht nur Störungsmöglichkeiten weg, sondern es ist auch ohne weiteres möglich, den Motor mit dem funkenfreien Lauf in explosionsgefährdeten Betrieben, im Untertagebau und in der Nähe leicht brennbarer Substanzen einzusetzen. Daß der Motor keine Funkstörungen verursacht, ist ein weiterer Vorteil.

Drehstromasynchronmotoren sind wegen ihres einfachen, billigen Aufbaus und wegen ihrer robusten Konstruktion die am meisten verwendeten Motoren. Sie werden wie die Synchronmotoren bis zu größten Leistungen gebaut. Eine stetige Regelung ihrer Drehzahl ist allerdings nicht möglich. Das ist ein Nachteil. Man kann jedoch den Motor so ausführen, daß sich die Zahl der wirksamen Ständerpole umschalten läßt. Damit ist die Drehzahl des Motors wenigstens in mehreren Stufen veränderbar. Solche „polumschaltbaren“ Motoren sind weit verbreitet.

Besser, billiger, einfacher

Manche der ersten Elektromotoren sahen nicht nur einer Dampfmaschine ähnlich, sondern man stellte sie auch dort auf, wo bislang eine Dampfmaschine gestanden hatte oder hätte stehen sollen. Doch bald erkannte man, daß der Elektromotor die Dampfmaschine nicht nur ersetzte, sondern die Antriebstechnik auf eine qualitativ höhere Stufe hob.

Warum sollte man beispielsweise in einem Betrieb das energieverzehrende, gefährliche Gewirr der Transmissionen und Treibriemen beibehalten, wenn es mit Elektromotoren möglich war, die Antriebsenergie unmittelbar an jeder Maschine zu gewinnen? War es nicht einfacher, für verschiedene Bewegungen einer Maschine – etwa für das Heben und Schwenken von Lasten – mehrere Motoren vorzusehen, statt einen Motor und komplizierte, störanfällige Getriebe einzubauen? Nur mit Elektromotoren ließen sich diese Ziele erreichen. Man kennt heute Großmaschinen, die mit mehr als 150 Elektromotoren ausgestattet sind.

Im Schienenverkehr sind es die größte Leistung und der höhere Wirkungsgrad, die stete Betriebsbereitschaft und der Fortfall des Brennstofftransports, der rauch- und rußfreie Betrieb und die einfachere Pflege und Wartung, die der Elektrolokomotive entscheidende Vorteile gegenüber der Dampflok sichern und in der ganzen Welt Anlaß sind, immer mehr Bahnstrecken zu elektrifizieren. Stadt- und Straßenbahnen sind überhaupt nur mit Elektromotoren vorstellbar.

In Klein- und Handwerksbetrieben wäre eine Dampfmaschine



ebenso sinnlos wie im Haushalt. Oder könnten Sie sich eine Küchenmaschine, einen Staubsauger, einen Trockenrasierer mit Dampfbetrieb vorstellen?

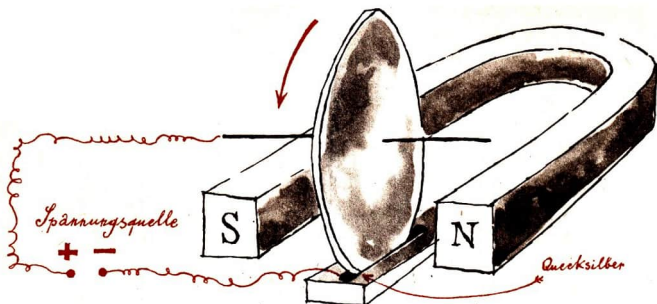
So verschieden wie die Aufgaben sind auch Leistung, Drehzahl und Ausführung der Elektromotoren. Die Zwerge unter ihnen haben eine Leistung von nicht einmal 0,001 W, die größten Vertreter erreichen einige 10 000 kW. Ebenso unterschiedlich sind die Drehzahlen. Neben behäbigen „Lasttieren“, die es in der Minute nur auf einige wenige Umdrehungen bringen, finden wir „Renner“, deren Läufer sich in der Minute mehr als 70 000mal dreht. Es werden Motoren produziert, die so groß sind wie ein Einfamilienhaus, aber auch Kleinstmotoren, die Ventile oder Schieber verstellen und auf dem Daumnagel Platz finden.

In der Industrie stehen Drehstromasynchronmotoren und Gleichstromnebenschlußmotoren zahlenmäßig an der Spitze. Sie werden staub- und feuchtigkeitssicher, temperaturbeständig und funkensicher geliefert. Es gibt Motoren, die völlig hermetisch abgeschlossen sind und Motoren, die unter Wasser arbeiten und in denen das Wasser frei zwischen Läufer und Ständer hindurchströmt.

Im Schienenfernverkehr galt lange Zeit hindurch der mit „Bahnstrom“ von 16⅔ Hz betriebene Wechselstrommotor als Standard-Antriebsquelle. Der Bahnstrom erfordert jedoch ein besonderes Verteilungsnetz, das nicht ohne kostspielige Zwischeneinrichtungen mit der Landesenergieversorgung zusammenarbeiten kann. Heute gibt es Bahnmotoren, die mit üblichem Netzwechselstrom gut arbeiten; auch in unserer Republik werden „50-Hz-Lokomotiven“ produziert. Immer häufiger setzt man auch den für das Verkehrswesen besonders geeigneten Gleichstromhauptschlußmotor ein. Die Entwicklung leistungsfähiger Halbleitergleichrichter hat es ermöglicht, den Wechselstrom der „Fahrleitung“ (auf den man aus später zu erörternden Gründen nicht verzichten kann) in der Lokomotive selbst in Gleichstrom zu verwandeln, ohne große Energie- und Raumverluste in Kauf nehmen zu müssen. Auf den kurzen Strecken des Straßenbahn-, Untergrundbahn- und Stadtbahnverkehrs dagegen behauptet sich die Gleichstromversorgung.

„Für jeden Antrieb ein zweckentsprechender Motor!“ – dieser Satz ist durch die Elektromaschinenbauer tatsächlich verwirklicht worden. Er schließt allerdings nicht die Forderung ein: Für jeden Antrieb ein *spezieller* Motor! Viele Arbeitsgänge und große Mengen hochwertigen Materials werden gebraucht, um Elektromotoren herzustellen. Sollen diese billig, jederzeit ersetzbar und austauschbar sein, muß man sie in großen Serien fertigen. Die Möglichkeit hierfür besteht vor allem für die im Rat für gegenseitige Wirtschaftshilfe zusammengeschlossenen Länder. Systematische Untersuchungen zeigten, daß der noch vor zehn Jahren bestehende Typenwirrwarr bei der Produktion von Elektro-





motoren unnötig ist, wenn es gelingt, standardisierte Baureihen von Motoren verschiedener Leistungsstufen und Ausführung zu schaffen, die für die verschiedenartigsten Aufgaben einzusetzen sind.

Wissenschaftler und Techniker der DDR haben bei der Entwicklung von „Einheitsmotoren“ für die im Rat für gegenseitige Wirtschaftshilfe vereinten Länder Pionierarbeit geleistet. Die Motoren zeichnen sich nicht nur durch ihre universelle Anwendbarkeit und Austauschbarkeit aus; bei ihrer Herstellung werden auch erhebliche Materialmengen eingespart.

Werden Elektromotoren immer nach den gleichen Grundprinzipien wie heute gebaut werden? Es gibt Fachleute, die das verneinen. Man experimentiert nämlich bereits mit einem Elektromotor, der mit seinem älteren Namensvetter eigentlich nur noch gemein hat, daß er für viele Aufgaben eine fast ideale Antriebsquelle darstellt. Auf alle Einzelteile normaler Elektromotoren wie Kupfer- oder Aluminiumwicklungen, Spezialbleche, einen Kommutator verzichtet er. Der „neue Motor“ ist flach wie eine Konfektschachtel, seine Herstellung im Vergleich zu der herkömmlicher Elektromotoren ein Kinderspiel.

Man hat bei der Konstruktion des neuen Motors auf eine seit langem bekannte „Spielerei“ zurückgegriffen, auf das „Barlowsche Rad“. Eine leicht drehbare Metallscheibe, der am Rande durch ein Quecksilbernäpfchen und im Zentrum über die Achse Strom zugeführt wird, beginnt zu rotieren, wenn sie sich zwischen den Polen eines Magneten befindet. Die Elektronen wandern, je nach Anschluß der Spannungsquelle, vom Rand der Scheibe zur Achse oder umgekehrt. Dabei werden sie durch das Magnetfeld zur Seite abgedrängt, und weil Elektronen sich nicht völlig ungehindert in einem Leiter bewegen können, nehmen sie die Scheibe mit – sie beginnt, sich zu drehen.

Nach diesem Prinzip ist der „neue Motor“ gebaut. Sein Läufer ist eine dünne, kreisförmige Platte aus Isoliermaterial, auf die

statt der „Wicklungen“ metallisierte, speichenähnliche Streifen gedruckt werden. Sie brauchen nicht einmal besonders isoliert zu werden. Der Ständer greift beiderseitig über die Scheibe, so daß zwischen Scheibe und Ständer nur ein ganz schmaler Spalt bleibt. Die Ständer„wicklungen“ können gleichfalls gedruckt werden. Die Stromzuführung zum Läufer erfolgt über Schleifkontakte. Versuchsausführungen solcher Motoren wurden für Gleich- und Wechselstrom konstruiert. Während bei den ersten Ausführungen nur Leistungen von wenigen Watt zu erzielen waren, gibt es heute bereits 12-kW-Motoren. Die nächsten Jahre müssen erweisen, ob dieser Motor größere Bedeutung erlangen wird.

WAS FARADAY NICHT WISSEN KONNTE

Eine Spule und ein Magnet

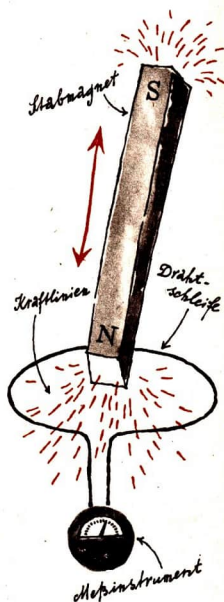
Eine Anekdote berichtet, Michael Faraday habe jahrelang ein Stückchen Kupferdraht und einen kleinen Magneten bei sich getragen. Sie sollten ihn daran erinnern, daß er die Lösung eines Problems suchte, das die Umkehrung der Oersted'schen Entdeckung darstellt: Wenn es möglich war, durch das Zusammenwirken von elektrischem Strom und Magnetismus eine Bewegung hervorzurufen – mußte sich dann nicht auch durch die Wechselwirkungen zwischen Bewegung und Magnetismus elektrischer Strom gewinnen lassen?

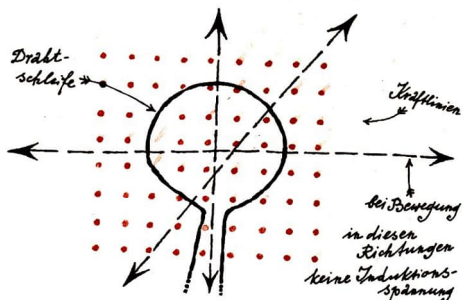
Ob die Anekdote auf Wahrheit beruht, ist umstritten. Jedenfalls fand Faraday die Lösung und deckte die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten der elektromagnetischen Induktionserscheinungen auf.

Der Grundversuch ist verblüffend einfach. Nähern wir der Drahtwindung einen Stabmagneten, so zeigt ein empfindliches Strommeßinstrument einen Ausschlag. Es muß also beim Annähern des Magneten in der Schleife eine Spannung verursacht werden, die diesen Strom hervorruft. Beim Entfernen des Magnetstabes ist gleichfalls ein Strom festzustellen; allerdings fließt er jetzt in umgekehrter Richtung. Ruht der Magnet in der Schleife oder in ihrer Umgebung, zeigt das Instrument keinen Ausschlag. Die Bewegung zwischen der Drahtschleife und dem Magnetfeld des Stabes scheint demnach eine entscheidende Rolle zu spielen.

Um das nachzuprüfen, kehren wir den Versuch um. Bewegen wir die Drahtschleife gegenüber dem feststehenden Magneten, erhalten wir das gleiche Ergebnis.

Was geschieht, wenn sich Magnet und Spule einander nähern? Die Skizze läßt es bereits erkennen: Die Zahl der von der Schleife umfaßten magnetischen Kraftlinien ändert sich. Sie wird größer, wenn sich Magnet und Schleife nähern; sie sinkt, wenn sich Schleife und Magnet voneinander entfernen.

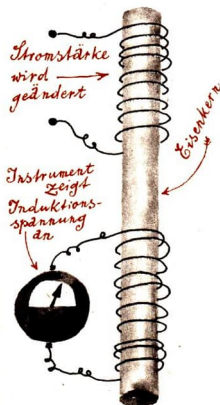




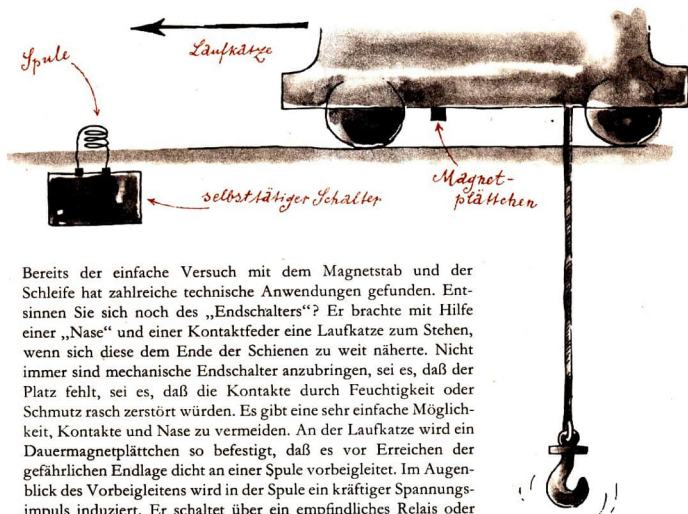
Bleibe die Zahl der die Schleife „durchsetzenden“ Kraftlinien trotz der Bewegung unverändert, würde auch keine Spannung „induziert“. Man kann das leicht nachweisen. Verschieben wir in einem Magnetfeld mit parallelen und gleichmäßig dicht verlaufenden Kraftlinien die Schleife in der angegebenen Weise, entsteht keine Spannung, weil die Zahl der umfaßten Kraftlinien gleich bleibt. Sobald wir die Schleife schwenken, schlägt das Instrument aus; denn jetzt ändert sich die Zahl der die Schleife durchsetzenden Kraftlinien.

Die Größe der entstehenden Spannung hängt vor allem davon ab, wie schnell sich die Zahl der umfaßten Kraftlinien ändert. Je rascher wir Schleife und Magnet gegeneinander bewegen, desto größer ist die induzierte Spannung. Von einem kräftigen Stabmagneten gehen mehr Kraftlinien aus als von einem schwächeren. Auch das läuft bei der Bewegung auf eine schnellere Änderung der umfaßten Kraftlinienzahl hinaus. Nehmen wir statt der einfachen Schleife mehrere Windungen, lassen wir also die Schleife zur Spule werden, wird in jeder einzelnen Windung eine Spannung induziert. Diese Spannungen addieren sich. Wenn alle anderen Versuchsbedingungen unverändert gelassen werden, erhalten wir mit einer Spule von 10 Windungen eine zehnfach größere Spannung als mit der einfachen Schleife. Alle diese Zusammenhänge wurden schon von Faraday untersucht. Er faßte sie in dem Induktionsgesetz zusammen. Es lautet in seiner kürzesten Fassung: In einem geschlossenen Leiterkreis entsteht ein Induktionsstrom, sobald die Zahl der von dem Leiter umschlungenen magnetischen Kraftlinien verändert wird. Für die Größe des Stromes, der Spannung und für die Stromrichtung gelten ebenfalls eindeutige Regeln und Gesetze.

Weil es gleichgültig ist, ob ein Magnetfeld von einem Dauermagneten oder von einem Elektromagneten hervorgerufen wird, können wir den Magnetstab ohne weiteres durch einen Elektromagneten ersetzen. In diesem Fall brauchen wir Spule und Elek-

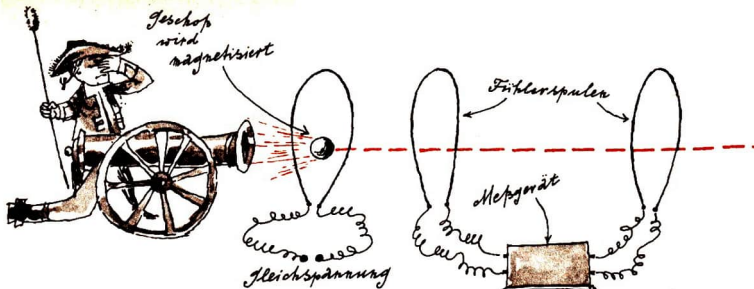


tromagneten nicht einmal gegeneinander zu bewegen. Ändern wir die Stromstärke im Elektromagneten, folgt sein Kraftfeld diesen Änderungen. Das bedeutet wieder eine Verminderung oder Vergrößerung der von der Spule umfaßten Kraftlinienzahl. Besonders wirkungsvoll werden die Induktionswirkungen, wenn der Eisenkern des Magneten durch beide Spulen hindurchgeht; denn dann verlaufen fast sämtliche Kraftlinien durch die Spule, und jede Änderung wirkt sich voll aus.



Bereits der einfache Versuch mit dem Magnetstab und der Schleife hat zahlreiche technische Anwendungen gefunden. Ent-sinnen Sie sich noch des „Endschalters“? Er brachte mit Hilfe einer „Nase“ und einer Kontaktfeder eine Laufkatze zum Stehen, wenn sich diese dem Ende der Schienen zu weit näherte. Nicht immer sind mechanische Endschalter anzubringen, sei es, daß der Platz fehlt, sei es, daß die Kontakte durch Feuchtigkeit oder Schmutz rasch zerstört würden. Es gibt eine sehr einfache Möglichkeit, Kontakte und Nase zu vermeiden. An der Laufkatze wird ein Dauermagnetplättchen so befestigt, daß es vor Erreichen der gefährlichen Endlage dicht an einer Spule vorbeigleitet. Im Augenblick des Vorbeigleitens wird in der Spule ein kräftiger Spannungsimpuls induziert. Er schaltet über ein empfindliches Relais oder über einen Verstärker den Fahrstrom ab und bremst die Laufkatze.

Ein elektrisches Verfahren zur Bestimmung von Geschößgeschwindigkeiten arbeitet ähnlich. Das Geschöß (das natürlich Stahlteile enthalten muß) durchfliegt unmittelbar nach Verlassen des Laufs eine mit Gleichstrom gespeiste Spule. Der kurze Augenblick des Hindurchfliegens reicht aus, das Geschöß geringfügig zu magnetisieren. Nacheinander passiert das Geschöß zwei „Fühler-spulen“, die aus je einer Windung dünnen Aluminium-rohrs bestehen. Der „fliegende Magnet“ induziert in jeder Fühler-spule einen winzigen Spannungstoß. Beide Spannungstoße sind in Abhängigkeit von der Geschößgeschwindigkeit und vom Spulenabstand zeitlich gegeneinander verschoben. Ein



elektronisches Meßgerät, das noch kürzeste Zeitspannen zu messen gestattet, errechnet aus dem Zeitunterschied die Geschwindigkeit.

Nicht ganz so „stürmisch“ geht es bei einem automatischen Verfahren zur Steuerung von Rohrpostanlagen zu. Sind mehrere Abteilungen eines Betriebes, zum Beispiel eines Zeitungsverlages, eines Postamtes oder einer Nachrichtenagentur, durch Rohrpostleitungen miteinander verbunden, müssen Steuerungsmöglichkeiten vorgesehen werden, um jede Büchse an die richtige Adresse gelangen zu lassen. Die „magnetische Zielkennzeichnung“ arbeitet wie folgt: Auf der Rohrpostbüchse sind mehrere drehbare Einstellringe angebracht, die kleine Dauermagneten in bestimmter Anordnung enthalten. Jedem Empfänger von Rohrpostsendungen entspricht eine Einstellung der Ringe und damit der Magneten. Diese Einstellung nimmt der Absender vor.

Unterwegs passiert die Rohrpostbüchse mehrere „Fühlerpulsen“. Je nach der Einstellung der Ringe werden in diesen Spulen Spannungstöße bestimmter Reihenfolge und Kombination hervorgerufen. Sie steuern über Relais und Verstärker die „Weichen“ der Rohrpostanlage so, daß die Büchsen selbsttätig an den richtigen Empfangsort weitergeleitet werden.

Befestigen wir einen kleinen Dauermagneten an einer umlaufenden Welle, so wird in einer dicht neben der Welle angebrachten Spule bei jeder Umdrehung ein Spannungstoß erzeugt. Die Spannungstöße folgen einander um so schneller, je höher die Drehzahl der Welle ist. Damit ist die Möglichkeit gegeben, einen elektrischen Drehzahlmesser zu konstruieren. Die Spannungstöße werden zu diesem Zweck elektronisch verstärkt und laden anschließend einen Kondensator auf. Die Kondensatorladung wächst um so rascher, je höher die Drehzahl der Welle ist. Wir können uns vorstellen, daß in Abhängigkeit von der Drehzahl ein stärkerer oder schwächerer „Ladestrom“ in den Kondensator fließt. Mißt man ihn, bekommt man ein Maß für die Drehzahl der Welle.

Eine Variante dieses Verfahrens sei nicht übergangen: Für die richtige und wirtschaftliche Arbeitsweise von Ottomotoren ist

es wichtig, daß die Zündung stets genau im richtigen Augenblick erfolgt. Dazu sind mechanische Kontaktvorrichtungen vorgesehen, die wegen ihrer ständigen Beanspruchung störanfällig sind. Es gibt jedoch bereits Zündeinrichtungen, die ohne mechanische Kontakte arbeiten. Die Zündfunken werden durch Magnetplättchen ausgelöst, die vor Fühlerspulen rotieren und in ihnen Spannungssöße induzieren.

Und so gewinnt man Elektroenergie

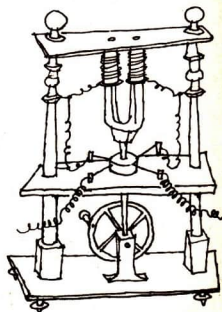
Faraday und seine Zeitgenossen wollten mit Hilfe der Induktionserscheinungen allerdings keine Spannungs- und Stromstöße, sondern kräftige, ständig fließende Ströme gewinnen.

Bei der Nutzbarmachung der elektrischen Erscheinungen war man nämlich in eine Sackgasse geraten: Die Wärmewirkungen des Stromes, der gleißende Lichtbogen zwischen Kohlestäben, die elektrochemischen und magnetischen Erscheinungen boten sich für technische Anwendungen geradezu an, aber – man konnte noch keine größeren Elektrizitätsmengen billig gewinnen. Spannungsquellen waren ausschließlich „galvanische Elemente“ (s. S. 132), in denen Elektroenergie aus chemischen Umsetzungen gewonnen wurde. Sie waren jedoch als Energiequelle viel zu teuer. Selbst die aus modernen galvanischen Elementen, nämlich aus Taschenlampenbatterien, bezogene Kilowattstunde müßten wir noch mit einem Fünfundzwanzigmarkschein bezahlen. Voraussetzung für die Entwicklung der Elektrotechnik war eine zuverlässige, billige und wirtschaftliche Elektroenergiequelle. Diese Quelle hoffte man durch Nutzung der Induktionserscheinungen zu finden.

Schon wenige Jahre nach Faradays Entdeckung zeigten Versuchsmodelle, daß man sich in dieser Hoffnung nicht getäuscht hatte.

Vor zwei mit Eisenkernen versehenen Spulen rotiert, über einen Zahnradtrieb bewegt, ein Hufeisenmagnet. Die Spulen sind ständig seinem Feld ausgesetzt; wegen der Drehbewegung ändert sich die Zahl der die Spulen durchsetzenden Kraftlinien fortwährend. In jeder Spule entsteht eine Induktionsspannung. Beide Spulen sind so zusammengeschaltet, daß sich die Einzelspannungen addieren. Die induzierte Spannung pendelt periodisch zwischen Null und einem Maximalwert, der Drehung des Magneten entsprechend. Da an den Spulen abwechselnd der Nord- und der Südpol des Magneten vorbeilaufen, ändern Spannung und Strom ständig ihre Richtung. Die „Maschine“ liefert Wechselstrom, der sich durch die uns bereits bekannte Sinuskurve darstellen läßt.

In den Anfangszeiten der Elektrotechnik wußte man mit Wechselstrom allerdings noch nichts anzufangen, man verlangte einen ständig in einer Richtung fließenden Gleichstrom. Bei den ersten „Induktionsmaschinen“ wurde der Wechselstrom durch einen

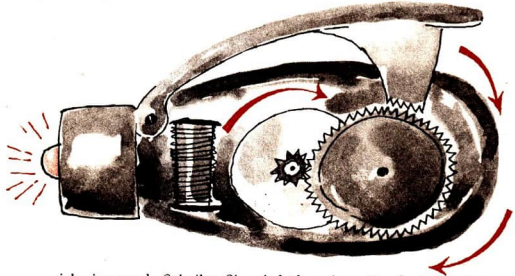


Kommutator gleichgerichtet. Er saß unterhalb des Hufeisenmagneten auf der Welle und kehrte jeweils die Stromrichtung im richtigen Augenblick um (s. S. 77).

Die Induktionsmaschine ist ein Wechselspannungsgenerator, dessen Frequenz und Spannung davon abhängen, wie schnell die Kurbel gedreht wird.

So „altmodisch“ die Induktionsmaschine auch aussehen mag – sie existiert noch heute. Mehr noch: Alle Generatoren in den Kraftwerken sind nach ihrem Prinzip gebaut. Ihre Gestalt hat sich selbstverständlich gründlich gewandelt.

Wenn Sie zum Beispiel eine Dynamotaschenlampe auseinander-schrauben, erkennen Sie ein U-förmiges Blechpaket, auf das eine Spule gewickelt ist. Zwischen den Schenkeln dieses „U“ dreht



sich eine runde Scheibe. Sie wird über einen Handhebel und eine Zahnradübersetzung in rasche Rotation versetzt. Mit einem Nagel oder einem Kompaß können Sie sofort feststellen, daß in die Scheibe kleine Dauermagneten eingelassen sind. Sie induzieren in der Spule eine Wechselspannung, die Strom durch das mit den Spulenden verbundene Taschenlampenbirnchen treibt. Je schneller Sie den Hebel drücken, desto heller brennt die Lampe.

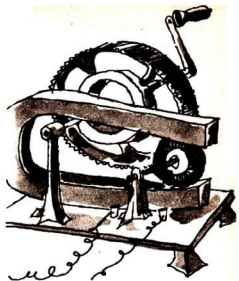
Eine ähnliche Beobachtung kann jeder machen, der im Dunkeln das Fahrrad benutzt. Je größer die Geschwindigkeit ist, desto heller strahlt das Licht. Der Fahrraddynamo, der den Strom für den Scheinwerfer liefert, ist ebenfalls eine Induktionsmaschine. Vor den Spulen rotieren die Pole eines kräftigen Dauermagneten. Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Spannung ist wichtig für die Meß- und Regeltechnik. Zur Drehzahlmessung von Wellen, Rädern usw. werden häufig „Tachometer-Generatoren“ (kurz Tachogeneratoren genannt) benutzt. Sie geben eine der Drehzahl proportionale Spannung ab, die gemessen und durch eine entsprechend geeichte Skala in Umdrehungen je Minute angezeigt wird. Man kann aber mit der Spannung des Tachogenerators auch unmittelbar ein Steuergerät betätigen, das bei-

spielsweise einen Motor bei Überschreiten einer kritischen Drehzahl abschaltet oder die Drehzahl einer Maschine selbsttätig auf einem vorgegebenen Wert hält.

Bei der Dynamotaschenlampe, beim Fahrraddynamo und beim Tachogenerator sitzen die Spulen „außen“, die Magnetpole kreisen „innen“. Generatoren mit dieser Spulen- und Magnetanordnung heißen deshalb Innenpolmaschinen. Alle Generatoren, die für das öffentliche Energieversorgungsnetz arbeiten, sind Innenpolmaschinen.

Man kann die Spulen aber auch vor dem feststehenden Magneten rotieren lassen. In diesem Fall spricht man wegen der außen liegenden Magnetpole von einer „Außenpolmaschine“. Besonders an den Veteranen dieser Bauart erkennt man die Dauermagneten sehr deutlich.

Ein Grund war vor allem dafür maßgebend, daß die Außenpolmaschinen gegenüber den Innenpolmaschinen ins Hintertreffen gerieten: Bei der Innenpolmaschine stehen die Spulen fest; der Strom kann den Spulenden unmittelbar entnommen werden. Bei der Außenpolmaschine dagegen drehen sich die Spulen. Der Strom kann nur über Schleifringe abgezapft werden. Sie zeigen die gleiche Störanfälligkeit wie die Kommutatoren von Gleichstrommotoren. Bei Leistungen, wie sie von Großgeneratoren verlangt werden, wären Schleifringe überhaupt nicht anwendbar. Motoren großer Leistung konnten erst gebaut werden, als man die Permanentmagneten durch die weit kräftigeren Elektromagneten ersetzte. Bei Generatoren ist es ebenso. Nur Kleinstgeneratoren – wir haben einige Beispiele kennengelernt – werden mit Permanentmagneten ausgerüstet, bei allen anderen Generatoren beherrscht der Elektromagnet das Feld.

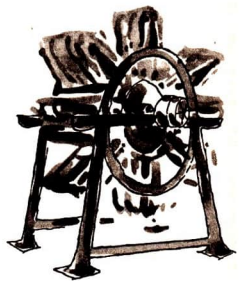


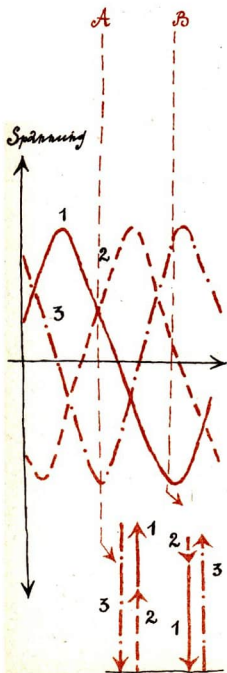
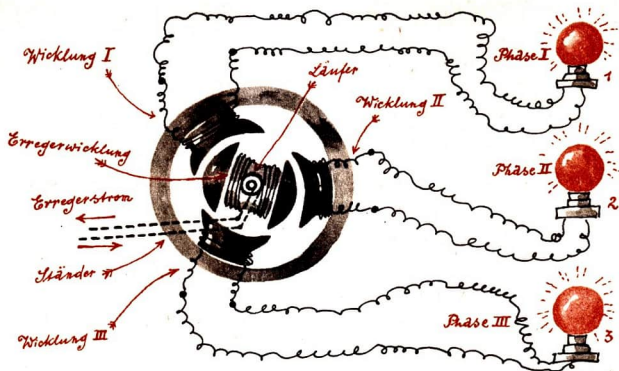
Der Drehstromgenerator

Drehstromgeneratoren haben besonders große Bedeutung; denn sie gestatten, was die Leistungsfähigkeit und die Abmessungen der Generatoren anbetrifft, besonders günstige technische Lösungen.

Der ruhende Teil des Drehstromgenerators heißt wieder Ständer. Er besteht aus einem ringförmigen, lamellierten Eisenkörper, auf dessen Umfang in gleichen Abständen Induktionsspulen verteilt sind. Vor den Spulen rotiert ein Elektromagnet, der Läufer. Er muß mit Gleichstrom gespeist werden. Dieser „Erregerstrom“ wird dem Läufer über Schleifringe zugeführt. Das ist ohne Schwierigkeiten möglich, weil die Erregerleistung weit geringer als die vom Generator abgegebene Wechselstromleistung ist.

Die Anschlüsse der drei Ständerspulen sind getrennt herausgeführt. Jede Spule schickt einen Strom durch einen angeschlossenen Stromverbraucher. Jeweils bei einer Läuferumdrehung entsteht eine vollständige Wechselspannungswelle je Spule. Die einzelnen



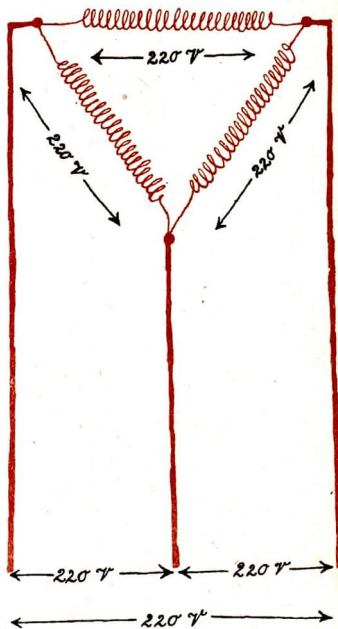
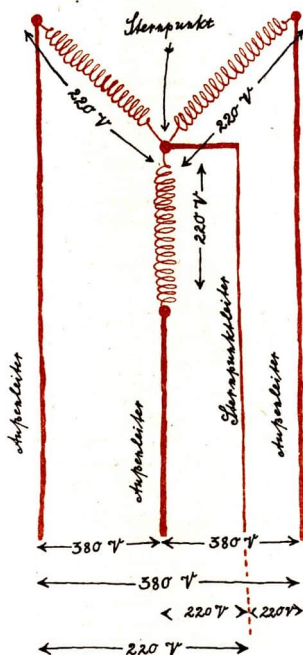


Spulenströme, die „Phasen“, sind jedoch zeitlich gegeneinander verschoben. Wenn in Spule 1 gerade das Spannungsmaximum durchlaufen wird, muß sich der Läufer noch um 120° weiterdrehen, ehe das Maximum in Spule 2 erreicht wird. Nach einer weiteren 120° -Drehung erreicht die Spannung in Spule 3 ihren Höchstwert.

Den Ablauf der Spannungen eines „Dreiphasensystems“ haben wir schon grafisch dargestellt (s. S. 82). Wir wollen jetzt einen Ausschnitt dieser Darstellung genauer untersuchen, indem wir die Spannungen in einem bestimmten Augenblick addieren. Im Zeitpunkt A haben die Phasenspannungen 1 und 2 gleiche Richtung, die Phasenspannung 3 dagegen ist entgegengesetzt gepolt. Addieren wir die Spannungen zeichnerisch unter Beachtung ihrer Richtung, erhalten wir für die resultierende Spannung den Wert Null. Wiederholen wir die Addition für den Zeitpunkt B: Wieder haben die Phasen 1 und 2 die gleiche Richtung, während Phase 3 in Gegenrichtung gepolt ist. Die zeichnerische Addition ergibt wiederum Null. Das gleiche Ergebnis erhielten wir für jeden beliebigen Zeitpunkt des Spannungsablaufs: Die Summe der Phasenspannungen ist in jedem Augenblick Null. Sind die drei Spulen gleichmäßig durch Stromverbraucher belastet, ergibt auch die Summe der Ströme Null.

Diese Gesetzmäßigkeiten sind sehr wichtig. Man kann die Spulen des Generators miteinander verbinden, ohne daß ein Kurzschluß zu befürchten wäre. Damit brauchen wir zur Weiterleitung der drei Phasen nicht mehr sechs, sondern nur noch vier beziehungsweise drei Leitungsdrähte. Aus dem „offenen“ Dreiphasensystem wird ein „verkettetes“ Dreiphasensystem. Es verbilligt die Übertragung und Verteilung elektrischer Energie entscheidend.

Es gibt zwei Schaltmöglichkeiten für die Spulen. Werden die Spulenden miteinander verbunden und die Spulenanfänge herausgeführt, haben wir es mit der „Sternschaltung“ zu tun. Die Stromverbraucher können zwischen je zwei Außenleitern oder auch zwischen je einem Außenleiter und dem zum „Sternpunkt“ führenden „Sternpunktleiter“ (auch Nulleiter genannt) angeschlossen werden. Sind die drei Phasen gleichmäßig belastet, bleibt der Sternpunktleiter stromlos, weil sich die einzelnen Ströme gegenseitig aufheben. Bei ungleichmäßiger Belastung fließt im Sternpunktleiter nur ein den Belastungsunterschieden entsprechender Ausgleichsstrom. Einem Dreiphasensystem in Sternschaltung können gleichzeitig zwei verschiedene Spannungen entnommen werden. Sie stehen zueinander in einem ganz bestimmten Zahlenverhältnis. Beträgt zum Beispiel die Spannung an jeder der drei Ständerspulen 220 V, so steht diese Spannung



zur Verfügung, wenn wir einen Stromverbraucher zwischen einen Außenleiter und den Nulleiter schalten. Zwischen Außenleitern dagegen beträgt die Spannung 380 V.

Die Licht- und Kraftleitungen in Betrieben und Wohngebieten sind meistens Teil eines Dreiphasensystems in Sternschaltung. Die Spannung von 220 V wird für Haushalte und für Lichtanlagen verwendet, während größere Motoren für eine Spannung von 380 V ausgelegt sind.

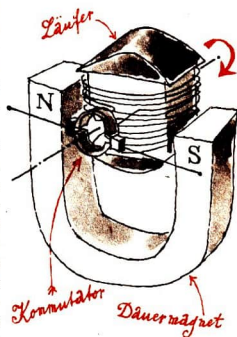
Bei der „Dreieckschaltung“ wird jeweils ein Spulenende mit dem Anfang der nächsten Spule verbunden. Einen Sternpunkt und einen Nulleiter gibt es nicht. Die Ströme werden immer an zwei Eckpunkten des Dreiecks entnommen. Deshalb steht bei Dreieckschaltung nur eine Spannung zur Verfügung.

Die Frequenz der meisten europäischen Energienetze beträgt 50 Hz. Da sich der Läufer des skizzierten Generators für jede Wechselspannungswelle einmal drehen muß, beträgt seine Drehzahl 3000 U/min. Derart hohe Drehzahlen sind nur mit Dampfturbinen ohne weiteres zu erreichen. Die Läufer haben dabei gewaltigen Fliehkräften standzuhalten. Da diese Kräfte mit dem Läuferdurchmesser wachsen, führt man Läufer für hohe Drehzahlen walzenförmig aus. Entsprechend muß natürlich der Ständer gestaltet sein. Er hat Zylinderform, die Wicklungen werden in Längsnuten eingelegt. Allerdings finden wir bei Großgeneratoren keine Drahtwindungen mehr, sondern lange, sorgfältig isolierte Kupferstäbe, in denen die Spannung induziert wird. Generatoren für Dampfturbinenantrieb, „Turbogeneratoren“, erreichen zusammen mit ihrer Antriebsturbine oft Längen von mehr als 25 m.

Als Generatoren noch von Dampfmaschinen angetrieben wurden, waren so hohe Drehzahlen ausgeschlossen. Auch Wasserturbinen laufen langsamer als Dampfturbinen. Um trotzdem auf die Netzfrequenz von 50 Hz zu kommen, ist ein Kunstgriff nötig: Man erhöht die Zahl der „Polpaare“ (zu jedem gehört ein Nord- und ein Südpol) des Läufers. Bei zwei Polpaaren sinkt die Drehzahl für die gleiche Frequenz des Stromes auf die Hälfte, bei vier Polpaaren auf ein Viertel, bei acht Polpaaren auf ein Achtel. Die Fliehkräfte sind bei niedrigen Drehzahlen geringer, so daß man statt der „Walze“ ein „Polrad“ großen Durchmessers wählen kann. Im Ständer sind, gleichmäßig über den Umfang verteilt, je Polpaar drei Spulengruppen untergebracht, deren jede eine Phase des Drehstromes liefert.

Wir sind bis jetzt noch nicht darauf eingegangen, wo der Gleichstrom für die Erregung der Läufermagneten herkommt. Seine Stärke ist zwar gering gegenüber der des Generatorstromes, aber es wäre trotzdem nicht möglich, ihn Batterien zu entnehmen. Lieferant des Erregerstromes ist daher ein Gleichstromgenerator, die „Erregermaschine“. Sie sitzt meistens auf einer gemeinsamen Achse mit dem Drehstromgenerator.

Gleichstromgeneratoren sind eigentlich auch Wechselstrommaschinen; sie richten jedoch ihren Wechselstrom selbst gleich. Sie sind als Außenpolmaschinen gebaut. Die Spulenenden des Läufers werden einem Kommutator zugeführt. Er entspricht dem Kommutator von Gleichstrommotoren und vertauscht die Anschlüsse der Induktionsspulen nach jeder halben Umdrehung, so daß der abgegebene Strom stets in gleichbleibender Richtung fließt. In der gezeichneten Stellung erfolgt gerade dieses Umschalten.

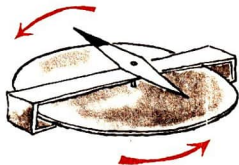


Auch der Feldmagnet des Gleichstromgenerators muß erregt werden. Der Erregerstrom wird nun nicht etwa einer weiteren Erregermaschine entnommen. Die Maschine erregt sich selbst. Läufer- und Feldmagnetwicklungen werden so miteinander verbunden, daß der von der Maschine gelieferte Strom auch die Spulen des Feldmagneten durchfließen muß. Ist die Stromrichtung in den Spulen richtig gewählt, verstärkt der Maschinenstrom die Wirkung des Feldmagneten. Beim Anlaufen der Maschine besitzt der Feldmagnet stets noch einen gewissen „Restmagnetismus“. Er reicht aus, um im Läufer zunächst eine schwache Spannung zu induzieren. Diese Spannung läßt Strom durch den Feldmagneten fließen. Die magnetischen Kräfte nehmen zu und bewirken eine Zunahme der induzierten Läufer-Spannung. Dadurch wieder wächst der Strom im Feldmagneten. Das setzt sich wechselseitig fort, bis die durch die Konstruktion der Maschine gegebene Leistungsgrenze erreicht ist.

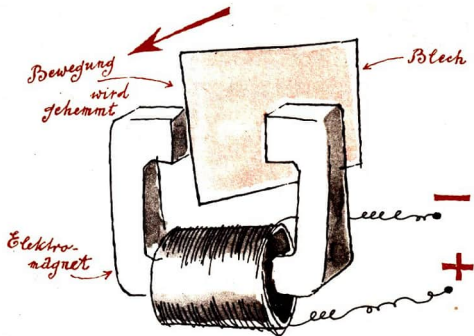
Generatorsätze für 300 MW, ja sogar 600 MW sind heute nicht mehr selten. In der Sowjetunion werden bereits Aggregate für 1000 MW und 1200 MW projektiert. Ein solches Riesensaggregat könnte 30 Millionen 40-W-Birnen speisen.

Wirbelströme

Dem französischen Physiker Dominique François Arago (1786 bis 1853) schreibt man einen interessanten Versuch zu: Unter einer Magnetnadel wird eine Kupferscheibe in rasche Drehung versetzt. Sehr bald beginnt auch die Magnetnadel zu rotieren, und zwar in der gleichen Richtung wie die Kupferscheibe. Der Versuch läßt sich auch umkehren. Dreht man einen Stabmagneten, über oder unter dem sich eine drehbare Metallscheibe befindet, beginnt die Scheibe zu rotieren. Arago glaubte, hier einem bisher unbekannten „Rotationsmagnetismus“ auf die Spur gekommen zu sein – eine Schlußfolgerung, die sich wenig später als falsch erwies.



Ehe wir Aragos Experiment erklären, sei noch ein anderer Versuch beschrieben: Wenn Sie ein Stück Kupfer-, Zink- oder Aluminiumblech zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten hindurchziehen wollen, werden Sie überrascht feststellen, daß das Blech, obwohl es nirgends anstößt, diesem Ver-



sich einen deutlich spürbaren Widerstand entgegensetzt. Er verschwindet, sobald der Strom des Elektromagneten abgeschaltet wird.

Weder Kupfer noch Aluminium oder Zink werden von einem Magneten angezogen. Es muß also einen anderen Grund haben, daß die Magnetnadel rotiert und das Blech gebremst wird. Ein Magnet induziert in jedem Leiter eine elektrische Spannung, wenn sich die Zahl der „geschnittenen“ Kraftlinien ändert. Dabei ist es gleichgültig, ob ein Draht oder ein beliebig geformter Metallkörper im Kraftfeld bewegt wird. Auch in der Kupferscheibe und im Blech werden Spannungen induziert. Sie rufen wegen des geringen Leiterwiderstandes starke Induktionsströme hervor. Da die Bahnen dieser Ströme nicht so einfach zu erfassen sind wie der Stromfluß in einem Draht, nennt man sie „Wirbelströme“. Ganz richtig ist diese Bezeichnung nicht; denn auch die Wirbelströme fließen nicht etwa kreuz und quer durcheinander, sondern unterliegen gleichen Gesetzmäßigkeiten wie jeder elektrische Strom. Wir können uns vorstellen, daß das Blech aus lauter einzelnen Leiterschleifen zusammengesetzt ist, in denen die Wirbelströme kreisen. Bei der Erklärung dieser und vieler ähnlicher Vorgänge hilft uns eine wichtige Regel, die von dem lange in Petersburg wirkenden Physiker Heinrich Friedrich Emil Lenz (1801 bis 1865) aufgestellt wurde. Sie besagt: Ein durch eine Zustandsänderung (z. B. durch die Bewegung eines Magneten) verursachter Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er seiner Ursache entgegenwirkt.

Wenden wir die „Lenzsche Regel“ auf unsere Versuche an. Die Wirbelströme in der Kupferscheibe entstehen, weil sich Scheibe und Magnet gegeneinander bewegen. Diese Ursache kann nur dadurch aufgehoben werden, daß Magnet und Scheibe die gleiche Bewegung ausführen, denn dann befinden sich Scheibe und Magnet relativ zueinander in Ruhe.

Ursache der Wirbelströme im Blech ist der Versuch, es zwischen den Magnetpolen hindurchzubewegen. Daher lösen die Wirbelströme in Wechselwirkung mit dem Feld des Elektromagneten eine Gegenkraft aus, die die Bewegung hemmt.

Leider sind die Wirbelströme nicht allein Gegenstand physikalischer Experimente. Wie jeder elektrische Strom erwärmen die Wirbelströme den Leiter, in dem sie fließen. Das ist oftmals sehr unerwünscht und hat außerdem Energieverluste zur Folge.

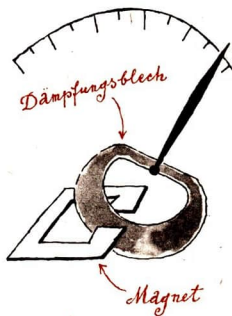
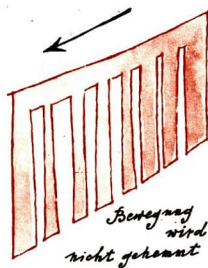
Der rotierende Läufer eines Generators induziert nicht nur in den Ständerspulen Spannungen, sondern ruft auch im Eisenkörper des Ständers Wirbelströme hervor, die den Generator unnötig erwärmen und den Wirkungsgrad herabsetzen. Im Läufer eines Motors entstehen ebenfalls Wirbelströme. Wenn ein Elektromagnet mit Wechselstrom gespeist wird, fließen Wirbelströme in seinem Eisenkern.

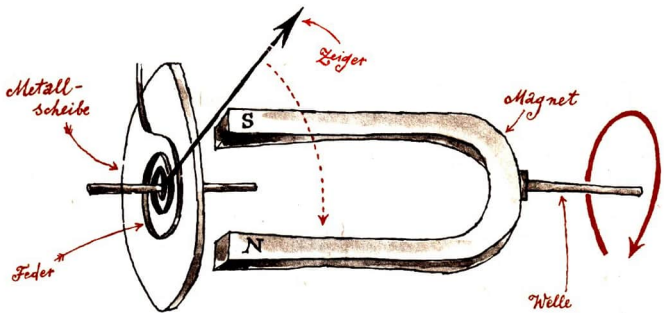
Um die Wirbelströme zu verringern, ist man bemüht, die Metallmassen elektrischer Maschinen und Geräte möglichst zu vermindern. Das ist jedoch nur beschränkt durchführbar. Man kann Wirbelströmen aber auch auf andere Art den Weg verlegen. Schneidet man in ein Blech zahlreiche parallele Schlitzte, so können keine stärkeren Wirbelströme fließen, weil die Strombahnen „verlängert“ werden und einen entsprechend höheren Widerstand aufweisen. Das Blech kann ohne nennenswerten Widerstand zwischen den Magnetpolen bewegt werden.

In Elektromaschinen wird der gleiche Effekt dadurch erzielt, daß man keine massiven Kerne für Magneten und Induktionsspulen verwendet, sondern den Kern aus einzelnen Blechen zusammensetzt, die durch eine Lack-, Papier- oder Oxydschicht gegeneinander isoliert sind. Außerdem benutzt man für die Kerne Legierungen mit verhältnismäßig großem spezifischen Widerstand.

Mitunter allerdings können Wirbelströme auch recht nützlich sein. Damit sich die Zeiger von Meßinstrumenten ohne langes Pendeln auf einen Skalenwert einstellen, ist eine Dämpfung der Zeigerbewegung nötig. Sie ist zu erreichen, indem man den Zeiger mit einem Blechsegment verbindet, das sich zwischen den Polen eines Dauermagneten dreht. Da die Gegenkraft um so größer ist, je schneller der Zeiger pendelt, ist diese Art der Dämpfung recht wirkungsvoll. In Elektrizitätszählern rotiert eine Aluminiumscheibe zwischen Magnetpolen. Hier sorgen die Wirbelströme für einen gleichmäßigen Lauf des Zählers. Auch zum raschen Abbremsen von Wellen und zur Bestimmung der mechanischen Leistung von Arbeitsmaschinen können Wirbelströme benutzt werden.

Aragos Versuch ist die Grundlage eines einfachen Drehzahlmessers. Im „Wirbelstromtachometer“ dreht sich ein Magnet mit der Welle, deren Drehzahl bestimmt werden soll. Vor dem Magneten ist eine Metallscheibe angebracht. Sie versucht, der Dreh-





bewegung des Magneten zu folgen, wird aber durch eine Feder daran gehindert. Je nach der Umlaufgeschwindigkeit der Welle dreht sich die Scheibe um einen größeren oder kleineren Winkel. Ein mit der Scheibe verbundener Zeiger gibt die Drehzahl an. Diese Tachometerart wird häufig in Kraftfahrzeugen verwendet.

Von Windung zu Windung

Wird ein Elektromagnet eingeschaltet, so ist zu beobachten, daß im Gegensatz zur sprichwörtlichen Schnelligkeit der Elektrizität die Stromstärke nicht unverzüglich auf ihren Betriebswert springt, sondern allmählich ansteigt, ja bei Elektromagneten mit sehr vielen Windungen regelrecht emporkriecht. Beim Ausschalten verschwindet die an der Magnetspule liegende Spannung nicht plötzlich, sondern sinkt langsam. Entfernt man den Eisenkern des Magneten, treten diese Erscheinungen sehr geschwächt auf. Beim Einschalten des Stromes baut sich das Magnetfeld der Spule auf. Aus jeder Windung, aus jedem Drahtstück „quellen“ magnetische Kraftlinien. Die Kraftlinien der Windung 1 schneiden dabei alle übrigen Spulenwindungen und rufen in ihnen Induktionsspannungen hervor. Die Kraftlinien der Windung 2 schneiden ebenfalls sämtliche anderen Windungen, auch die Windung 1, und induzieren Spannungen, und so verursacht jede Spulenwindung in jeder anderen, ja sogar jedes Drahtstückchen in jedem anderen, eine Induktionsspannung. Man nennt diese Erscheinung „Selbstinduktion“. Sie ist für das auffällige Verhalten der Magnetspule verantwortlich.

Die Induktion von Spulenwindung zu Spulenwindung setzt ein, sobald Strom zu fließen beginnt. Die entstehende Induktionsspannung muß nach der Lenzschen Regel ihre Ursache aufzuheben suchen. Sie ist daher dem Strom durch die Spule entgegengerichtet und verhindert ein schnelles Anwachsen der Stromstärke. Hat der Strom seinen Höchstwert erreicht, ändert sich das Magnetfeld der Spule nicht mehr. Es treten keine Induktionswirkungen mehr auf.

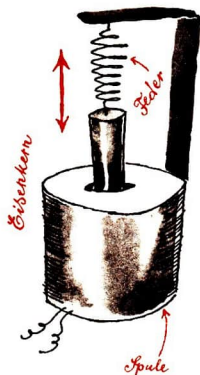
Beim Ausschalten des Stromes bricht das Magnetfeld der Spule zusammen. Wir können uns vorstellen, daß die Kraftlinien in den Leiter zurückkehren. Wieder treten Kraftlinien durch die Spulenwindungen, und wieder entsteht eine Induktionsspannung. Doch diesmal ist das Verschwinden des Magnetfeldes Ursache der Induktion. Daher sucht die entstehende Spannung den Stromfluß zu verlängern. Das ist häufig recht unangenehm, denn beim Abschalten des Magneten ruft die Induktionsspannung an den Kontakten „Öffnungsfunken“ hervor, die die Lebensdauer der Kontakte herabsetzen.

Die Größe der Selbstinduktionsspannung ist davon abhängig, wie schnell die Stromstärke in der Spule geändert wird. Würde man die Stromstärke im Elektromagneten langsam „hochfahren“, so träten nur geringe Induktionswirkungen auf, während die Induktionsspannungen beim plötzlichen Ein- und Ausschalten recht hohe Werte erreichen können. Auch die Eigenschaften einer Spule selbst beeinflussen die Selbstinduktionsspannung. Je größer die Windungszahl, desto höher die Selbstinduktionsspannung. Die Spulenabmessungen, zum Beispiel die Spulenlänge und der Spulenquerschnitt, wirken sich ebenfalls aus. Selbstverständlich sind in einer Spule mit Eisenkern die Induktionswirkungen besonders ausgeprägt.

Wird eine Spule von Wechselstrom durchflossen, kommt ihr Magnetfeld überhaupt nicht mehr zur Ruhe; es „pulsiert“ im Rhythmus des Wechselstromes. Dabei entsteht fortwährend eine Selbstinduktionsspannung (sie ist jetzt eine Wechselspannung), die dem Stromfluß entgegenwirkt und ihn hemmt. Während der Gleichstromwiderstand einer Spule nur vom Leitermaterial und von den Abmessungen des Drahtes abhängt, ist für den Wechselstromwiderstand die Selbstinduktion bestimmend. Der induktive Widerstand einer Spule kann ein Mehrtausendfaches ihres Gleichstromwiderstandes betragen. Er hängt eng mit den Abmessungen, dem Aufbau und der Windungszahl der Spule zusammen, wird jedoch vor allem von der Frequenz des Wechselstromes beeinflusst. Je höher sie ist, desto schneller ändert sich die Stromstärke in der Spule, desto größer wird der induktive Widerstand. Der induktive Widerstand steigt proportional mit der Frequenz, also Verdopplung der Frequenz bedeutet Verdopplung des induktiven Widerstandes, Verdreifachung dreifachen induktiven Widerstand.

Den Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromwiderstand einer Spule nutzt man aus, um Wechselströme und Gleichströme zu trennen, die gemeinsam in einem Stromkreis fließen. Nachrichtengeräte und Rundfunkempfänger werden mit Gleichstrom gespeist, der durch Gleichrichtung des Netzwechselstromes gewonnen wird. Diese Gleichrichtung ist jedoch niemals vollkommen; der gleichgerichtete Strom enthält noch geringe Wechselstromreste. Sie dürfen nicht in den Empfänger eindringen.





Daher schaltet man in den Gleichstrom-Versorgungskreis des Empfängers eine „Drossel“, das ist eine Spule mit sehr vielen Drahtwindungen und einem Eisenkern. Ihr Gleichstromwiderstand ist klein, der Gleichstrom wird daher nur wenig geschwächt. Ihr Wechselstromwiderstand dagegen ist sehr hoch, so daß die Wechselstromreste beinahe völlig beseitigt werden.

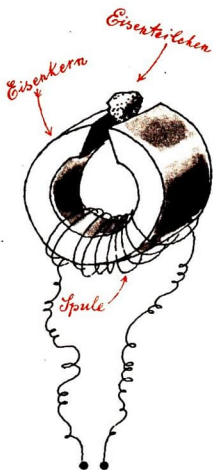
Der induktive Widerstand der skizzierten Spule ist um so größer, je weiter der Eisenkern in die Spule taucht. Das gibt uns die Möglichkeit, einen sehr einfachen Beschleunigungsmesser zu konstruieren. Wird die Spule nach unten beschleunigt, wird der Eisenkern durch die auftretenden Kräfte „leichter“. Die Feder kann ihn ein Stück aus der Spule ziehen. Beschleunigt man dagegen die Spule nach oben, nimmt das „Gewicht“ des Kerns zu; er taucht tiefer in die Spule. Verbindet man die Spule über ein Meßinstrument mit einer Wechselspannungsquelle, so zeigt das Instrument die durch Änderung des induktiven Widerstandes ausgelösten Stromänderungen an. Sie geben ein Maß für die Beschleunigung des Gerätes.

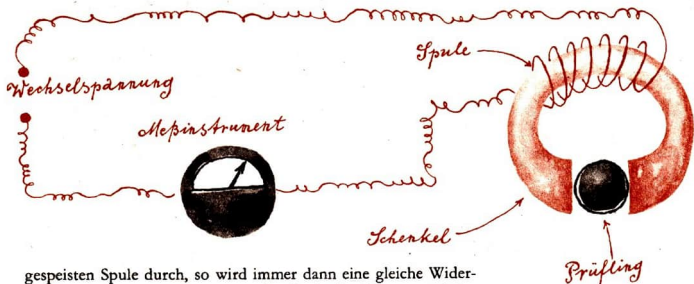
Derartige Beschleunigungsmesser sind wichtig für die Prüfung von Maschinenteilen und Fahrzeugen, für die Ermittlung der Beanspruchung von rotierenden Teilen und für viele andere Zwecke. Es gibt sogar selbsttätige Steuer- und Navigationseinrichtungen für Flugzeuge und Raketen, die auf Beschleunigungsmessungen beruhen. Solche Navigationshilfen sind unabhängig von Funkfeuern und Peilstationen, vom erdmagnetischen Feld und von den Sichtverhältnissen.

Eine Gruppe weiterer Anwendungen induktiver Widerstände geht auf das im Bild gezeigte Prinzip zurück. Eine Spule wird auf einen Eisenkern gewickelt, der fast geschlossen ist und nur durch einen schmalen Luftspalt unterbrochen wird. Überbrückt man den Spalt mit einem Eisen- oder Stahlstück, wird einem großen Teil der magnetischen Kraftlinien der Weg durch die Luft „erspart“. Infolgedessen steigt der induktive Widerstand der Spule an.

Stellen Sie sich vor, die Spule sei so unter einem Transportband angebracht, daß der Luftspalt quer zur Laufrichtung des Bandes steht. Gleitet ein Eisen- oder Stahlkörper auf dem Band über den Spalt, wächst für einen Augenblick der induktive Widerstand der Spule; die Stromstärke sinkt. Mit diesen Stromstärkeschwankungen kann man ein Zählgerät steuern, das die Zahl der vom Band transportierten Teile zählt. In Gütern, die keine Eisenteile enthalten dürfen – Kohlenstaub, Chemikalien –, kann man diese durch die Schwankungen des induktiven Widerstandes aufspüren.

Weil die Änderung des induktiven Widerstandes davon abhängt, wie weit der Luftspalt überbrückt wird, kann man die Methode zur „berührungslosen Dickenmessung“ abändern. Führt man stählerne Drehteile zwischen den Schenkeln einer wechselstrom-





gespeisten Spule durch, so wird immer dann eine gleiche Widerstandsänderung auftreten, wenn die Drehteile den vorgeschriebenen Durchmesser aufweisen. Jede Dickenabweichung läßt den induktiven Widerstand anders schwanken. Das kann signalisiert werden und in automatischen Anlagen eine entsprechende Korrektur der Werkzeugmaschinen veranlassen. Auch der Durchmesser von Stahldrähten oder von Kugeln für Lager ist auf diese Weise leicht zu kontrollieren.

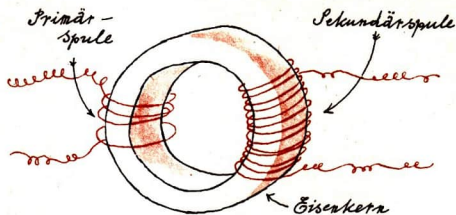
SPANNUNGEN NACH MASS

Spulen und ein Eisenkern

Die Generatoren der Kraftwerke erzeugen Spannungen von einigen Tausenden Volt. In der Technik aber werden die verschiedensten Spannungen benötigt. Für Licht- und Kraftanlagen hat sich die Kombination 220/380 V als besonders günstig erwiesen. Die Hausklingel und die Spielzeugeisenbahn werden mit Strom viel niedrigerer Spannung gespeist, um jede Gefährdung auszuschließen. Die Fahrdrachtspannung elektrifizierter Fernbahnen beträgt oft 15 kV, für den Betrieb von Röntgenanlagen werden Zehntausende oder Hunderttausende Volt benötigt, während das Elektroschweißen mit Spannungen von wenigen Volt auskommt. Auch bei der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie kann man sich nicht auf eine Spannung beschränken.

Damit die Versorgung der zahllosen elektrischen Anlagen und Geräte reibungslos vonstatten geht, brauchen wir ein Zwischenglied, das Spannungen auf einfache Weise und möglichst verlustfrei umwandelt. Dieses Zwischenglied ist der Transformator.

Auf einen ringförmigen Eisenkern sind zwei Spulen gewickelt. Die Anschlüsse der „Primärspule“ werden mit einer Wechselspannungsquelle verbunden. Der Strom in der Primärspule ruft ein Magnetfeld hervor, das seine Richtung und Stärke im Rhyth-



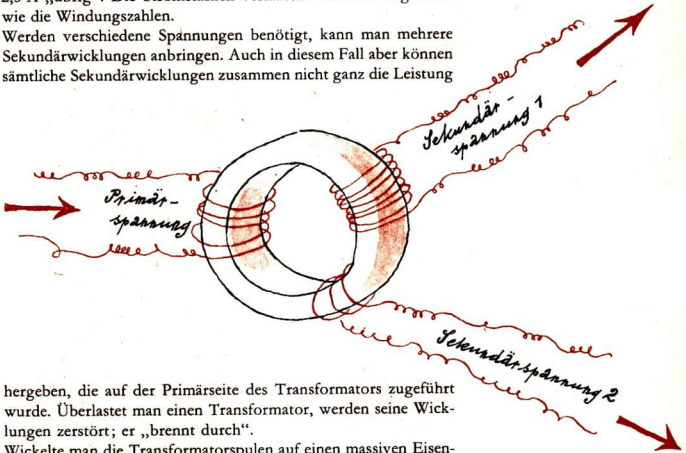
mus der Wechselspannung ändert. Die magnetischen Kraftlinien verlaufen – von einer geringfügigen „Streuung“ abgesehen – sämtlich durch den Eisenring und durchsetzen damit auch die „Sekundärspule“. Infolgedessen wird in der Sekundärspule eine Spannung induziert. Sie folgt allen Änderungen des magnetischen Feldes im Eisenkern und damit auch dem Wechselstrom und der Wechselspannung, die dieses Magnetfeld verursachen. An den Anschlüssen der Sekundärspule können wir eine Wechselspannung messen, deren Frequenz mit der Frequenz der Wechselspannung an der Primärspule übereinstimmt. Schließen wir ein elektrisches Gerät an die Sekundärspule an, wird es von Wechselstrom durchflossen. Das ist das Arbeitsprinzip des Transformators.

Es ist sehr einfach, mit dem Transformator Spannungen zu verändern. Lassen wir die Primärspule, die an ihr liegende Wechselspannung und den Eisenkern unverändert, hängt die in der Sekundärspule induzierte Spannung nur von der Windungszahl ab. Je größer diese ist, desto höher ist auch die Spannung. Es gilt die Regel: Die Spannungen werden im Verhältnis der Windungszahlen „transformiert“. Hat die Primärspule 50, die Sekundärspule 500 Windungen, so tritt an der Sekundärspule die zehnfache Spannung auf. Verbinden wir eine Primärspule von 500 Windungen mit dem 220-V-Netz, können wir an einer Sekundärspule von 2500 Windungen 1100 V messen. Besitzt die Sekundärspule weniger Windungen als die Primärspule, wird die Spannung herabgesetzt. 1000 Primärwindungen induzieren in 100 Sekundärwindungen nur den zehnten Teil der Primärspannung. Die 220-V-Spannung an der Primärspule von 5000 Windungen wird von 100 Windungen der Sekundärspule auf 4,4 V, also auf den fünfzigsten Teil, transformiert. Man kann so mit dem Transformator durch Ändern des Windungszahlverhältnisses Spannungen beliebig herauf- und herabsetzen.

Wie verhält sich die Stromstärke? Wird auch sie transformiert? Selbstverständlich könnten wir einem Transformator höchstens soviel Leistung entnehmen, wie wir ihm zuführen; in Wirklichkeit ist es etwas weniger, denn auch im Transformator sind Verluste unvermeidlich. Die Leistung an der Primärspule ist durch

das Produkt aus Spannung und Stromstärke festgelegt, ebenso die Leistung an der Sekundärspule. Fließen in der Primärspule bei 100 V 5 A, beträgt die Leistung 500 W. Nehmen wir den Transformator als verlustfrei an, muß auch das Produkt aus Spannung und Stromstärke der Sekundärspule 500 W ergeben. Hat sich durch eine entsprechende Windungszahl die Spannung verdoppelt, auf 200 V, bleiben für die Stromstärke nur noch 2,5 A „übrig“. Die Stromstärken verhalten sich also umgekehrt wie die Windungszahlen.

Werden verschiedene Spannungen benötigt, kann man mehrere Sekundärwicklungen anbringen. Auch in diesem Fall aber können sämtliche Sekundärwicklungen zusammen nicht ganz die Leistung



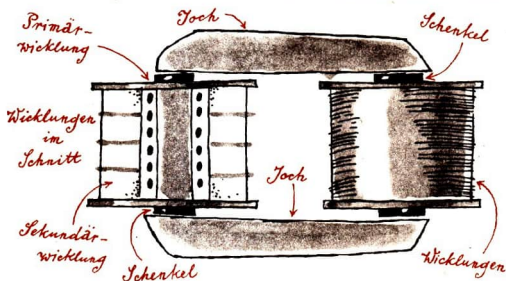
hergeben, die auf der Primärseite des Transformators zugeführt wurde. Überlastet man einen Transformator, werden seine Wicklungen zerstört; er „brennt durch“.

Wickelte man die Transformatorspulen auf einen massiven Eisenkern, induzierten sie in diesem starke Wirbelströme. Der Kern würde sich erhitzen, die dafür verbrauchte Leistung ginge der Nutzleistung des Transformators verloren. Deshalb werden die Kerne von Transformatoren ebenfalls aus einzelnen, gegeneinander isolierten Blechen zusammengesetzt.

Verluste entstehen nicht nur durch die Wirbelströme, sondern auch dadurch, daß der Eisenkern durch die Wechselspannung dauernd „ummagnetisiert“ wird. Ähnlich wie eine Magnethöhle sich umkehrt, wenn wir die Richtung eines sie ablenkenden Stromes ändern, müssen wir uns vorstellen, daß auch die Molekularmagneten des Transformator-kerns mit der Frequenz des Wechselstromes fortwährend „gedreht“ werden. Dazu ist Energie nötig, die dem eigentlichen Zweck des Transformators verlorengeht und den Kern unnütz erwärmt. Es ist eine wichtige Aufgabe der Werkstoffforschung, Transformatorbleche zu entwickeln, bei denen diese „Hystereseverluste“ gering bleiben. Das gleiche Problem taucht auch bei elektrischen Maschinen auf.

Auch die Erwärmung der Transformatorwicklungen durch den hindurchfließenden Strom bedeutet einen Energieverlust. Trotzdem arbeiten Transformatoren mit einem Wirkungsgrad, der weit höher ist als der der meisten anderen elektrischen Geräte und Maschinen. Bei Großtransformatoren kann der Wirkungsgrad bei 99% liegen, und selbst bei Kleintransformatoren erreicht er 90%.

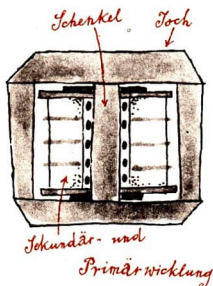
Zwei Bauformen für Transformatoren haben sich allgemein durchgesetzt. Beim „Kerntransformator“ sind die Wicklungen auf zwei Schenkeln untergebracht, die durch Joche verbunden werden. Man kann die Primärwicklung auf dem einen, die Sekundärwicklung auf dem anderen Schenkel anordnen. Meistens verteilt



man die Wicklungen jedoch, so daß jeder Schenkel einen Teil der Primär- und Sekundärwicklung trägt. Damit wird angestrebt, daß möglichst viele Kraftlinien die Sekundärspule durchsetzen. Beim „Manteltransformator“ finden alle Wicklungen auf dem mittleren Schenkel Platz.

Die kleinsten Transformatoren sind kaum größer als ein Reiskorn; die größten können nur auf Spezialwaggons und Spezialfahrzeugen transportiert werden. In Hochleistungstransformatoren, wie sie im Energieverteilungsnetz eingesetzt werden, entsteht trotz des hohen Wirkungsgrades eine solche Wärme, daß sie durch Kühlung abgeführt werden muß.

Bei der „Selbstkühlung“ des Transformators wird die Wärme von der Oberfläche des Transformators abgestrahlt. Durch Kühlrippen und oft auch durch Anblasen mit Luft wird die Wärmeabgabe gefördert. Weit verbreitet ist die „Ölkühlung“. Der Transformator wird dabei in einen mit Öl gefüllten Kessel getaucht. Das Öl sorgt nicht nur für gute Wärmeabfuhr, sondern verbessert gleichzeitig auch die Isolation des Transformators. Dieses Kühlverfahren hat jedoch den Nachteil, daß Öl brennbar ist. In jüngster Zeit hat man nichtbrennbare Flüssigkeiten entwickelt, die das Öl ersetzen können.



Wir haben den Transformator nur in der Verbindung mit der Umwandlung von Wechselspannungen und Wechselströmen erwähnt. Gleichspannungen lassen sich mit Transformatoren nicht ändern; denn es fehlt das Bindeglied zwischen Primär- und Sekundärspule, das pulsierende magnetische Feld. Tatsächlich liegt in der leichten Wandelbarkeit von Wechselspannungen und -strömen einer der Hauptgründe für die weite Verbreitung des Wechselstromes.

Das „Transformieren“ von Gleichspannung und Gleichstrom ist nur auf Umwegen möglich. Man kann mit der „Primär“-Gleichspannung einen Motor antreiben, der seinerseits Antriebsquelle eines Gleichstromgenerators der geforderten „Sekundär“-Gleichspannung ist. Ein solches Aggregat bedarf wegen seiner rotierenden Teile steter Wartung und Pflege und arbeitet mit weit niedrigerem Wirkungsgrad als ein Transformator.

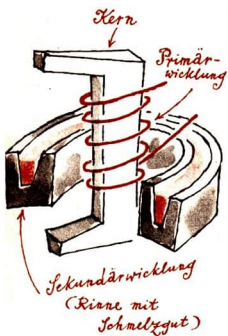
Eine andere Möglichkeit ist es, die Gleichspannung zunächst in eine Wechselspannung zu verwandeln, diese mit einem Transformator auf den gewünschten Wert zu bringen und anschließend wieder gleichzurichten. Auch das ist eine umständliche Methode, die erst in den letzten Jahren und vor allem für kleinere Leistungen technisch befriedigend gelöst werden konnte.

Transformatoren-Allerlei

In Kraftwerken, Schaltstationen und an vielen anderen Stellen des Energienetzes fließen Wechselströme von Tausenden Ampere, treten Spannungen bis zu Hunderttausenden Volt auf. Man muß sie messen, und die dazu nötigen Instrumente sollen sich wie alle anderen Überwachungseinrichtungen in die Pulte und Tafeln der Schaltzentrale einbauen lassen. Das ist nicht ohne weiteres möglich. Meßinstrumente für Tausende Ampere würden unförmig, ihre Anschlüsse wären dicke Kupferschienen; handliche Spannungsmesser für Hunderttausende Volt ließen sich schon wegen der Schwierigkeiten mit der Isolierung kaum konstruieren. Man kann jedoch ganz normale Instrumente verwenden und auf kostspielige Isolationsmaßnahmen und dicke Kupferschienen verzichten, wenn man zwischen die zu messenden Größen und die Instrumente „Meßwandler“ schaltet.

Ein Meßwandler ist ein Spezialtransformator, der die Ströme oder Spannungen auf einen viel niedrigeren Wert herabsetzt. Ein Stromwandler besitzt eine Primärwicklung von nur einer Windung, häufig nur von einem Teil einer vollständigen Windung. Sie ruft in einem Eisenkern ein Magnetfeld hervor, das eine Spannung in der Sekundärspule induziert. Diese Spannung treibt Strom durch das Meßinstrument. Er ist um so viel schwächer als der Primärstrom, als das Übersetzungsverhältnis des Wandlers ausmacht. Sind beispielsweise 1 Primär- und 100 Sekundärwindungen vorhanden, so verursacht ein Primärstrom von 500 A



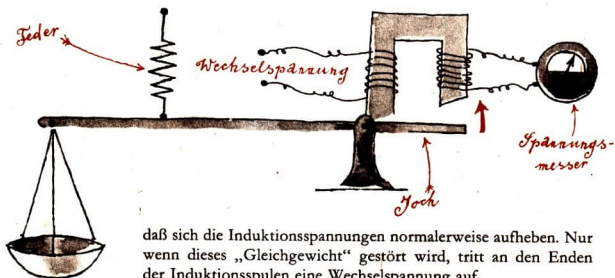


einen Sekundärstrom von 5 A. Da sich das Übersetzungsverhältnis nicht ändert, kann das Meßinstrument unmittelbar nach der Stärke des Primärstromes geeicht werden. Die Messung eines Stromes um 5 A bereitet aber keinerlei Schwierigkeiten. Einfache Meßinstrumente genügen, die Verbindung zwischen Meßwandler und Instrument kann durch eine einfache Leitung erfolgen. Spannungswandler arbeiten nach dem gleichen Prinzip; nur enthält bei ihnen die Primärwicklung sehr viele, die Sekundärwicklung dagegen nur sehr wenige Windungen, damit die hohen Spannungen entsprechend herabtransformiert werden.

Transformatoren besonderer Art sind auch „Induktionsöfen“. Ihre Sekundärspule besteht aus einer ringförmigen Rinne, die mit dem elektrisch leitenden Schmelzgut gefüllt wird. Fließt Wechselstrom durch die Primärspule, wird in der Sekundärwindung ein Strom niedriger Spannung, aber sehr großer Stromstärke induziert. Er bringt das Material in der Rinne zum Schmelzen. Das flüssige Schmelzgut kann nicht durch Verbrennungsgase verunreinigt werden; es wird außerdem durch die auftretenden elektromagnetischen Kräfte umgerührt. Das wirkt sich günstig auf die Qualität des geschmolzenen Metalls aus.

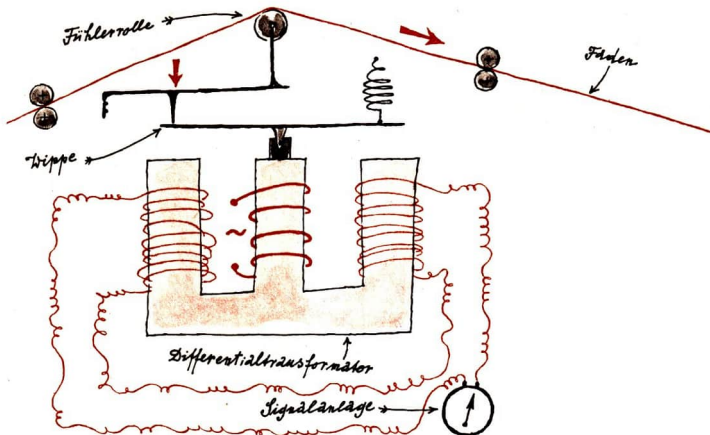
Für das Schmelzen von Sonderstählen und Nichteisenmetallen werden Induktionsöfen häufig eingesetzt. Bei anderen Ausführungen ist die Sekundärspule nicht als Rinne, sondern als Schmelztiegel ausgebildet, der von der Primärspule umfaßt wird.

Als „Geber“ für Fernmessungen wird häufig ein Differentialtransformator benutzt. Er weist drei Wicklungen auf. Eine davon, die „Erregerwicklung“, wird mit einer konstanten Wechselspannungsquelle verbunden. Die beiden anderen Wicklungen sind gleich. Es entsteht in ihnen also jeweils dieselbe Induktionsspannung. Die Wicklungen werden so miteinander verbunden,



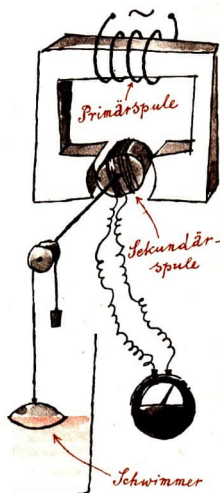
daß sich die Induktionsspannungen normalerweise aufheben. Nur wenn dieses „Gleichgewicht“ gestört wird, tritt an den Enden der Induktionsspulen eine Wechselspannung auf.

Beim Ziehen von Drähten, aber auch in der Textil- und Papierindustrie ist es oft nötig, Drähte, Fäden oder Papierbahnen unter völlig gleichbleibender mechanischer Spannung zu verarbeiten.



Ein Differentialtransformator kann die Werte für eine selbsttätige Regulierung des Bandzuges liefern. Im Bild läuft der Faden über eine federnd angebrachte Fühlerrolle. Sie kippt in Abhängigkeit von der mechanischen Spannung eine Wippe, die gleichzeitig als Joch vor den Schenkeln eines Differentialtransformators schwebt. Steigt die Spannung des Fadens, wird das linke Ende der Wippe nach unten gedrückt. Wegen des kleiner werdenden Luftspaltes wird in der linken Transformatorspule eine größere Spannung induziert als in der rechten, von der sich das zugehörige Wippenende entfernt. Läßt die Spannung dagegen nach, senkt sich das rechte Wippenende. Dadurch entsteht jetzt in der rechten Spule eine höhere Spannung, während die in der linken Spule induzierte Spannung sinkt. In beiden Fällen tritt am Transformator eine Spannung auf, mit der eine Signalvorrichtung oder Regelgeräte betätigt werden können. Hat das Band die vorgeschriebene Spannung, steht die Wippe waagerecht. In beiden Spulen werden gleiche Spannungen induziert. Sie heben einander auf, das Regelgerät bleibt in Ruhe.

Oftmals sollen Winkelstellungen ferngemeldet werden, ohne daß umständliche mechanische Übertragungsglieder notwendig wären. So möchte man die Stellung von Licht- und Radioteleskopen jederzeit ablesen können oder die Ruderstellung von Schiffen zur Brücke fernmelden. Auch für Feuerleitgeräte der Artillerie und der Luftabwehr ist die Fernübertragung von Winkelstellungen notwendig.





Als Winkelgeber kann ein Spezialtransformator dienen. Seine Primärspule liegt an einer Wechselspannung unveränderlicher Größe. Die Sekundärspule ist drehbar und wird mit der Welle gekuppelt, deren Winkelstellung gemessen werden soll. Die in der Sekundärspule induzierte Spannung wird von einem Meßinstrument angezeigt. Sie hängt davon ab, welche Stellung die Sekundärspule einnimmt. Die größte Spannung wird dann induziert, wenn die Stirnflächen der Spule vor den Schenkeln des Transformatorernes stehen. Drehen wir dagegen die Sekundärspule um 90° weiter, wird keine Spannung induziert. Sämtliche Zwischenstellungen ergeben eine entsprechende Spannung. Man kann die Instrumentenskala direkt in Winkelgraden eichen.

Ein anderes bewährtes Hilfsmittel zur Winkelfernübertragung ist der „Drehfeldgeber“. Mit ihm lassen sich nicht nur Winkel bis 360° anzeigen, sondern es ist auch möglich, Rotationsbewegungen synchron in die Ferne zu übertragen. Es läßt sich zum Beispiel die Stellung eines fortwährend umlaufenden Scheinwerfers ständig anzeigen, man kann die Drehung von Radarantennen überwachen usw. Im „Geber“ und im „Empfänger“, die beide gleich gebaut sind, finden wir je eine drehbare Spule. Beide Spulen werden mit Wechselstrom gespeist. Jede Spule induziert Spannungen in drei Ständerspulen, die gleichmäßig auf dem Umfang eines Kreises verteilt sind. Die festen Spulen des Gebers werden mit den festen Spulen des Empfängers verbunden, wie wir es bei der Sternschaltung von Dreiphasenströmen kennengelernt haben. Die drehbare Spule, der „Rotor“ des Gebers, wird mit der Welle gekuppelt, deren Position anzuzeigen ist. Der Rotor des Empfängers betätigt eine Anzeigevorrichtung.

Stehen beide Rotoren in gleicher Stellung gegenüber ihren Ständerspulen, werden in den Geber- und in den Empfängerspulen gleiche Spannungen induziert. Da sie einander entgegenwirken, fließt in den Verbindungsleitungen zwischen Geber und Empfänger kein Strom.

Das Gleichgewicht wird gestört, sobald der Geberrotor eine andere Stellung einnimmt. Die Spannungsverteilung in den Geber- und den Empfängerspulen stimmt dann nicht mehr überein. Durch die Verbindungsleitungen und durch die Empfängerspulen fließen Ausgleichsströme. Sie verändern die Feldverhältnisse im Empfänger so, daß auf den Empfängerrotor eine Drehwirkung ausgeübt wird. Er dreht sich, bis wieder Spannungsgleichgewicht zwischen Geber und Empfänger herrscht, das heißt, er dreht sich in die gleiche Stellung wie der Geberrotor. Da die Ausgleichsströme bei einer Drehung des Geberrotors sofort einsetzen, macht der Empfängerrotor jede Drehbewegung unverzüglich mit. Damit er nicht „pendelt“, ist meistens eine Luft- oder Wirbelstromdämpfung vorgesehen.

Es ist, als seien Geber und Empfänger durch eine unsichtbare Welle miteinander verbunden. Dabei muß allerdings eingeschränkt

werden, daß sich auf diese Weise im allgemeinen keine großen Kräfte übertragen lassen. Dafür aber kann man von einem Geber aus mehrere Empfänger steuern.



STIMMEN IN DIE FERNE

Es fing bescheiden an

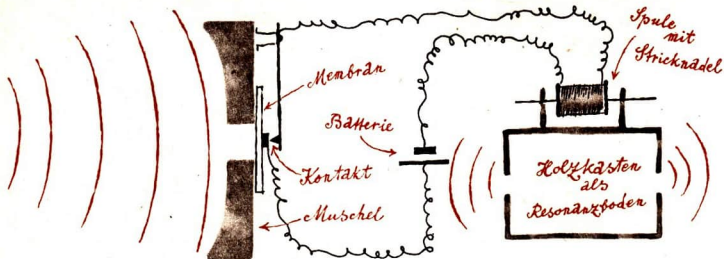
Selbst das längste und schnellste Telegramm kann nur eine schriftliche Mitteilung ersetzen, nicht die Verständigung von Mund zu Mund, das Gespräch. Die rasche Entwicklung der Industrie, des Verkehrswesens und des Handels im vergangenen Jahrhundert aber forderte eine solche Verständigungsmöglichkeit. Es genügte nicht, in die Ferne zu schreiben, man mußte auch in die Ferne sprechen können; man brauchte ein „Telefon“.

Von vornherein bestand kein Zweifel darüber, daß sich ein Telefon nur mit Hilfe des elektrischen Stromes verwirklichen lassen würde. Man konnte auch schon das noch heute gültige Prinzip des Fernsprechers formulieren: Die Worte des Sprechenden müssen in Strom- und Spannungsschwankungen verwandelt werden, die über Leitungen zum Hörenden übertragen werden. Dort sind die elektrischen Änderungen wieder in Schall zurückzuverwandeln.

Das klingt einfacher, als es ist. Telegrafiezeichen bestehen aus Stromstößen und dazwischenliegenden Pausen. Laute hingegen sind Schallwellen, Luftverdichtungen und -verdünnungen verschiedener Frequenzen und Intensität. Nur wenn es gelingt, diese Schwingungen bei der Übertragung zu erhalten, ist eine telefonische Verständigung überhaupt möglich.

Das erste Telefon wurde der Öffentlichkeit im Oktober 1861 vorgeführt. Sein Erfinder war der junge Lehrer Philipp Reis (1834–1874). Reis löste das Problem der Umwandlung von Schallwellen in elektrische Größen auf folgende Weise: Der Gehörgang eines aus Holz geschnitzten Ohrmodells wird mit einer dünnen, elastischen Membran abgeschlossen. Sie gerät in Schwingungen, sobald jemand in das „Ohr“ spricht. Auf die Membran wird ein leichtes Metallplättchen geklebt, das eine Kontaktspitze lose berührt. Schwingt die Membran, wird der Kontakt im Rhythmus dieser Schwingungen geöffnet und geschlossen. Schaltet man den Kontakt in einen Stromkreis, fließen in diesem kurze Stromstöße, die ein ungefähres Bild der Schallwellen sind.

Zur Rückverwandlung der Stromstöße griff Reis auf eine damals schon seit einigen Jahren bekannte Beobachtung zurück: Der Kern eines Elektromagneten kann Töne hervorbringen, wenn der Strom in sehr rascher Folge ein- und ausgeschaltet wird. Reis benutzte als „Kern“ eine Stricknadel in einer Spule mit vielen Windungen dünnen Drahtes. Als Lager der Stricknadel dienten



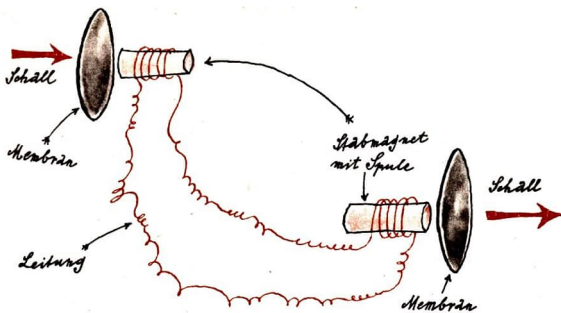
Steg, die auf einem hölzernen Resonanzkasten befestigt waren. Die Spulenden wurden mit dem „Ohr“ und einer Gleichspannungsquelle zu einem Stromkreis zusammengeschaltet, so daß die Stromstöße die Spule durchfließen mußten. Die hervorgerufenen Töne spiegelten die Folge der Stromstöße und damit die Schallwellen des Senders wider.

Das Telefon des „Schulmeisters“ funktionierte. Es gelang, Sprache und musikalische Tonfolgen von einem Raum in einen anderen zu übertragen. Obwohl Reis unermüdlich weiter experimentierte und seine Apparate ständig verbesserte, nahm man ihn nicht ernst und tat seine Versuche als zwar interessante, im Grunde aber überflüssige physikalische Spielerei ab. Verbittert und krank starb er im Alter von nur 40 Jahren.

Beim Reisschen Telefon war aufgefallen, daß musikalische Töne deutlicher übertragen und wiedergegeben wurden als Sprache. Ein Hauptgrund dafür war, daß Sprachschwingungen und Töne eben nicht in *Stromschwankungen*, sondern in *Stromstöße* und Pausen verwandelt wurden. Bei dem komplizierten Schwingungsgemisch, das die menschliche Sprache darstellt, fiel diese Verfälschung besonders ins Gewicht.

Dem Physiologen und Taubstummenlehrer Alexander Graham Bell (1847–1922) verdanken wir ein Telefon, in dem wir es wirklich mit *Stromschwankungen* zu tun haben. Außerdem braucht Bells Telefon nicht einmal eine Batterie.

Bell benutzte den gleichen Apparat zum Sprechen und zum Hören. Er besteht aus einem Stabmagneten, der eine Spule trägt, und einer dicht vor der Stirnseite des Magneten schwebenden elastischen Membran aus Eisenblech. Wird gegen die Membran gesprochen, schwingt sie entsprechend der Frequenz und Intensität der Schallwellen. Ihr Abstand von der Stirnfläche des Magneten vergrößert und verringert sich. Sein Feld wird durch die Schwingungen beeinflusst; in der Spule entsteht eine Induktionsspannung, deren Verlauf ein Bild der Schallwellen ist, die die Membran in Schwingungen versetzen.

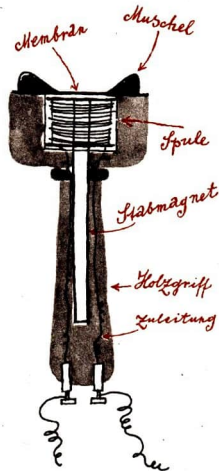


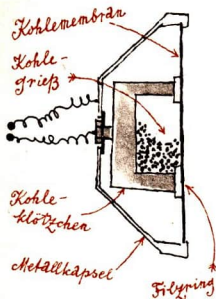
Die Induktionsspannung verursacht einen Wechselstrom, der die Leitungen und die Spule des zweiten Apparates durchfließt. Das Feld seines Magneten wird durch diesen Strom verstärkt oder geschwächt. Die Eisenblechmembran wird infolgedessen mehr oder weniger stark angezogen. Sie schwingt, und da sie auch die Luftteilchen ihrer näheren Umgebung zu Schwingungen veranlaßt, sind aus dem zweiten Apparat die Laute zu hören, die in den ersten gesprochen wurden.

Das Bellsche Telefon ist an Einfachheit kaum zu überbieten: Zwei Apparate, die abwechselnd an Mund oder Ohr gehalten werden müssen, und die Verbindungsleitungen – mehr braucht man nicht für eine Telefonverbindung. Trotzdem konnten mit dem Bellschen Telefon Entfernungen bis zu 75 km überbrückt werden. Weiter allerdings kam man nicht, und das ist auch nicht schwer zu verstehen. Die Spannungen und Ströme in den Apparaten Bells sind sehr gering. Ihre Energie entstammt ausschließlich der Schallenergie der menschlichen Stimme, und die Umwandlung in Elektroenergie vollzieht sich außerdem mit nur geringem Wirkungsgrad. Durch den Leitungswiderstand werden bei größeren Entfernungen die Spannungen und Ströme so geschwächt, daß der Empfangsapparat nicht mehr anspricht.

Um den Leitungswiderstand überwinden zu können, mußte man sich von der „Energiequelle Stimme“ freimachen und statt dessen eine leistungsfähigere Energiequelle einsetzen, die durch die Schallschwingungen nur gesteuert wird.

Solche Überlegungen führten zur Entwicklung des Mikrophons. Im Inneren einer Schutzkapsel befindet sich eine kleine Kammer. Ihre Rückwand besteht aus Kohle, nach vorn wird sie durch eine Kohlemembran abgeschlossen, die auf Filz gelagert ist. Das Innere der Kammer ist teilweise mit Kohlegrieß gefüllt. Kohlemembran und Kammerrückwand tragen Anschlußkontakte. Bewegt sich die Membran nach innen, wird der Kohlegrieß zusammengedrückt. Die Berührungsflächen zwischen den Kohlekörnern werden größer, der „Berührungswiderstand“ sinkt. Be-



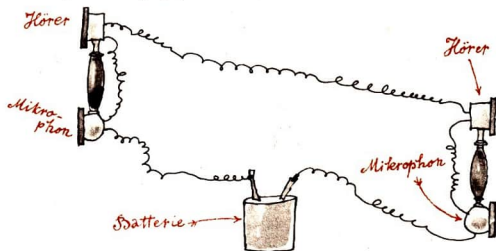


wegt sich die Membran dagegen nach außen, verkleinern sich die Berührungsflächen, der Widerstand wächst. Wenn die Kohlemembran Schwingungen ausführt, ändert sich der Widerstand des Mikrophons mit gleicher Frequenz. Es ist also eigentlich nichts anderes als ein auf Schallschwingungen reagierender Kohledruckregler (s. S. 46).

Wenn wir einen Bellschen Apparat, ein Mikrophon und eine Batterie zu einem Stromkreis zusammenschalten, fließt ständig Strom durch Mikrophon und Hörerspule. Seine Stärke ändert sich nicht, solange das Mikrophon nicht „besprochen“ wird. Sobald Schallwellen die Mikrophonmembran treffen, wechselt der Mikrophonwiderstand rhythmisch. Dementsprechend schwankt die Stromstärke in der Leitung und in der Hörerspule. Die Membran des Hörers schwingt mit und ruft Schallwellen hervor. Mit einem Kohlegrieffmikrophon und einer leistungsfähigen Batterie lassen sich so kräftige Stromschwankungen auslösen, daß ein Hörer noch bei Leitungslängen von einigen Hunderten Kilometern anspricht.

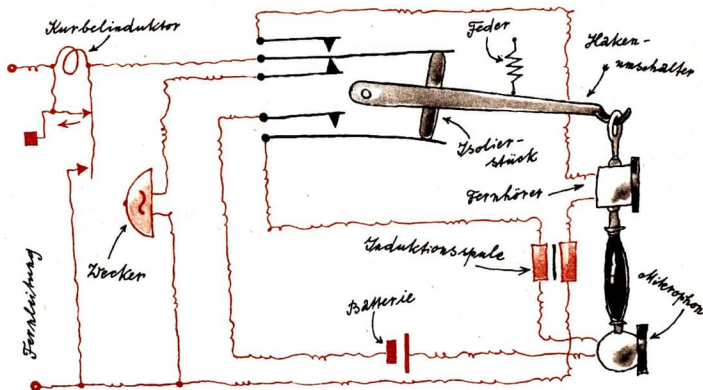
Magnet und Spule werden nur noch zum Empfang verwendet. Der Bellsche Hörer mußte leistungsfähigeren und handlicheren Hörern weichen. Sie verwenden einen Hufeisenmagneten, der so geformt ist, daß er in einer flachen Kapsel Platz hat. Um den Benutzer des Telefons nicht zu eng an den Apparat zu fesseln, ging man dazu über, Mikrophon und Hörer in einem „Handapparat“ zu vereinen, der durch ein mehradriges Kabel mit dem Apparatgehäuse verbunden ist.

Zwei Mikrophone, zwei Hörer und eine Spannungsquelle brauchen wir für eine Fernspreerverbindung. Sämtliche Bauelemente werden „hintereinander“ geschaltet, so daß der Batteriestrom beide Mikrophone und beide Hörer durchfließt. Zweierlei stört an dieser Schaltung. Erstens fließt auch dann Strom, wenn niemand den Fernsprecher benutzt. Zweitens: Woher weiß unser Gesprächspartner, daß wir ihn sprechen möchten? Es fehlt noch eine Vorrichtung, die ihn an den Apparat ruft. Bei den ersten Fernsprechern machte man es sich einfach: Der Anrufer klopfte kräftig gegen die Membran seines Bellschen Hörers.



Dieses Klopfen war bei der Gegenstelle als Knacken zu vernehmen, auch wenn sich niemand den Hörer ans Ohr hielt. Allerdings mußte es dazu im Raum ganz still sein.

Die beste Lösung ist es, zum Anrufen eine elektrische Klingel zu nehmen. Sie wird aus einer Batterie mit Strom versorgt; der Anrufstrom fließt ebenfalls über die Fernleitung. Die Klingel ertönt, sobald an der Gegenstelle ein Rufknopf gedrückt wird. Sehr bald verschwand die „Rufbatterie“ aus dem Fernsprecher. Ihre Stelle nahm ein kleiner Wechselspannungsgenerator ein. Es ist der „Kurbelinduktor“, der in viele Millionen Fernsprecher eingebaut wurde. Der Ruf „geht ab“, wenn die Handkurbel des Induktors gedreht wird. Die uns bekannte Klingel kann dann allerdings nicht mehr verwendet werden. Sie weicht dem „Wechselstromwecker“. Er ist einfacher gebaut als die Klingel und besitzt keine Kontakte, die verschleifen.



Wird nicht gesprochen, muß die Mikrophonbatterie abgeschaltet, der Stromkreis des Weckers dagegen eingeschaltet sein. Während des Gesprächs ist dagegen der Weckerstromkreis zu unterbrechen und die Mikrophonbatterie anzuschließen. Außerdem muß der Kurbelinduktor kurzgeschlossen werden, weil seine Wicklung einen hohen Wechselstromwiderstand besitzt und die Sprechströme schwächen würde.

Das Umschalten des Mikrophonstromkreises und des Weckers erledigt selbsttätig der „Hakenumschalter“. Der Haken, an dem der Handapparat aufgehängt wird, ist das Ende eines drehbaren Kontaktarms, der durch das Gewicht des Handapparates nach unten gezogen wird und emporschwenkt, sobald der Handapparat

abgehoben wird. In der unteren Stellung wird der Weckerstromkreis geschlossen, der Mikrophonstromkreis dagegen unterbrochen. Der Apparat ist zur Aufnahme eines Rufs bereit. In der oberen Stellung schließt sich der Mikrophonstromkreis, während die Fernleitung vom Wecker auf den Handapparat umgeschaltet wird. Eine andere Ausführung des selbsttätigen Umschalters ist der heute in jedem Tischfernsprecher vorhandene „Gabelumschalter“, auf dem der Handapparat ruht. Der Kurbelinduktor ist in seiner Normalstellung kurzgeschlossen. Durch einen Druckkontakt wird dieser Kurzschluß nur aufgehoben, solange die Kurbel gedreht wird.

Weitere Verbesserungen und Vereinfachungen kamen im Laufe der Zeit hinzu. Es erwies sich als zweckmäßig, im Mikrophonstromkreis einen Transformator – Induktionsspule genannt – vorzusehen. Damit wird vermieden, daß der Strom der Mikrophonbatterie über die Fernleitung fließt und geschwächt wird. Nur die von der Induktionsspule transformierten Sprechströme werden der Fernleitung zugeführt. Außerdem störte es, daß zu jedem Fernsprecher eine Batterie gehörte. Deshalb ging man vom Fernsprechsystem mit „Ortsbatterie“ bei jedem Teilnehmer zum System mit „Zentralbatterie“ über. Es arbeitet mit einer leistungsfähigen Batterie, die in der Fernsprechzentrale aufgestellt wird und alle Teilnehmerapparate speist. Eine Zentralbatterie ist leichter zu warten und wirtschaftlicher als zahlreiche einzelne Ortsbatterien.

Das Telefonieren wird automatisiert

Ebenso wichtig wie ein einwandfrei funktionierender, betriebssicherer Fernsprechapparat ist das Herstellen der nötigen Verbindungen, damit jeder Fernsprechteilnehmer jeden anderen anrufen kann. Das ist die Aufgabe der Fernsprechvermittlung, der „Zentrale“. Weltberühmt als Hilfsmittel der Vermittlungstechnik wurde der „Klappenschrank“. Er ist auch heute noch unentbehrlicher Bestandteil vieler kleinerer Fernsprechanlagen in Betrieben und Verwaltungen.

Beim Klappenschranksystem endet die von jedem Teilnehmer zum „Amt“ führende Leitung an einer „Klinke“ und einer „Klappe“. Die Klinke ist eine Art Steckdose, in die der Stöpsel einer Verbindungsschnur eingeführt werden kann. Wird das andere Ende der Verbindungsschnur ebenfalls in eine Klinke gesteckt, sind die an diese Klinken angeschlossenen Teilnehmer miteinander verbunden.

Die Klappe signalisiert dem Telefonisten, welcher Teilnehmer sprechen möchte. Wenn der Teilnehmer anruft, fließt Strom durch einen Elektromagneten. Dieser zieht einen Anker an und gibt damit eine kleine Signalscheibe frei, die nach unten klappt. Der Telefonist in der Vermittlung fragt den Teilnehmer, welche Ver-

bindung gewünscht wird, und führt eine Verbindungsschnur in die entsprechenden Klinken ein. Nach Beendigung des Gesprächs wird die Verbindungsschnur wieder entfernt. Statt der Klappen werden heute meistens Signallämpchen benutzt. Sie leuchten bereits auf, sobald der Teilnehmer seinen Handapparat abhebt.

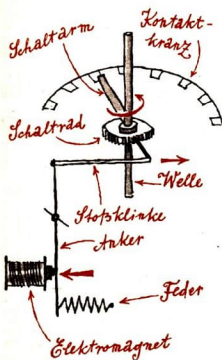
Klappen beziehungsweise Signallampen und Klinken sind in schrankähnlichen Gestellen untergebracht. Ein Klappenschrank bietet nur einer begrenzten Zahl von Teilnehmeranschlüssen – 100 oder 200 – Platz. Wächst die Teilnehmerzahl, müssen entsprechend viele Klappenschränke nebeneinander gestellt werden. Das Herstellen von Verbindungen wird dadurch erschwert; denn jetzt müssen Verbindungsschnüre von Schrank zu Schrank gestöpselt werden, oder es sind besondere Verbindungsleitungen zwischen den Schränken zu verlegen.

Zwar ließen sich diese Schwierigkeiten überwinden, aber man merkte doch bald, daß die „Handvermittlung“ auf die Dauer nicht genügen konnte. In den verkehrstarken Zeiten waren Fehlverbindungen und Verzögerungen unvermeidlich. Die Fernsprechteilnehmer wurden verärgert, das Vermittlungspersonal nicht weniger. Selbst als die schnurrbärtigen „Telefonbeamten“ durch „Telefonfräulein“ ersetzt worden waren – eine für die Zeit um die Jahrhundertwende geradezu „revolutionäre Neuerung“ –, ging es auf dem Draht zwischen Teilnehmer und Amt nicht immer höflich zu.

Es mußte ein Vermittlungsverfahren gefunden werden, das auf Bedienungspersonal und Klappenschrank verzichtet und es ermöglicht, daß jeder Fernsprechteilnehmer seinen Partner selbst wählen und erreichen kann. Es zählt zu den großen Leistungen der Elektro- und Nachrichtentechnik, daß der „Wahlbetrieb“ in den meisten Fernsprechnetzen eingeführt wurde.

Beim Wahlbetrieb übermittelt der Fernsprechteilnehmer der Zentrale die Rufnummer des gewünschten Partners nicht mündlich, sondern in Form von Stromstößen, von Impulsen. Einer 3 entsprechen drei Stromstöße, einer 5 entsprechen fünf; bei mehrstelligen Zahlen sendet man mehrere Impulsgruppen, die durch kurze Pausen getrennt sind, bei 543 beispielsweise erst 5, dann 4 und dann 3 Impulse. Zum Senden der Impulse wird der „Nummernschalter“ benutzt. Wenn wir den Finger in ein Loch seiner „Fingerscheibe“ stecken und die Scheibe bis zum Anschlag drehen, wird eine Feder gespannt. Sie zieht die Fingerscheibe in ihre Ausgangsstellung zurück, sobald wir sie freigeben. Dabei tritt ein Zahnradtrieb in Tätigkeit. Er setzt eine „Stromstoßscheibe“ in Bewegung, die der gewählten Ziffer entsprechend mehrmals umläuft und bei jedem Umlauf einen Kontakt unterbricht. Es entstehen Stromimpulse, die über die Leitung die Zentrale erreichen. Wird eine mehrstellige Zahl gewählt, entstehen durch das erneute Drehen der Fingerscheibe zwangsläufig Pausen zwischen den Impulsgruppen.



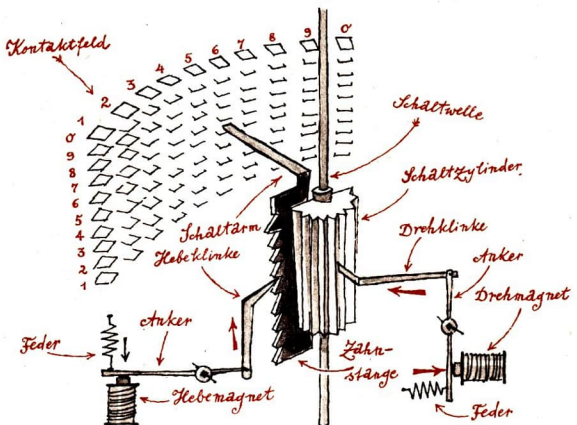


Die zur Zentrale gelangenden Stromimpulse sind das Steuersignal, das selbsttätig die gewünschte Verbindung herstellt. Das wichtigste Hilfsmittel in der Kette verschiedener Bauelemente, die am Zustandekommen einer Verbindung beteiligt sind, stellen die „Wähler“ dar. Wir wollen ihre Wirkungsweise zunächst am Beispiel eines einfachen „Drehwählers“ kennenlernen.

Vor einem Elektromagneten ist ein beweglicher, federnder Anker angebracht, der mit einer Nase in ein Schaltträd eingreift. Sobald ein Stromstoß durch die Magnetspule fließt, wird der Kern für einen Augenblick angezogen. Dabei dreht er das Rad um einen Zahn weiter. Mit dem Zahnrad ist ein Schaltarm verbunden, dessen Ende über eine Reihe von Kontaktplättchen gleitet, 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 neun Impulsen läuft der Arm auf den Kontakt 9. Durch eine entsprechende Zahl von Impulsen können wir also zehn Stromkreise wahlweise einschalten.

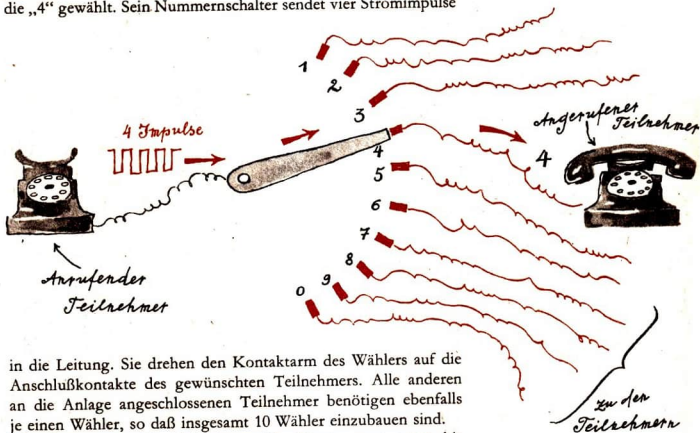
In Wirklichkeit sind stets mehrere Kontaktarme übereinander angebracht, die gleichzeitig betätigt werden und über entsprechende Kontaktreihen gleiten. Auch ist dafür gesorgt, daß der Wähler von allein in die Ausgangsstellung zurückkehrt, wenn der gewählte Stromkreis wieder ausgeschaltet wird. Eine Weiterentwicklung des Drehwählers ist der „Motorwähler“, der sich in der Fernsprechtechnik immer mehr durchsetzt.

Älter als der Drehwähler ist der ebenfalls weitverbreitete „Heb-drehwähler“. Er kann zwei verschiedene Bewegungen ausführen und wurde nicht durch einen „Mann vom Bau“, sondern von



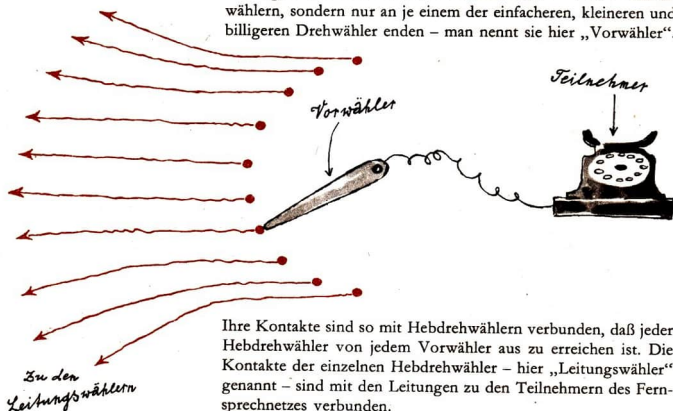
dem Leichenbestatter Almon B. Strowger in Kansas City erfunden. Im Hebdrehwähler sind zehn Zehnerreihen von Kontakten übereinander angebracht. Jeden dieser Kontakte kann der Schaltarm erreichen. Soll der Stromkreis des Kontaktes 42 eingeschaltet werden, wirken die 4 Stromstöße der ersten Impulsgruppe auf den „Hebmagneten“. Sein Anker faßt die Zahnstange, an der der Schaltarm befestigt ist, und hebt sie in vier Einzelschritten bis zur Kontaktreihe 4. In der Pause bis zum Eintreffen der nächsten Impulsgruppe schaltet ein Relais den Hebmagneten ab und den „Drehmagneten“ ein. Die folgenden Impulse drehen den Schaltarm in gleicher Weise wie beim Drehwähler. Mit dem Kontaktfeld eines Hebdrehwählers lassen sich demnach insgesamt 100 Stromkreise wahlweise schalten. Wird ein geschlossener Stromkreis nicht mehr gebraucht, kehrt der Schaltarm von allein in seine Ausgangsstellung zurück.

Die einfachste Selbstwählanlage, an die nur 10 Teilnehmer angeschlossen sind, zeigt die Skizze. Der anrufende Teilnehmer hat die „4“ gewählt. Sein Nummernschalter sendet vier Stromimpulse



in die Leitung. Sie drehen den Kontaktarm des Wählers auf die Anschlußkontakte des gewünschten Teilnehmers. Alle anderen an die Anlage angeschlossenen Teilnehmer benötigen ebenfalls je einen Wähler, so daß insgesamt 10 Wähler einzubauen sind. Vergrößert sich die Teilnehmerzahl, könnte man zwar bis 100 Teilnehmer an einen Hebdrehwähler anschließen, aber das würde bedeuten, daß wir für die Anlage 100 Hebdrehwähler benötigten – je einen pro Teilnehmer. Das wäre sehr kostspielig, denn Hebdrehwähler sind kompliziert und entsprechend teuer. Das fällt besonders deswegen ins Gewicht, weil die Wähler während der meisten Zeit untätig wären. Es wird nicht fortwährend telefoniert; selten sind mehr als 6 bis 10 Hebdrehwähler von 100 gleichzeitig in Betrieb.

Mit diesen 6 bis 10 Hebdrehwählern kann man tatsächlich auskommen, wenn man sich eines Kunstgriffes bedient. Man läßt die Leitungen von den einzelnen Teilnehmern nicht an Hebdrehwählern, sondern nur an je einem der einfacheren, kleineren und billigeren Drehwähler enden – man nennt sie hier „Vorwähler“.



Ihre Kontakte sind so mit Hebdrehwählern verbunden, daß jeder Hebdrehwähler von jedem Vorwähler aus zu erreichen ist. Die Kontakte der einzelnen Hebdrehwähler – hier „Leitungswähler“ genannt – sind mit den Leitungen zu den Teilnehmern des Fernsprechnetzes verbunden.

Sobald ein Teilnehmer seinen Handapparat vom Gabelumschalter nimmt, tritt „sein“ Vorwähler in Tätigkeit. Der Schaltarm dreht sich von allein, das heißt ohne Stromimpulse vom Teilnehmer, auf die einzelnen Kontakte und prüft, ob der mit dem jeweiligen Kontakt verbundene Leitungswähler „frei“ ist oder ob über ihn bereits zwischen anderen Teilnehmern ein Gespräch geführt wird. Sobald der Kontaktarm einen freien Hebdrehwähler gefunden hat, bleibt er stehen. Damit ist der anrufende Teilnehmer über seinen Vorwähler mit dem freien Hebdrehwähler verbunden. Dieses Aufsuchen eines freien Verbindungsweges geht so schnell, daß es erledigt ist, noch bevor die Fingerscheibe erstmalig abläuft. Der Teilnehmer wählt nun die Nummer des gewünschten Partners, und der Hebdrehwähler stellt die Verbindung her. Geheimnisvoll scheint bei diesem Vorgang zu sein, daß der Vorwähler „merkt“, wenn er mit einem freien Leitungswähler verbunden ist. Aber auch daran ist gar nichts Rätselhaftes. Ein freier Wähler steht in Ruhestellung, ein besetzter dagegen nicht. Diesen Unterschied nutzt man aus, um den Kontaktarm des Vorwählers anzuhalten oder weiterlaufen zu lassen.

Bei einem Fernsprechnetzt mit mehr als 100 Teilnehmern wird das Verfahren fortgesetzt, indem man zwischen Vorwähler und Leitungswähler „Gruppenwähler“ einfügt. Nehmen wir ein „1000er-Netz“ an, in dem ein Teilnehmer den Teilnehmer mit der Rufnummer 765 sprechen möchte. Sobald der Hörer abge-

hoben wird, läuft der Vorwähler des Anrufers über die Kontakte und sucht einen freien Gruppenwähler. Das ist ein Hebdrehwähler, der die Verbindung zur Hundertergruppe des gewünschten Teilnehmers herstellt. Wird die erste Ziffer gewählt, klettert der Schaltarm des Gruppenwählers in die siebente Höhenstufe. Mit den Kontakten dieser Höhenstufe sind die Leitungswähler aller Teilnehmer verbunden, deren Rufnummern mit 7 beginnen. Der Kontaktarm schwenkt nun *selbsttätig* ein und dreht sich, bis er auf einen freien Leitungswähler stößt. Das geschieht in der kurzen Zeitspanne, in der beim Anrufer die Nummernscheibe nach dem Wählen der 7 erneut gedreht wird. Der Teilnehmer wählt nacheinander die 6 und die 5, und der Leitungswähler hebt und dreht seinen Schaltarm um 6 beziehungsweise 5 Schritte. Damit ist die Verbindung hergestellt. Bei noch größeren Netzen werden weitere Gruppenwähler zwischengeschaltet.

Neben der eigentlichen Gesprächsvermittlung laufen noch andere Vorgänge ab, die wir nur streifen können. In jeder Vermittlung für Wahlbetrieb gibt es eine „Ruf- und Signalmaschine“. Sie erzeugt die akustischen Zeichen, die jeder kennt, der das Telefon benutzt. Bereits beim Abheben des Hörers vernehmen wir ein Signal, häufig den Morsebuchstaben a. Es zeigt an, daß die Verbindung zum Amt hergestellt ist, und fordert zum Wählen auf. Ist der gewünschte Teilnehmer frei und wird er gerufen, erkennen wir das an einem anderen akustischen Zeichen. Findet sich kein freier Leitungswähler oder telefoniert der angerufene Teilnehmer gerade, wird uns das durch „Besetztzeichen“ mitgeteilt. Das Durchschalten und Umschalten dieser Signale vollzieht sich ebenfalls völlig automatisch.

Gesprächszähler registrieren selbsttätig jedes Gespräch. Sie dürfen aber nicht ansprechen, wenn eine Verbindung nicht zustande kommt. Auch dieses Problem wurde gelöst, ebenso wie das der Verhütung von „Einbrüchen“ in ein bereits zwischen anderen Teilnehmern laufendes Gespräch.

In langen Reihen ziehen sich in einem Wähleramt die Gestelle hin. Tausende von Wählern, Relais und anderen Bauelementen sind in ihnen untergebracht, ein geradezu unvorstellbares Gewirr von farbigen Drähten und dicken „Kabelbäumen“ verbindet die Bauteile und die Gestelle miteinander. Und dieses „wohlgeordnete Chaos“ scheint zu leben: Hier surrt und rattert es, an anderen Stellen leuchten und verlöschen verschiedenfarbige Lampen, klicken Kontakte. Viele Menschen werden vom Geschehen in einem Wählersaal mehr beeindruckt als von einem hoch am Himmel dahinziehenden Verkehrsflugzeug.

Ein Gedanke aber drängt sich wohl jedem Besucher eines Wähleramtes auf: Wie ist es möglich, daß sich jemand in diesem Gewirr zurechtfindet und beispielsweise unter Tausenden Lötstellen gerade die ausfindig macht, die nicht mehr einwandfrei ist? Die Fernmeldetechniker bringen dieses Kunststück fertig. Sie kennen





ihre Anlagen bis zur letzten Lötfläche und merken schon an den Symptomen eines Fehlers oder eines technischen Versagens, wo die Ursache zu suchen ist. Sie werden von Meß- und Prüfeinrichtungen unterstützt, die die Fehlersuche erleichtern und in ihren neuesten Ausführungen sogar selbsttätig Fehlerquellen einkreisen oder lokalisieren können.

Solche Fehlerquellen gibt es in einem Fernsprechart in größerer Zahl als in den meisten anderen technischen Anlagen. Zehntausende Lötstellen, Zehntausende Kontakte und Kontaktzungen an Wählern und Relais, Tausende von Federn, die die Anker von Elektromagneten zurückziehen – alles das muß reibungslos, sicher und schnell zusammenarbeiten, wenn die Vermittlung funktionieren soll. Ein Staubkörnchen zwischen Kontaktzungen, ein Tröpfchen Öl an der falschen Stelle, ein nicht genau laufender Kontaktarm kann zahlreiche Fernsprecher außer Betrieb setzen.

Eine wichtige Tendenz in der weiteren Entwicklung der Fernsprechtechnik ist es daher, die Zahl der Fehlerquellen möglichst einzuschränken. So untersucht man seit einigen Jahren, ob sich die Lötverbindungen nicht durch „Würgeverbindungen“ ersetzen lassen. Bei diesen wird das Ende eines Verbindungsdrahtes mit einem Spezialwerkzeug – es ähnelt einer elektrischen Handbohrmaschine – mehrmals ganz straff um die Anschlußfahne des Bauelements gewunden. Um die Vor- und Nachteile dieser Methode, durch die große Mengen Lötzinn eingespart werden, zu erproben, hat man im Ausland 411 000 Würgeverbindungen in fünf Vermittlungen zwei Jahre lang systematisch beobachtet und geprüft. Es zeigte sich, daß viel weniger Kontaktfehler auftraten als bei gelöteten Verbindungen.

Die Störanfälligkeit der Relais- und Wählerkontakte ist ebenfalls ein Sorgenkind der Fernmeldetechniker. Sehr gute Resultate hat man durch den Einsatz von „Schutzgaskontakten“ erzielt, die in einem hermetisch abgeschlossenen Röhrchen sitzen (s. S. 32). Um die vielen bewegten Teile an Wählern und Relais zu vermindern und zu vereinfachen, wurden in Gemeinschaftsarbeit mit anderen sozialistischen Ländern „Koordinatenschalter“ entwickelt, die nach einem anderen Prinzip als Hebdrehwähler arbeiten. Ämter, die mit Koordinatenschaltern ausgestattet wurden, haben ihre Überlegenheit bereits erwiesen.

Am besten wäre es, wenn man auf mechanische Schaltkontakte überhaupt verzichten könnte. Die Halbleitertechnik und die Elektronik haben die Verwirklichung dieses Wunsches nähergebracht. Die Zukunft gehört Wählanlagen, in denen es keine mechanisch gesteuerten Kontakte mehr gibt. Halbleiterbauelemente wie Dioden und Transistoren werden die Aufgaben von Schaltern und Relais übernehmen, in Wählerröhren oder anderen elektronischen Bauelementen werden Elektronen ohne Zuhilfenahme von Kontaktfedern und Schaltarmen die Teilnehmer miteinander verbinden. Auch für diese Vermittlungstechnik der Zu-

kunft gibt es bereits zahlreiche Versuchsanlagen. Sie arbeiten teilweise so schnell, daß man die relativ langsam ablaufenden Impulse des Nummernschalters durch andere Steuerbefehle ersetzt, beispielsweise durch eine Kombination aus verschiedenen elektrisch übertragenen Tönen, die im Fernsprecher erzeugt und zum Amt weitergeleitet werden. An die Stelle des Nummernschalters treten Drucktasten, die den Ziffern entsprechen.

Auch in anderer Hinsicht wird sich der Fernsprechapparat verändern. So geht man schon heute daran, in Apparate, die für Werkhallen oder Bahnhöfe bestimmt sind, zusätzlich kleine Verstärker einzubauen, damit die Sprache trotz des Lärms der Umgebung gut zu verstehen ist. Für ruhige Räume dagegen wird man weit mehr als heute „Freisprechapparate“ benutzen. Sie sind mit einem Lautsprecher und einem so empfindlichen Mikrophon ausgerüstet, daß man auf die Benutzung des Handapparates verzichten und von jedem Punkt des Zimmers aus hören und sprechen kann. Selbst das Kohlemikrophon wird Mikrophontypen mit besserer Qualität der Wiedergabe weichen.

120 auf einen Streich

Fachleute schätzen, daß die Zahl der Fernsprechanschlüsse auf der Welt in den nächsten 20 Jahren auf 450 Millionen wachsen wird. Das sind mehr als dreimal soviel Fernsprechteilnehmer wie heute. Ein hoher Prozentsatz der Gespräche, die sie führen, werden Ferngespräche sein.

Seit es überhaupt ein Telefon gibt, versuchte man, immer größere Entfernungen zu überbrücken. Schon mit den ersten Bellschen Telefonen, die in Deutschland auftauchten, wurden solche Versuche auf Telegrafieleitungen durchgeführt. Sobald sich erwiesen hatte, daß eine telefonische Verständigung auf größere Distanz möglich war, wurden spezielle Telefonleitungen verlegt. Sie liefen über Masten und Gestänge, ähnlich denen für Telegrafienlinien.

Doch je mehr die Entfernungen wuchsen, desto schwieriger wurde es, sich gut zu verständigen. Das lag jedoch nicht ausschließlich am Leitungswiderstand, sondern auch daran, daß es für die Leitungen keinen idealen Isolator gab. Stets floß ein Teil der Sprechströme unterwegs ab und war damit für die Telefonverbindung verloren. Auch diese Verluste wuchsen mit der Leitungslänge; sie vervielfachten sich bei Regenwetter, Schnee, Rauhreif oder Nebel.

Dem Leitungswiderstand suchte man durch Erhöhen des Drahtquerschnitts zu begegnen. Dabei wurde allerdings schnell eine Grenze erreicht; denn Leitungen großen Durchmessers verschlangen gewaltige Kupfermengen und verteuerten dann wegen ihres hohen Gewichts auch die übrigen Anlagenteile wie Masten, Isolatoren usw.



Neben den Widerstands- und Isolationsverlusten gab es noch weitere störende Erscheinungen. Zwei parallele Drähte bilden einen Kondensator, der durch den Sprechstrom dauernd aufgeladen und umgeladen wird. Das wirkt sich so aus, als ob die Sprechströme teilweise durch diesen Kondensator kurzgeschlossen werden. Da die hohen Töne von dieser Erscheinung mehr als die niedrigen betroffen werden, sinkt die Verständlichkeit; die Sprache wird verzerrt.

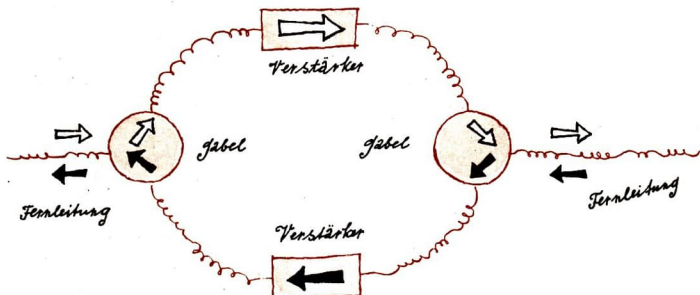
Um Anlagekosten zu sparen, führte man mehrere Fernsprechleitungen über ein Gestänge. Damit machten sich Induktionserscheinungen unangenehm bemerkbar, es kam zum „Übersprechen“. Wer auf einer Leitung telefonierte, konnte nebenbei Gespräche mithören, die gleichzeitig auf den anderen Leitungen geführt wurden. Erst nach langen Mühen gelang es, mit diesen Mängeln fertigzuwerden. Nach und nach verschwanden auch wieder die meisten Freileitungen, die sich in größeren Städten zu einem Drahtgewirr über den Dächern und an den Straßen verdichtet hatten. Sie wurden durch unterirdisch laufende Kabel ersetzt.

Bei großen Entfernungen – 500 km und darüber – war aber auch über Kabel keine Verständigung mehr möglich. Man mußte sich nach einem verstärkenden Bauelement umsehen, wie es der Telegrafie im Relais zur Verfügung stand. Doch das „Telefonrelais“ ließ auf sich warten. Jetzt mußten ja nicht nur, wie beim Telegrafieren, Ströme aus- und eingeschaltet werden, sondern schwache Wechselströme mußten stärkere Wechselströme hervorrufen, wobei weder die Frequenz noch die „Form“ der Ströme verändert werden durfte, wenn die Verständlichkeit nicht leiden sollte.

Man versuchte alles Mögliche; man verband zum Beispiel ein Mikrophon und einen Fernhörer so miteinander, daß die Telefonmembran gleichzeitig Membran des Mikrophons war, und leitete dem Hörer die schwachen Sprechströme zu, um sie am Mikrophon „verstärkt“ abnehmen zu können. Doch alle derartigen Experimente scheiterten. Erst die Erfindung der „Verstärkerröhre“ führte zum gewünschten Erfolg. Da wir sie an anderer Stelle ausführlich kennenlernen werden, können wir uns hier auf die Feststellung beschränken, daß es mit Verstärkerröhren möglich ist, auch schwächste Wechselspannungen und -ströme hunderttausend- und millionenfach zu verstärken. Etwa seit Beginn des ersten Weltkrieges wurden in zunehmender Zahl Verstärker in die Fernleitungen und Kabel eingeschaltet. Sie vervielfachten die Reichweite des Fernsprechers, verteuerten und komplizierten aber gleichzeitig die Anlagen.

Jeder Verstärker arbeitet nur in einer Richtung, vom „Verstärkereingang“ zum „Verstärkerausgang“. Für jede Weitverbindung sind daher immer zwei, vier, acht Verstärker notwendig, die paarweise für ein Gespräch gebraucht werden. Laufen beide





Gesprächsrichtungen über *eine* Doppelleitung, so muß man an den Verstärkern besondere „Gabelschaltungen“ vorsehen, Weichen, die die beiden Gesprächsrichtungen voneinander trennen und „hinter“ den Verstärkern wieder vereinen. Diese Gabelschaltungen müssen äußerst sorgfältig berechnet und konstruiert werden; denn gelangen auch nur kleinste Reste von Sprechströmen in den „falschen“ Verstärker, beginnt die ganze Anlage zu heulen und zu pfeifen. Um bei besonders wichtigen Fernverbindungen ganz sicher zu gehen, benutzte und benutzt man bisweilen vier Leitungsdrähte – zwei für jede Sprechrichtung. Dann können sich die Verstärker nicht gegenseitig beeinflussen.

Für ein Ferngespräch mußten also unter Umständen viele Verstärker und andere Geräte in Betrieb sein. Sie hatten nicht unter Arbeitsmangel zu leiden, und bald konnten sie die rasch zunehmende Zahl der Ferngespräche nicht mehr bewältigen. Damit wurde eine Frage immer brennender, die die Fernmeldetechniker schon seit langem bewegte: Kann man auf einer Fernsprechleitung gleichzeitig mehrere Gespräche führen?

Um die menschliche Stimme gut zu übertragen, braucht man Wechselströme mit Frequenzen zwischen 300 Hz und 3400 Hz. Sie müssen von der Fernleitung „durchgelassen“ werden. Auf vielen Leitungen und Kabeln konnte man aber auch Wechselströme noch höherer Frequenz, bis zu einigen Hunderttausend Hertz, übertragen. Wird auf einer solchen Leitung nur ein Ferngespräch geführt, so bleibt der größte Teil des übertragbaren „Frequenzbandes“ ungenutzt. Es ist fast, als werde in einem breiten und tiefen Kanal nur eine schmale Rinne für Paddelboote freigegeben.

Die Energiefachleute hatten übrigens ein ähnliches Problem zu lösen: Sie brauchten ein sicher funktionierendes Nachrichtennetz, das Kraftwerke und Umspannstationen miteinander verband und nicht nur die menschliche Stimme, sondern auch Meßwerte und Steuerimpulse übertragen konnte. Es ging nicht an, etwa zusätz-

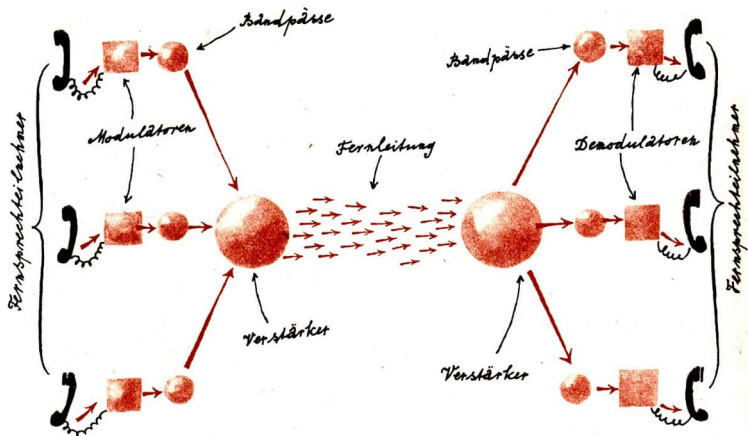
liche Fernsprechleitungen auf den Hochspannungsmasten zu verlegen – Störungen und Induktionswirkungen hätten jede Verständigung unmöglich gemacht. Man half sich, indem man die Hochspannungsleitungen selbst zur Nachrichtenübermittlung heranzog: Die Sprechströme oder Meßwerte werden einem kleinen, auf Langwelle arbeitenden Funksender zugeführt. Dieser Sender wird über entsprechende Zwischenglieder mit der Hochspannungsleitung verbunden. Die Funkwellen breiten sich dann nicht im freien Raum aus, sondern laufen an der Hochspannungsleitung entlang. Selbst bei sehr kleiner Sendeleistung ist die Reichweite groß.

An der Gegenstelle wird mit der Hochspannungsleitung ein Empfänger verbunden, der auf die betreffende Wellenlänge abgestimmt ist. An ihn wird der Fernhörer angeschlossen. Besitzt jede Stelle einen Sender und einen Empfänger, ist eine Unterhaltung wie durch das Telefon möglich.

Das Verfahren läßt sich weiter ausbauen: Schließen wir zwei Sender an die Leitung an, deren jeder eine andere Wellenlänge, eine andere „Trägerfrequenz“, benutzt, und stellen wir an der Gegenstelle zwei Empfänger auf, die auf diese Frequenzen abgestimmt sind, so können beide Sender und Empfänger gleichzeitig benutzt werden, ohne daß es zu einem Durcheinander käme. Das ist die Grundlage der „Trägerfrequenztechnik“, mit deren Hilfe auch über Fernsprechleitungen gleichzeitig zahlreiche Gespräche geführt werden können.

Bei einem Ferngespräch über eine „geträgerte“ Leitung laufen die Sprechströme in gewohnter Weise vom Teilnehmer zum Fernamt und vom Fernamt zum Teilnehmer. Zwischen den Ämtern jedoch, auf der Fernleitung, sind die ursprünglichen Sprechströme nicht mehr anzutreffen. Im Amt wird das Gespräch – wir wollen jetzt nur die „Senderichtung“ betrachten – in den Hochfrequenzbereich umgesetzt. Das geschieht mit Hilfe von „Trägerfrequenzgeneratoren“ und „Modulatoren“. Die Trägerfrequenzgeneratoren sind die kleinen Sender, die wir eben kennenlernten. Sie erzeugen Hochfrequenzschwingungen, die einen bestimmten Frequenzabstand aufweisen und einhalten, zum Beispiel Schwingungen von 12, 16, 20, 24 ... 252 kHz. Jeder dieser Trägerfrequenzen wird in einem Modulator ein Gespräch aufgeprägt. Sämtliche so „modulierten“ Frequenzen werden in *einem* Verstärker verstärkt, ehe sie auf die Übertragungsstrecke gegeben werden. Vorher durchlaufen sie noch elektrische Filter, die „Bandpässe“, die dafür sorgen, daß tatsächlich nur dem jeweiligen Frequenzband der Weg zur Fernleitung freigegeben wird.

Auch auf der Fernleitung finden wir in bestimmten Abständen wieder Verstärker, aber immer nur einen für sämtliche Kanäle. Am Leitungsende werden die Kanäle nochmals einem Verstärker zugeleitet und anschließend durch Filter wieder sauber voneinander getrennt.



Die einzelnen Frequenzkanäle werden „Demodulatoren“ zugeleitet. Dort erfolgt die Rückübersetzung der Hochfrequenzschwingungen in den Sprachfrequenzbereich. „Hinter“ den Demodulatoren haben wir es also mit Sprechströmen zu tun, die den Fernsprechteilnehmern in gewohnter Weise zugeleitet werden. Für die Gegenrichtung sind die gleichen Apparaturen – nur mit vertauschten Aufstellungsorten – noch einmal vorgesehen.

Der technische Aufwand für ein Trägerfrequenzsystem ist nicht gerade bescheiden. Er ist aber trotzdem noch geringer, als wenn man die Gespräche einzeln über eine entsprechende Zahl von Doppelleitungen und Verstärkern weiterleiten würde. Trägerfrequenzeinrichtungen, bei denen 60 oder 120 Gespräche gleichzeitig geführt werden können, sind heute allgemein üblich. Sie werden in unserer Republik eingesetzt, produziert und in viele Länder exportiert. Ein einheitliches Trägerfrequenzsystem für alle sozialistischen Länder wird zur Zeit von ausländischen und deutschen Spezialisten entwickelt.

Noch weit größer ist die Leistungsfähigkeit der „Koaxialtuben“. Das sind Spezialkabel, die aus einem zentralen „Innenleiter“ und einem dünnen Rohr als „Außenleiter“ bestehen. Bis zu 2000 Ferngespräche können gleichzeitig über eine „Tube“ laufen, und da man mehrere Tuben zu einem gemeinsamen Kabel vereinen kann, nimmt die Gesprächszahl entsprechend weiter zu.

Die Verstärker rücken um so dichter zusammen, je mehr Gespräche gleichzeitig übertragen werden sollen. Bereits bei der



Übertragung von 120 Kanälen beträgt der Verstärkerabstand nur noch 9 km, und bei noch größerer Kanalzahl folgen die Verstärker einander in noch geringeren Abständen.

Die Verstärker werden in kleinen Häuschen untergebracht oder als unbemannte Verstärker in Stahlbehältern in den Boden versenkt. Die Betriebsenergie wird den Anlagen über das Kabel zugeführt. Fernmeßeinrichtungen überwachen ständig das Arbeiten der Verstärker und signalisieren jede Unregelmäßigkeit.

Auch weite Wasserstrecken konnten erst durch Telefonkabel überbrückt werden, als die Trägerfrequenztechnik eingeführt worden war und es gelang, Unterwasserverstärker unmittelbar in die Kabel einzuspleißen. So enthält das Seekabel zwischen Schottland und Neufundland bei 3600 km Länge 51 Verstärker, die von den Kabelenden aus mit Strom versorgt werden. 36 Gespräche lassen sich gleichzeitig über dieses Kabel führen.

Die Trägerfrequenztechnik hat auch die Voraussetzungen für die Lösung eines anderen Problems geschaffen. Es ist der Selbstwählfernverkehr, dessen Teilnehmer ihre Gesprächspartner nicht nur innerhalb des eigenen Ortes, sondern im ganzen Lande und in der Perspektive auch über die Landesgrenzen hinweg ohne Wartezeiten wählen können.

Noch vor wenigen Jahren wurden in allen öffentlichen Fernsprechnetzen der Welt Ferngespräche nicht vom Teilnehmer, sondern von den Angestellten der Fernämter vermittelt. Der Teilnehmer meldete lediglich seinen Gesprächswunsch an und mußte warten, bis die Verbindung hergestellt war. In den Hauptgeschäftsstunden gab es an wichtigen Fernverbindungen ein regelrechtes „Schlangestehen“. Obwohl die Angestellten der Fernämter alles taten, den Verkehr so schnell wie möglich abzuwickeln, hatten sie sich immer wieder ungerechtfertigte Vorwürfe anzuhören. Es kam hinzu, daß Gespräche nach kleineren, weit entfernten Orten oft über zahlreiche Zwischenstationen liefen, so daß Mißverständnisse und Rückfragen unausbleiblich waren.

In vielen Ländern führt man daher gegenwärtig schrittweise den Selbstwählfernverkehr ein. Seine wichtigste Voraussetzung ist, daß eine ausreichende Menge von Gesprächen gleichzeitig geführt werden kann, das heißt, daß genügend viele Gesprächskanäle zur Verfügung stehen; denn sonst wären Wartezeiten ebenfalls unvermeidlich. Diese Kanäle stellt die moderne Trägerfrequenztechnik zur Verfügung.

Der Teilnehmer, der eine Fernverbindung im Selbstwählbetrieb herstellen will, sucht zunächst die Rufnummer seines Partners auf. Bevor er diese wählt, muß er die Kennziffer des Ortsnetzes wählen, an das der Partner angeschlossen ist. Wohnt er beispielsweise in Leipzig und will er jemanden in Berlin sprechen, wählt er die Kennziffer 031. Hierbei laufen ähnliche Vorgänge ab wie beim Wählverkehr innerhalb eines Ortes. Die 0 verbindet den Teilnehmer mit einem „Ferngruppenwähler“. Die 3 stellt die



Verbindung zur Fernstrecke Leipzig-Berlin her, und durch Wählen der 1 endlich wird automatisch ein freier Gesprächskanal gesucht. Damit ist der Teilnehmer „in Berlin“ und kann durch Wählen der Berliner Rufnummer seinen Partner erreichen.

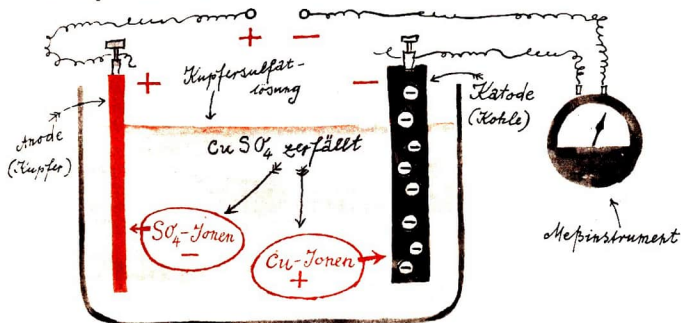
Im Laufe der nächsten Jahre wird man mit Hilfe von drei-, höchstens vierstelligen Kennziffern von jedem Ort der DDR aus jeden anderen erreichen können. Bis dahin ist allerdings noch eine gewaltige Arbeit zu leisten: In den Bezirksstädten werden „Hauptämter“ eingerichtet, die für die automatische Vermittlung des Verkehrs im Bezirk und von Bezirk zu Bezirk verantwortlich sind. Die Bezirke wieder werden häufig in mehrere „Knotenämter“ aufgeteilt, die in größeren Städten liegen können. Darüber hinaus sind neue Trägerfrequenzstrecken einzurichten, und es müssen neue Ämter für den Auslandsverkehr aufgebaut werden. Auch das gesamte System der Gebührenberechnung und Gesprächszählung muß auf die neuen Bedingungen umgestellt werden.

Wer aufmerksam die Presse verfolgt, liest in oft unscheinbaren Notizen, wie diese Arbeit systematisch und unter Berücksichtigung neuester technischer Erkenntnisse vorangetrieben wird. Dabei werden in Zukunft auch unsere heutigen Wählanlagen von elektronischen Geräten abgelöst werden.

ELEKTROCHEMIE – IMMER WICHTIGER

Unsichtbare Wanderer

Ein ganz einfacher Versuch zeigt, daß enge Beziehungen zwischen Elektrizitätslehre und Chemie bestehen: Wir verbinden einen Kohlestab mit dem negativen, ein Stück Kupferblech mit dem positiven Pol einer Gleichspannungsquelle. Anschließend tauchen wir Kupfer und Kohle, die sich nicht berühren dürfen, in ein



Gefäß mit Kupfersulfatlösung (CuSO_4). Der Zeiger des Instruments schlägt aus, es fließt also Strom. Daran ist zunächst nichts Besonderes; denn viele Flüssigkeiten leiten den elektrischen Strom. Um so auffälliger aber ist, daß sich der Kohlestab allmählich mit einer rotbraunen Kupferschicht überzieht. Sie wird um so stärker, je länger der Versuch fortgesetzt wird. Gleichzeitig wird das Kupferblech dünner.

Es scheint, als habe der elektrische Strom Kupferteilchen vom positiven Blech, der „Anode“, abgelöst und zur negativen Kohle, der „Katode“, transportiert. Doch ganz so einfach verläuft der Vorgang nicht. Es handelt sich nicht um einen unmittelbaren Transport, sondern um einen Austausch, an dem die Flüssigkeit, der „Elektrolyt“, entscheidend beteiligt ist. Um das zu verstehen, müssen wir eine Theorie des Schweden Svante Arrhenius (1859–1927) streifen, deren Richtigkeit durch die Praxis tausendfach bestätigt wurde.

In Säuren, Basen, Salzlösungen und Salzschnmelzen ist stets ein Teil der Moleküle in elektrisch geladene Atome oder Atomgruppen zerfallen, „dissoziiert“. Metallatome und Wasserstoff zeigen dabei positive, Sauerstoff und zahlreiche Atomgruppen negative elektrische Ladung.

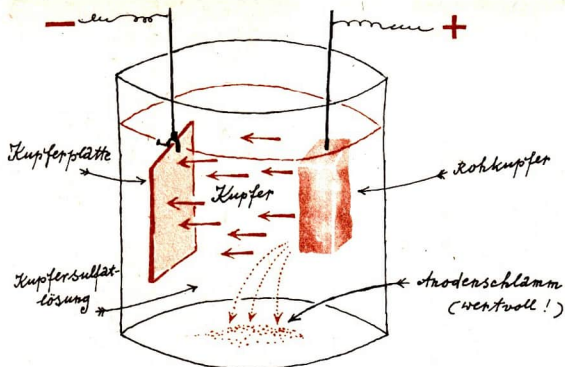
In der Kupfersulfatlösung gibt es zahlreiche positive Kupferatome und zahlreiche negative Atomgruppen „ SO_4 “. Wird die Spannungsquelle eingeschaltet, geraten die negativen und positiven Teilchen unter den Einfluß elektrischer Anziehungskräfte und beginnen zu wandern: die positiven Kupferteilchen zur negativen Katode, die negativen SO_4 -Gruppen zur positiven Anode. Man nennt daher elektrisch geladene Atome und Atomgruppen „Ionen“, das heißt Wanderer.

Die positiven Kupferionen lagern sich an der Katode ab, nehmen dort Elektronen auf und werden so wieder elektrisch neutral. Die negativen SO_4 -Ionen bilden an der Anode mit positiven Kupferionen aus dem Blech neues Kupfersulfat. Ebensoviele Kupfer, wie aus der Flüssigkeit „verschwindet“, tritt in sie ein, und weil ständig Moleküle dissoziieren, läuft der Vorgang weiter, bis das Anodenblech aufgelöst ist.

Der beschriebene Versuch wird nicht nur in Unterrichtskabinetten durchgeführt. Der größte Teil des in der Elektrotechnik benötigten sehr reinen Kupfers wird auf diese Weise gewonnen. Rohkupfer besitzt einen Kupfergehalt von 96% bis 98%. Der Rest sind andere chemische Grundstoffe, die die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers erheblich herabsetzen würden.

Um das Kupfer zu reinigen, hängt man eine Reihe von Kupferblöcken in einen mit Kupfersulfatlösung gefüllten Trog. Diesen Rohkupferblöcken stehen dünne Bleche aus sehr reinem Kupfer gegenüber. Die Blöcke werden mit dem positiven, die Bleche mit dem negativen Pol einer leistungsfähigen Gleichspannungsquelle verbunden. Die Kupferblöcke lösen sich auf, die Stärke der Rein-





kupferbleche nimmt zu. Die Verunreinigungen sinken zu Boden. Dieser „Anodenschlamm“ ist nicht etwa wertlos; aus ihm können andere chemische Grundstoffe, häufig sogar die Edelmetalle Silber, Gold und Platin, gewonnen werden. Das an der Katode abgeschiedene „Elektrolytkupfer“ besitzt einen Reinheitsgrad bis zu 99,97%.

Der Kohlestab des Versuchs wurde verkupfert. Er weist damit auf eine weitere wichtige Anwendungsmöglichkeit der Elektrochemie hin. Man kann leitende Gegenstände, im allgemeinen handelt es sich um solche aus Metall, auf elektrochemischem Wege mit einer Schicht eines anderen Metalls überziehen. Stahl und Eisen lassen sich so beispielsweise durch eine Nickel- oder Chromschicht vor dem Verrosten schützen.

Bei der elektrochemischen Oberflächenbehandlung wird der zu bearbeitende Gegenstand als Katode in ein elektrolytisches Bad gehängt. Es enthält eine Salzlösung des Metalls, das den Schutzüberzug bilden soll. Als Anode dient eine Platte aus diesem Metall. Will man vernickeln, arbeitet man mit einem Nickelsalz und einer Nickelanode; zum Versilbern wählt man eine Silberanode und ein Silbersalz. Kleine Massenteile (Schrauben, Muttern, Montagekleinteile) dreht man während der elektrochemischen Behandlung in einer durchlöchernten Trommel oder läßt das Elektrolysegefäß um eine schräge Achse rotieren. Die Teile bleiben so ständig in Bewegung und erhalten einen gleichmäßigen Überzug.

Zu den wichtigsten Grundchemikalien der Volkswirtschaft zählt Natronlauge. Sie ist unentbehrlich für die Herstellung von Kunstseide und Zellstoff, in der Farben- und Seifenindustrie und für viele andere chemische Betriebe. In unserer Republik werden große Mengen Natronlauge verarbeitet. Elektrochemisch können wir Natronlauge aus zwei Stoffen gewinnen, die uns und vielen

anderen Ländern in beliebiger Menge zur Verfügung stehen: aus Wasser und aus Kochsalz.

Wird Gleichstrom durch eine Kochsalzlösung (NaCl) geschickt, so wandern die negativen Chlorionen zur Anode, geben ihre Ladung ab und entweichen als Chlorgas, ein von der chemischen Industrie ebenfalls sehr begehrter Stoff. Die positiven Natriumionen dagegen bewegen sich zur Katode. Sie lagern sich dort aber nicht ab, sondern verbinden sich mit dem Wasser der Kochsalzlösung. Dabei bildet sich Natriumhydroxyd (NaOH), dessen wäßrige Lösung die erstrebte Natronlauge ist. Bei diesem Vorgang wird Wasserstoff freigesetzt, der aufgefangen werden kann und ebenfalls einen wichtigen Rohstoff darstellt.

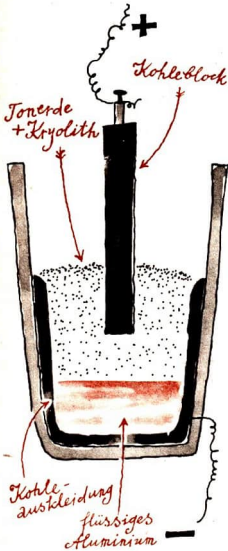
Bei der technischen Durchführung der „Kochsalzelektrolyse“ muß man darauf achten, daß das Chlor nicht mit der entstehenden Natronlauge in Berührung kommt; in diesem Falle käme es nämlich zu einer Rückbildung von Natriumchlorid, das heißt von Kochsalz. Die elektrochemische Industrie kennt mehrere Verfahren, die eine saubere Trennung des Chlors von der Natronlauge gewährleisten.¹

Leichtmetalle wie Aluminium, Magnesium und ihre Legierungen sind aus der modernen Technik nicht wegzudenken. Sie werden ebenfalls durch elektrochemische Verfahren gewonnen, und zwar durch die „Schmelzflußelektrolyse“. Diese Bezeichnung rührt daher, daß die an sich festen Ausgangsstoffe durch Erhitzen zunächst geschmolzen werden.

Sehen wir uns nur die Aluminiumgewinnung an. Große, mit Kohle oder Graphit ausgekleidete Tröge werden mit einem Gemisch aus den Aluminiumverbindungen Tonerde und Kryolith gefüllt. In den Trog werden Kohleblöcke als Elektroden getaucht. Diese Blöcke und die Kohleauskleidung werden an eine Gleichspannungsquelle hoher Leistungsfähigkeit angeschlossen. Die Auskleidung ist Katode, die Kohleblöcke bilden die Anode. Durch den Stromfluß erhitzt sich das Gemisch bis zum Schmelzen. Gleichzeitig setzt der elektrochemische Vorgang ein. Positive Aluminiumionen wandern zur Katode, Sauerstoffionen (Tonerde ist eine Aluminium-Sauerstoff-Verbindung) zu den Kohleblöcken, die allmählich verbrennen. Am Boden des Troges kann das flüssige Aluminium von Zeit zu Zeit abgelassen werden.

Allen elektrochemischen Verfahren ist gemeinsam, daß sie mit Spannungen von wenigen Volt, aber mit sehr großen Stromstärken arbeiten. In Kupferraffinerien und Aluminiumwerken werden Stromstärken von 100 000 A und darüber benötigt. Entsprechend hoch ist auch der Energieverbrauch. Um eine Tonne Aluminium zu erzeugen, sind 20 000 kWh nötig. Ein Haushalt mit elektrischer Beleuchtung, Kühlschrank, Fernsehapparat usw. würde mit dieser Energiemenge 12 bis 14 Jahre reichen.

¹ Siehe: Sigmar Spauszus: Streifzüge durch die anorganische Chemie. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1962, S. 253



Zink, Kohle, Salmiak

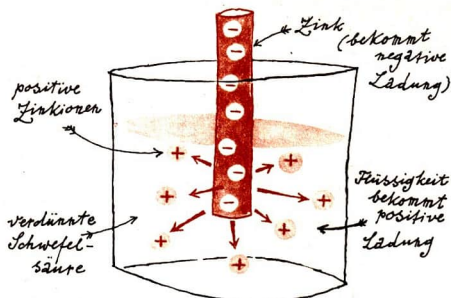
Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts kannte man nur die Reibungselektrizität. Noch nie war es gelungen, einen elektrischen Strom für längere Zeit zum Fließen zu bringen. Das änderte sich, als der italienische Arzt Luigi Galvani (1737–1798) eine, wie er meinte, neue Art von Elektrizität entdeckte. Galvani hatte frisch präparierte Froschschenkel mit Kupferhaken an einem eisernen Geländer aufgehängt und beobachtet, daß die Schenkel jedesmal zuckten, wenn sie mit dem Geländer in Berührung kamen. Begeistert soll Galvani ausgerufen haben: „Frau, ich habe eine große Entdeckung gemacht, ich habe die tierische Elektrizität, ich habe die Ursache der Lebenskraft gefunden!“

Die Begeisterung war verständlich, Galvanis Schlußfolgerung aber falsch, auch wenn er jahrelang nach Beweisen für die Existenz der tierischen Elektrizität suchte. Vor allem Galvanis großer Landsmann Alessandro Volta zeigte, daß es sich bei Galvanis Entdeckung keineswegs um eine „neue“ Elektrizität handelte, sondern lediglich um eine neue Methode, Elektrizität zu gewinnen. Er erkannte auch, daß die Froschschenkel nichts weiter waren als ein „Anzeigeelement“ für elektrische Spannungen.

Solche Spannungen treten immer dann auf, wenn zwei verschiedene Metalle in eine leitende Flüssigkeit tauchen (bei Galvani vertrat das feuchte tierische Gewebe die Flüssigkeit). Sorgt man durch eine leitende Verbindung außerhalb der Flüssigkeit dafür, daß sich die Spannung ausgleichen kann, fließt elektrischer Strom. Bereits zwischen einer leitenden Flüssigkeit und einem Metall kommt es zu einer Ladungstrennung, wie wir sie – sozusagen trocken – bei der Reibungselektrizität kennenlernten. Taucht ein Metall in eine leitende Flüssigkeit, zum Beispiel in eine Salzlösung, so wirken zwei Kräfte einander entgegen: Das Metall unterliegt einem „elektrolytischen Lösungsdruck“. Er treibt positive Metallionen in die Flüssigkeit, die das Metall „einhüllen“. Andererseits hat die Flüssigkeit das Bestreben, Metallionen „auszutreiben“. Dies ist der „osmotische Druck“ des Elektrolyten. Wenn der Lösungsdruck überwiegt, wird wegen der in den Elektrolyten übergetretenen positiven Ionen das Metall gegenüber der Flüssigkeit negativ; überwiegt der osmotische Druck, schlagen sich positive Ionen aus der Flüssigkeit am Metall nieder; dieses wird gegenüber der Flüssigkeit positiv. In jedem Fall stellt sich ein bestimmter Gleichgewichtszustand ein, zwischen Metall und Flüssigkeit entsteht eine Spannung, die von der Art des Metalls und von der gewählten Flüssigkeit abhängt.

Tauchen, und damit sind wir wieder bei Galvani und Volta, zwei verschiedene Metalle, die Elektroden, in eine Flüssigkeit, nimmt jedes Metall „seine“ Spannung gegenüber der Flüssigkeit an. Je nach der Größe dieser Einzelspannungen bleibt eine Spannung zwischen den beiden Metallen übrig. Sie kann Strom durch einen Draht treiben, mit dem wir die Elektroden verbinden.





Auf dieser Grundlage werden seit Anfang des 19. Jahrhunderts „galvanische Elemente“ gebaut. Sie waren die ersten Spannungsquellen, die einen für längere Zeit stetig fließenden Strom abgaben.

Von den vielen, im Laufe der Zeit entstandenen Elementtypen hat heute nur noch das Zink-Kohle-Element größere Bedeutung. Eine Zink- und eine Kohlelektrode stehen sich in Salmiaklösung gegenüber. Das Zink wird negativ, der Kohlestab positiv elektrisch. Die Spannung dieses Elements beträgt etwa 1,5 V. Sie hängt – das gilt für alle chemischen Spannungsquellen – weder von der Größe noch von der Form, sondern nur vom Material der Elektroden (und der gewählten Elektrolytflüssigkeit) ab.

Wird eine höhere Spannung benötigt, muß man mehrere Elemente hintereinanderschalten, wobei stets die positive Elektrode des einen mit der negativen Elektrode des folgenden verbunden wird. Dann addieren sich die einzelnen Spannungen, so daß zwischen den Enden einer Kette aus 10 Zink-Kohle-Elementen eine Spannung von etwa 15 V verfügbar wäre. Um auf die Netzspannung von 220 V zu kommen, müßte man 147 Zink-Kohle-Elemente hintereinanderschalten.

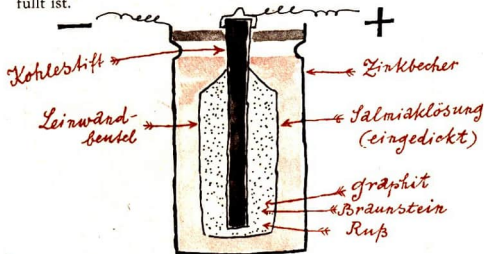
Die Stromstärke, die einem Element zu entnehmen ist, hängt von der Elektrodenfläche ab. Diese kann „künstlich“ vergrößert werden, indem man mehrere Elemente „parallel“ schaltet, das heißt sämtliche positiven und sämtliche negativen Elektroden miteinander verbindet. In diesem Falle kann der „Batterie“ die zweifache, dreifache usw. Stromstärke entnommen werden. Die Spannung erhöht sich dabei nicht, sie entspricht der des Elementes.

Durch den Stromfluß wird der Ladungsunterschied zwischen Zink und Salmiaklösung fortwährend abgebaut. Deshalb treten ständig weitere Zinkionen in die Lösung ein, das Zink löst sich allmählich auf. Der „Materialverbrauch“ ist hoch: Mehr als 1 kg Zink

wären nötig, um 1 kWh zu gewinnen. Für andere Elemente gelten ähnliche Verhältnisse. Daraus folgt, daß elektrochemische Spannungsquellen für die allgemeine Energieversorgung nicht in Frage kommen. Schon bald nach der Erfindung des Generators wendete man sie nur noch unter besonderen Bedingungen an.

Solche Bedingungen liegen vor, wenn elektrische Geräte nur eine geringe Leistung benötigen und aus keiner anderen Spannungsquelle versorgt werden können. Beispiele dafür gibt es in Hülle und Fülle: Taschenlampen, Hörhilfen, Kofferradios, Feld- und Haustelexphonanlagen, „netzunabhängige“ Elektrorasierapparate, zahlreiche Signal- und Nachrichtengeräte. Hierbei werden die relativ billigen Zink-Kohle-Elemente eingesetzt, wenn auch in abgewandelter Ausführung, als sogenannte Trockenelemente. Wirklich „trocken“ sind sie allerdings nicht; ihr Elektrolyt wurde von einer porösen Masse aufgesogen.

Eine Flachbatterie für Taschenlampen enthält drei hintereinandergeschaltete Trockenelemente. Ein Zinkzylinder, die negative Elektrode, bildet gleichzeitig das Gefäß des Elements, ein Kohlestab ist die positive Elektrode. Neben eingedickter Salmiaklösung enthält das Element einen Beutel, der den Kohlestab umgibt und mit einer Mischung aus Braunstein, Ruß und Graphit gefüllt ist.



Der Braunstein soll die „Polarisation“ verhindern. Schon nach kurzem Betrieb würden sich am Kohlestab Wasserstoffbläschen absetzen. Dadurch wäre einmal die Berührungsfläche zwischen Kohle und Elektrolyt vermindert, zum anderen entstünde eine Gegenspannung, die die Spannung des Elements herabsetzte. Braunstein ist eine sauerstoffreiche Verbindung. Ein Teil dieses Sauerstoffs verbindet sich mit dem Wasserstoff zu Wasser und wirkt so der Polarisation entgegen. Wird einem Trockenelement für längere Zeit ein stärkerer Strom entnommen, kann der Braunstein nicht allen Wasserstoff aufnehmen. Es sammelt sich Wasserstoff an, der die Leistung des Elements herabsetzt. Wird die Batterie abgeschaltet, bindet der Sauerstoff allmählich den Wasserstoff. Das Element „erholt“ sich wieder.

Zahlreiche Geräte der Elektronik, der Nachrichtentechnik oder der Elektromedizin müssen so klein wie nur irgend möglich sein; denken wir etwa an den weltbekannten „verschluckbaren Sender“ für Untersuchungen im Magen-Darm-Trakt, an Hörhilfen oder an elektrisch betriebene Armbanduhren. Für solche Geräte wurden Elemente entwickelt, die nicht größer als ein Groschen oder eine Erbse sind. Sie arbeiten allerdings nicht auf der Basis Zink-Kohle, sondern verwenden teilweise recht teure Elektrodenmaterialien, zum Beispiel Silber oder Quecksilber. Ihr Preis wird jedoch teilweise dadurch ausgeglichen, daß sie nur sehr geringe Ströme abgeben müssen und infolgedessen eine lange Lebensdauer besitzen. Elektrische Armbanduhren laufen ein Jahr oder länger ohne Elementwechsel.



Der „Akku“

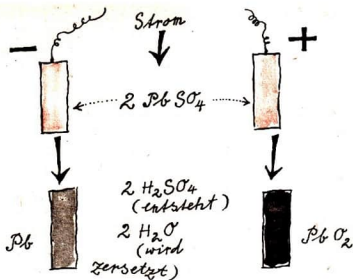
Eine „ausgebrannte“ Taschenlampenbatterie werfen wir weg. Genauso ergeht es der Batterie des Kofferempfängers. Das ist zwar eigentlich eine Materialvergeudung, aber man kennt bis heute kein einfaches und billiges Verfahren, Trockenbatterien zu regenerieren.

Es gibt jedoch chemische Spannungsquellen, die uns, wenn wir sie einigermaßen pfleglich behandeln, viele Jahre dienen können, weil ihr Material sich nicht „verbraucht“. Sie liefern beispielsweise den Strom, mit dem wir den Motor eines Kraftfahrzeuges anlassen.

Die „Batterie“ des Kraftwagens ist ein „Akkumulator“ (Sammler). Auch in ihm laufen bei der Stromentnahme elektrochemische Vorgänge ab, in deren Verlauf die Elektroden umgewandelt werden. Im Gegensatz zu galvanischen Elementen lassen sich diese Umwandlungen aber dadurch rückgängig machen, daß man Strom in den Akkumulator hineinschickt. Der „Akku“, wie man den Akkumulator kurz nennt, ist also eine Art Sparbüchse für elektrische Energie. Wir können sie in ihm speichern und zu beliebiger Zeit wieder abzapfen.

Am bekanntesten wurde der Bleiakkumulator. Er enthält mehrere „positive“ und mehrere „negative“ Platten, die in verdünnte Schwefelsäure tauchen. Sie sind gruppenweise leitend miteinander verbunden, um auf eine größere Plattenfläche und damit erhöhte Leistungsfähigkeit zu kommen. Auch die Plattenform trägt zur Oberflächenvergrößerung bei. Zahlreiche eingearbeitete Rippen oder Fenster gewährleisten, daß der Säure eine möglichst große Plattenfläche gegenübersteht.

Die positiven Platten werden mit einer Schicht Bleiperoxyd (PbO_2) überzogen, die negativen werden mit Bleischwamm ausgefüllt. Die Platten überziehen sich mit einer Bleisulfatschicht (PbSO_4). Zahlreiche Schwefelsäuremoleküle sind in positive Wasserstoff- und negative SO_4 -Ionen dissoziiert.

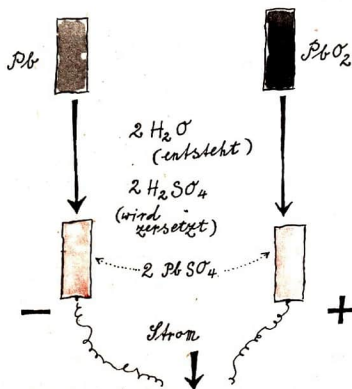


"Laden"

Verbinden wir die negativen Platten mit dem Minuspol, die positiven mit dem Pluspol einer Spannungsquelle, setzen elektrochemische Vorgänge ein. In ihrem Verlauf wird das Bleisulfat der negativen Platten in Blei umgewandelt, aus dem Bleisulfat der positiven Platten bildet sich Bleiperoxyd. Außerdem entsteht neue Schwefelsäure, während Wasser verbraucht wird. Beim Laden, das heißt während der Energieaufnahme durch den Akkumulator, steigt daher die Säuredichte.

Das Laden ist beendet, sobald sämtliches Bleisulfat umgewandelt wurde. Die negativen Platten enthalten dann metallisches, schwammförmiges Blei, die positiven braunschwarzes Bleiperoxyd. Schalten wir die Spannungsquelle ab, können wir zwischen den positiven und negativen Platten eine Spannung von etwa 2 V messen. Der Akkumulator ist zum Element geworden und kann nunmehr Strom abgeben.

Beim Entladen laufen die chemischen Vorgänge in umgekehrter Richtung ab: Blei und Bleiperoxyd verwandeln sich in Bleisulfat zurück; dabei wird Schwefelsäure verbraucht und Wasser gebildet; die Säuredichte nimmt wieder ab. Sobald die Spannung



"Entladen"

des Akkumulators bis auf 1,8 V gesunken ist, muß er wieder geladen werden. Um auf eine höhere Spannung, zum Beispiel auf 6 V oder 12 V zu kommen, werden in den meisten Akkumulatoren mehrere „Zellen“ hintereinandergeschaltet.

Obwohl der Bleiakкумуляtor starke Ströme abgeben kann, ist die gespeicherte Energiemenge gering, verglichen mit den Abmessungen und dem Gewicht des Akkumulators. Um eine Kilowattstunde zu speichern, wäre ein Akkumulator von ungefähr 100 kp Gewicht nötig. Für die Energiespeicherung im großen ist daher der Akkumulator nicht geeignet. Versuche, einen „Leichtakkumulator“ zu schaffen, verliefen bisher ergebnislos.

„Stahlakkumulatoren“ verwenden als Elektrodenmaterial Eisen- und Nickelverbindungen. Die Platten sind in einem Stahlblechbehälter untergebracht, als Flüssigkeit dient Kalilauge. Der Stahlakkumulator ist zwar leichter als der Bleiakкумуляtor, doch liegt seine Spannung nur bei 1,2 V pro Zelle.

Stahlakkumulatoren sind mechanisch sehr robust; auch Überlastungen beim Entladen, auf die der Bleiakкумуляtor sehr empfindlich reagiert, schaden ihnen wenig. Die Gasentwicklung beim Laden und Entladen ist gering.

Eine Abart des Stahlakkumulators, der Nickel-Kadmium-Akkumulator, „gast“ überhaupt nicht. Man kann ihn luft- und feuchtigkeitssicher abschließen. Das ist besonders für die Stromversorgung transportabler Geräte von Vorteil; denn es kann kein Gas austreten und empfindliche Bauelemente chemisch angreifen.

Auch bei der Fertigung von Kleinstakkumulatoren hat man erstaunliche Ergebnisse erzielt. In der ČSSR werden Akkumulatoren in Knopfform hergestellt, die bei 25 mm Durchmesser nur 8,6 mm dick sind; in der UdSSR gibt es eine abgestufte Typenreihe von Kleinstakkumulatoren auf der Basis von Zink und Silber. Ihre Abmessungen unterschreiten teilweise noch die der kleinsten Elemente.



Ein neuer Weg: das Brennstoffelement

Seit Jahrzehnten weiß man, daß Gleichstrommotoren sehr gut für den Fahrzeugantrieb geeignet sind. Ihre Drehzahl läßt sich stufenlos und ohne Getriebe regeln, sie laufen geräuscharm und erzeugen weder Rauch noch Abgase. Der elektrische Antrieb von Kraftwagen und Schiffen scheiterte bislang aber daran, daß eine Energiezuführung von außen nach dem heutigen Stand der Technik nicht möglich ist. Der Betriebsstrom muß an Bord erzeugt werden.

Nur Fahrzeuge mit geringem Aktionsradius können aus Akkumulatoren mit Energie versorgt werden; für Luftfahrzeuge wären Akkumulatoren als Antriebsquelle von vornherein viel zu schwer. Diese Situation könnte sich grundlegend ändern, wenn eine Elektroenergiequelle zur Verfügung stände, die klein und leicht

wäre und bei hohem Wirkungsgrad mit billigen Rohstoffen auskäme. Eine solche Energiequelle wäre keineswegs nur für das Verkehrswesen interessant. Der größte Teil aller Elektroenergie wird aus fossilen Brennstoffen gewonnen, und zwar, wie wir bald erfahren werden, auf eine eigentlich recht umständliche Weise. Die in den Brennstoffen gespeicherte chemische Energie wird als Wärme frei, muß in mechanische Energie überführt und kann dann erst in Elektroenergie verwandelt werden. Diese mehrfache Umwandlung verursacht nicht allein große Verluste, sondern erfordert auch komplizierte und teure Anlagen – jedes Kraftwerk beweist es.

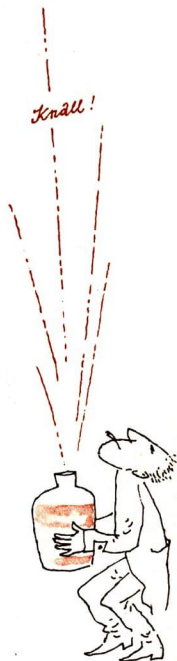
Seit langem bemühen sich daher viele Forscher und Techniker, Elektrizität unmittelbar – ohne den Umweg über die mechanische Energie – aus den chemischen Vorgängen bei der Verbrennung oder unmittelbar aus der Verbrennungswärme zu gewinnen. In jüngster Zeit ist man diesem Ziel um ein ganzes Stück nähergekommen.

Schicken wir Strom durch Wasser, das mit etwas Säure versetzt wurde, so wird es durch elektrochemische Vorgänge „zerlegt“. An der Anode steigt Sauerstoff, an der Katode Wasserstoff auf. Um die Wassermoleküle zu trennen, ist Energie – hier Elektroenergie – nötig. Bei der Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser wird diese Energie wieder frei. Das geschieht nicht von allein, doch sobald wir das im richtigen Mengenverhältnis stehende Gemisch von Wasserstoff und Sauerstoff anzünden, erfolgt eine heftige Explosion. Die Moleküle des Wasserstoff-Sauerstoff-Gemischs, das mit Recht Knallgas genannt wird, vereinigen sich zu Wasser beziehungsweise Wasserdampf.

Den Chemikern ist längst bekannt, daß jede Verbrennung, jede Oxydation und die dabei auftretenden Energieumsetzungen ihrem Wesen nach elektrische Vorgänge sind. Der „Brennstoff“, in unserem Fall Wasserstoff, gibt Elektronen an das „Oxydationsmittel“ Sauerstoff ab. In den „Brennstoffelementen“ wird ein Oxydationsvorgang so gesteuert, daß er langsam und kontrollierbar abläuft und die Elektronen gezwungen werden, über einen äußeren Stromkreis zu wandern.

Das Brennstoffelement von Bacon, dessen Entwicklung bereits ziemlich weit vorangetrieben wurde, nutzt die bei der Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff frei werdende Energie.

Nickelelektroden, die mit zahlreichen Bohrungen winzigen Durchmessers versehen sind, stehen sich in Kalilauge gegenüber. Diesen Elektroden wird unter Druck Wasserstoff und Sauerstoff zugeführt. Durch Vorgänge, die wir nicht näher erläutern können, werden die Gasmoleküle gespalten und ionisiert. An der einen Elektrode entstehen Wasserstoffionen. Sie lassen Elektronen im Nickel zurück. Die Elektrode wird dadurch negativ elektrisch. An der anderen Elektrode entstehen negative Ionen, die aus je einem Atom Sauerstoff und je einem Atom Wasserstoff bestehen





(„OH-Ionen“). Diese Elektrode nimmt infolgedessen eine positive Ladung an. Die negativen und positiven Ionen vereinigen sich zu Wassermolekülen. Verbinden wir die Elektroden durch einen Draht, fließt Strom, solange den Elektroden Wasserstoff und Sauerstoff zugeführt werden. Das Element hat eine Spannung von etwa 1 V.

Bereits vor einigen Jahren wurde eine aus Brennstoffelementen zusammengesetzte Batterie bekannt, die 5 kW leistete. Sie bestand aus 40 Einzelelementen. Der Wirkungsgrad lag zwischen 50 und 65% und war damit weit höher als bei der Energiegewinnung „auf Umwegen“. Je Kilowattstunde wurden etwa 50 g Wasserstoff und 400 g Sauerstoff verbraucht.

Eine andere, aus über 1000 Elementen bestehende Batterie wurde in einen elektrisch angetriebenen Traktor eingebaut. Auch bei diesem Versuch wurde ein sehr guter Wirkungsgrad erzielt. Es ist nicht ausgeschlossen, daß das viel diskutierte Problem des Elektroantriebs von Fahrzeugen durch die Weiterentwicklung der Brennstoffelemente entscheidende neue Impulse erhält.

Auch für die Raumschiffahrt könnten Brennstoffelemente Bedeutung erlangen. Dabei sollen wieder Wasserstoff und Sauerstoff verwendet werden. Gerade für Raumfahrzeuge wäre dieser Elementtyp besonders günstig: Der Sauerstoff kann einem Reservoir entnommen werden, das ohnehin an Bord vorhanden ist, um den zum Leben notwendigen Sauerstoff bereitzustellen. Das im Element gebildete Wasser kann dazu dienen, die Trinkwasservorräte der Besatzung zu ergänzen. Man erwägt, bereits Zwei-Mann-Raumkapseln mit Brennstoffelementen auszurüsten.

Brennstoffelemente sind nicht auf Wasserstoff und Sauerstoff angewiesen. Man experimentiert erfolgreich mit Propangas, Erdgas, Kohlenmonoxyd und anderen billig verfügbaren Brennstoffen. Auch flüssige und sogar feste Brennstoffe werden untersucht. Außerdem ist man bestrebt, den teuren Sauerstoff durch normale Luft zu ersetzen.

Jüngste Überlegungen gehen noch weiter. In „Bakterienzellen“ will man den Brennstoff an Ort und Stelle durch Bakterien oder Fermente erzeugen. Man beabsichtigt, aus Fäkalienabwässern, Müll oder Holzschliff Wasserstoff, Kohlenmonoxyd oder Methan zur Speisung der Brennstoffelemente zu gewinnen.

Man denkt ferner daran, in „Bio-Solarzellen“ Zellulose oder Tang zu „verzuckern“, die Zuckerlösung als Brennstoff zu benutzen und das entstehende Wasser und Kohlendioxyd in Algenkulturen unter Zuhilfenahme von Sonnenlicht erneut in Zucker zu verwandeln. Bei diesem „geschlossenen“ Brennstoffkreislauf wäre das Sonnenlicht der „Energierohstoff“.

Wenn auch der Weg zu billigen und universell einsetzbaren Brennstoffelementen noch weit ist, so scheint doch festzustehen, daß Brennstoffelemente in der Reihe der Elektroenergiequellen eines Tages einen wichtigen Platz einnehmen werden.

STROM AUS LÜBBENAU UND BRATSK

Der große Hunger

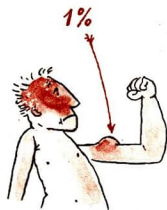
Wir sind nicht mit großer Muskelkraft ausgestattet. Stünde sie allein uns zur Verfügung, müßten wir unser Dasein auf primitivste Weise fristen. Seit Anbeginn seiner Geschichte ist daher der Mensch bestrebt, sich zusätzliche Kräfte dienstbar zu machen. Zugtiere, das Segelschiff, die Wind- und die Wassermühle, die Dampfmaschine waren Etappen dieses Weges. Der Ersatz der menschlichen und tierischen Muskelkraft vollzog sich zunächst sehr allmählich. Noch in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts entstammten mehr als 90% aller auf der Erde genutzten Energie menschlichen und tierischen Muskeln, der Rest anderen Quellen. Gegenwärtig ist die Muskelkraft nur noch mit 1% am Energieaufkommen beteiligt – ein Beweis für die gewaltigen gesellschaftlichen und technischen Umwälzungen, die sich in den vergangenen hundert Jahren vollzogen haben.

Der Anteil der universell anwendbaren, leicht „transportierbaren“ und billigen Elektrizität an der Energiegewinnung ist ständig gestiegen. Man schätzt, daß die Kraftwerke der Welt uns gegenwärtig die Arbeitskraft von 12 Milliarden „Muskelsklaven“ zur Verfügung stellen. Dabei sind noch nicht einmal 100 Jahre vergangen, seit das erste Kraftwerk in Betrieb genommen wurde. Thomas Alva Edison hatte es 1882 in New York einrichten lassen. Dreihundert elektrische Lampen wurden durch die Anlage gespeist. Auch in anderen großen Städten wurden danach Elektrizitätszentralen in Betrieb genommen.

Elektrischer Strom war anfänglich sehr teuer; denn die Kraftwerke arbeiteten fast ausschließlich für Beleuchtungszwecke und waren deshalb den größten Teil des Tages nutzlos. Das wurde anders, sobald sich der Elektromotor durchsetzte. Während noch 1893 in Berlin 90% des Stromes für die Beleuchtung und nur 10% als „Kraftstrom“ dienten, hielten „Kraft“ und „Licht“ einander schon 5 Jahre später die Waage. Weitere 2 Jahre danach, 1900, wurden 75% der in Berlin erzeugten Elektroenergie als Kraftstrom verkauft.

In den folgenden Jahren stieg der Energiebedarf sprunghaft an: Von den deutschen Elektrizitätswerken wurden von 1905 bis 1907 250 Millionen kWh, von 1907 bis 1909 470 Millionen kWh, von 1911 bis 1913 1000 Millionen kWh abgegeben (DDR 1962: 45 000 Millionen kWh).

Wie Pilze schossen die kapitalistischen Kraftwerksunternehmungen aus dem Boden, bekämpften sich gegenseitig und führten einen erbitterten Kleinkrieg gegen die Gaswerke, die sich ebenfalls in Privatbesitz befanden. Als jedoch in Deutschland im Jahre 1919 nach heftigen Debatten von der Nationalversammlung ein Gesetz zur „Sozialisierung der Elektrizitätswirtschaft“ beschlossen wurde, waren sich alle „feindlichen Brüder“ einig.



Die Elektrizitätsgesellschaften gaben nicht eher Ruhe, bis das Gesetz wieder zu Fall gebracht war. Einige Jahre danach, auf dem Gipfel der Inflation, kostete eine Kilowattstunde 300 Milliarden Mark!

Eines der technisch noch rückständigsten Länder unternahm in jenen Jahren entscheidende Schritte, die Elektroenergie zum Wohle aller Bürger zu nutzen. Noch in den Tagen des Bürgerkrieges, kurz nach der Großen Sozialistischen Oktoberrevolution, arbeiteten auf Anregung Lenins 200 der befähigsten russischen Wissenschaftler und Ingenieure einen umfassenden Plan für die Elektrifizierung der heutigen Sowjetunion aus, den GOELRO-Plan. Auf dem VIII. Allrussischen Sowjetkongreß, im Dezember 1920, wurde er erläutert und gebilligt:

Zwanzig Wärmekraftwerke mit einer Leistung von 1110 MW und zehn Wasserkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 640 MW sollten in den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren entstehen und die Vorkriegsleistung aller russischen Kraftwerke nahezu um das 2,5 fache übertreffen. Fachleute vieler Länder schüttelten skeptisch den Kopf. Selbst H. G. Wells, der als Autor zahlreicher utopischer Erzählungen gewiß „technisch zu träumen“ verstand, hielt den GOELRO-Plan für eine Utopie.

Sie haben sich alle geirrt: Der GOELRO-Plan wurde nicht nur erfüllt – er wurde weit übertroffen. 1935 leisteten die sowjetischen Kraftwerke 4400 MW, fast zweieinhalbmal soviel, wie der Plan vorgesehen hatte – und etwas weniger, als ein Kraftwerk, das Wasserkraftwerk von Krasnojarsk, schon bald leisten wird.

Lenins Wort „Kommunismus, das ist Sowjetmacht plus Elektrifizierung des ganzen Landes“ wirkte weiter. Obwohl durch den faschistischen Überfall 60 Großkraftwerke zerstört worden waren, erreichte die sowjetische Energieerzeugung bereits 1946 wieder ihre Vorkriegskapazität. 1947 nahm sie hinter den USA den zweiten Platz in der Welt ein.

Einen Stillstand gibt es nicht: Neue, große Wärmekraftwerke werden gebaut; die sibirischen Ströme sollen die Turbinen gigantischer Wasserkraftwerke treiben; die Zahl der Kernkraftwerke wächst ständig. 1980 wird sich die jährliche „Energieproduktion“ der Sowjetunion auf 3000 Milliarden Kilowattstunden belaufen.

Unsere Republik ist ein hochindustrialisiertes Land. Sein Energiebedarf steigt so schnell, daß seine Befriedigung nach wie vor ein nicht leicht zu lösendes Problem darstellt und nur gelingen kann, wenn mit der verfügbaren Energie möglichst sparsam umgegangen wird. Waren es 1955 28,5 Milliarden Kilowattstunden, 1962 45 Milliarden Kilowattstunden, die in der Volkswirtschaft und in den Haushaltungen verbraucht wurden, so werden wir 1970 etwa 100 Milliarden Kilowattstunden benötigen. Deshalb werden schon jetzt neue Großkraftwerke gebaut – wir nennen hier nur die Namen Lübbenau und Vetschau.



Nicht weniger notwendig aber ist es, die vorhandenen Anlagen zu modernisieren und so gut wie nur möglich auszunutzen.

In allen übrigen Ländern steigt der Energiebedarf ebenfalls schnell. Vor wenigen Jahren galt noch die Faustregel, daß er sich aller zehn Jahre verdopple. Vor allem in den sozialistischen Ländern ist diese Regel längst überholt. So verdoppelt sich der Energiebedarf der Sowjetunion gegenwärtig aller sechs Jahre, und diese Zeitspanne wird sich weiter verkürzen.

Die Erzeugung von Elektroenergie ist noch sehr ungleichmäßig über die Erde verteilt. 80% der gesamten Elektroenergie kommen nur einem Viertel der Menschheit zugute. Das erklärt sich aus dem unterschiedlichen Entwicklungsstand in den verschiedenen Ländern, vor allem aber daraus, daß in den riesigen, noch vor kurzem kolonialen oder abhängigen Gebieten nur dort eine Energiebasis geschaffen wurde, wo sie den Kolonialherren unmittelbar zur Ausbeutung des Landes diente. Die Energieversorgung der kupferreichen Teile des Kongogebietes ist ein „klassisches“ Beispiel hierfür.

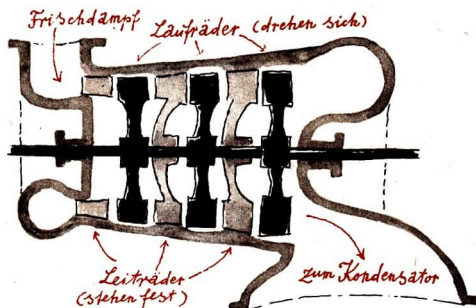
Das Wärmekraftwerk liegt vorn

Über neun Zehntel aller Elektroenergie werden in „Wärmekraftwerken“ aus natürlichen Brennstoffen gewonnen. Unter diesen steht Steinkohle mit weitem Abstand an der Spitze. Ihr folgt die Braunkohle. Der Anteil des Erdöls und des Erdgases ist noch gering, nimmt aber seit Jahren ständig zu.

Die ersten Wärmekraftwerke waren mit Dampfmaschinen ausgerüstet. Die hin- und hergehende Bewegung der Kolben und die dadurch verursachten Erschütterungen beanspruchten die Maschinenfundamente sehr stark. Es wurden große Mengen an Schmiermitteln verbraucht, die teilweise in den Abdampf und in das Kondenswasser übertraten und dessen Wiederaufbereitung erschwerten. Vor allem aber war der Wirkungsgrad der Dampfmaschine sehr gering.

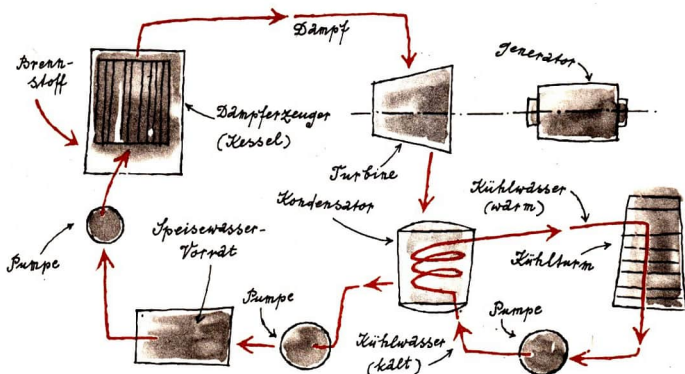
Daher mußte die Dampfmaschine der Dampfturbine weichen. Um ihre Entwicklung haben sich zahlreiche Wissenschaftler und Techniker verdient gemacht; wir wollen nur den Schweden Carl Patrick Gustaf de Laval (1845–1913) und den Engländer Charles Parsons (1854–1931) erwähnen.

In der Dampfturbine strömt Wasserdampf aus Düsen und nimmt dabei eine sehr hohe Geschwindigkeit an. Er trifft auf das mit zahlreichen Schaufeln besetzte Laufrad und versetzt es in rasche Drehung. Weil die Bewegungsenergie des Dampfes durch ein Laufrad nur unvollständig ausgenutzt würde, trägt die Turbinenwelle mehrere Laufräder, die nacheinander vom Dampf getroffen werden. Zwischen den Laufrädern sind feststehende Leiträder angebracht. Sie lenken den Dampf nach Verlassen eines Laufrades so, daß er auf die Schaufeln des folgenden Laufrades strömt.



Leistungsfähige Dampfmaschinen waren Langsamläufer; entsprechend langsam rotierten die angetriebenen Generatoren. Sie mußten daher, um die Netzfrequenz von 50 Hz zu erreichen, viele Polpaare und einen entsprechend großen Durchmesser aufweisen (s. S. 96). Demgegenüber sind Dampfturbinen Schnellläufer. Ihre Laufräder drehen sich in der Minute 1500- oder 3000mal und werden mit dem Generator auf eine gemeinsame Welle gesetzt. Der Generator kommt infolgedessen mit einem oder höchstens zwei Polpaaren aus, was seinen Aufbau erheblich vereinfacht.

Turbogeneratoren und Dampfturbinen werden zu einem Block vereinigt. Turbinenblocks für 500 MW werden in der Sowjetunion bereits serienmäßig produziert; Sätze von 800 MW und 1200 MW nehmen auf den Reißbrettern Gestalt an.



Den Dampf für den Turbinenantrieb liefert das Kesselaggregat. Die Brennstoff- und Wassermengen, die in ihm verarbeitet werden, sind bei Großgeneratoren enorm. Für neue sowjetische Wärmekraftwerke werden zum Beispiel Kessel vorgesehen, die stündlich 640 t Dampf bei einer Temperatur von 570 °C und einem Druck von 140 at bereitstellen. Auch diese Zahlen sind aber noch nicht die oberste Leistungsgrenze. Brennstoffzufuhr – häufig wird Kohlenstaub eingeblasen und im Flammenwirbel verbrannt –, Verbrennungsluft- und Speisewasserzufuhr sind in modernen Kesselanlagen weitgehend automatisiert.

Der Abdampf der Turbinen wird im „Kondensator“ in Wasser zurückverwandelt, das erneut als Kesselspeisewasser dient. Da für die Kesselspeisung nur besonders aufbereitetes Wasser verwendet werden kann, verbilligt der Kondensator die Speisewasserbereitstellung erheblich. Gleichzeitig erhöht er die Wirksamkeit der Turbine, weil er das „Druckgefälle“ zwischen Turbineneingang und -ausgang um etwa 1 at vergrößert.

Im Kondensator gibt der Dampf seine restliche Energie an zirkulierendes Kühlwasser ab. Kann dieses einem nahen Flußlauf entnommen und wieder zugeführt werden, ist es leicht zu beschaffen. Ist kein Wasserlauf in der Nähe, führt das Kühlwasser einen geschlossenen Kreislauf aus. Es wird, nachdem es den Kondensator verlassen hat, Kühltürmen zugeleitet, in denen es gegen einen Luftstrom herabrieselt und sich abkühlt.

Die Spannung der Kraftwerksgeneratoren liegt zwischen 6 kV und 15 kV. Höhere Spannungen lassen sich aus technischen Gründen nicht unmittelbar im Generator erzeugen. Die Generatorspannung wird daher in Transformatoren nachträglich heraufgesetzt.

Um die hohen Baukosten für Wärmekraftwerke zu senken, beschreitet man mehrere Wege. So nutzt man an einigen Orten erweiterte und ausgebaute Höhlen für die Errichtung von Kraftwerken. Das schwedische Wärmekraftwerk Stenungsund zum Beispiel umfaßt vier unterirdische Maschinenhallen, die fast 150 m lang sind und die Kesselanlage, die Turbinen, Generatoren und Transformatoren aufnehmen. Das Kühlwasser wird vom Meer durch einen 4 km langen Tunnel zugeführt. Nur die Schaltanlage befindet sich über der Erde.

Eine wesentliche Verbilligung kann auch dadurch herbeigeführt werden, daß man Teile des Kraftwerkes im Freien aufstellt. Sehr aussichtsreich ist auch – wie es in der Sowjetunion geschieht –, für Kraftwerke verschiedener Leistungsstufen Standardbauweisen auszuarbeiten. Schon die Festlegung einheitlicher Kennwerte für Kesselaggregate, Turbinen und Generatoren ist von unschätzbarem Nutzen. Außerdem wird man künftig in den sozialistischen Ländern den Energiemaschinenbau in wenigen Großbetrieben konzentrieren. Teure Einzelfertigungen werden damit überflüssig.



Dem Besucher eines Wärmekraftwerkes begegnen überraschend wenige Betriebsangehörige. Im Kraftwerksbetrieb sind bereits sehr viele Vorgänge mechanisiert und automatisiert, zur Steuerung, Kontrolle und Wartung ist nur noch wenig Personal nötig. Stattdessen sind komplizierte Steuer-, Regel- und Meßanlagen vorgesehen. In einem Wärmekraftwerk müssen etwa 500 verschiedene Meßwerte erfaßt und in entsprechende Steuerkommandos umgesetzt werden. In vollautomatischen Kraftwerken, die im normalen Betrieb überhaupt kein Bedienungspersonal erfordern, ist diese Zahl noch größer.

In modernen Wärmekraftwerken werden etwa 2100 kcal zur Erzeugung einer Kilowattstunde benötigt. Da theoretisch bereits 860 kcal einer Kilowattstunde entsprechen, ist also der Gesamtwirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes nicht sehr groß. Seine Verbesserung ist zwar nur noch in verhältnismäßig bescheidenem Umfang möglich, doch wirken sich wegen des großen Brennstoffverbrauchs bereits kleine Erhöhungen sehr deutlich aus.

Damit sind wir bei einer weiteren, für die Errichtung von Kraftwerken wichtigen Frage, der Wahl des geeigneten Standortes. Brennstoffbasis für die Kraftwerke der Deutschen Demokratischen Republik sind unsere Braunkohlenvorkommen. Der Heizwert der Braunkohle ist gering. Im günstigsten Fall lassen sich aus einem Kilopond Rohbraunkohle 2800 kcal gewinnen. Nehmen wir einmal einen Durchschnitt von 2100 kcal zur Erzeugung einer Kilowattstunde an, so müssen wir, wie ein Vergleich mit der oben angegebenen Zahl zeigt, für jede Kilowattstunde ein Kilopond Braunkohle verbrennen und selbstverständlich vorher zum Kraftwerk transportieren. Bereits ein Kraftwerk mit einer Leistung von 500 MW benötigt, wie wir leicht selbst ausrechnen können, bei ununterbrochenem Betrieb täglich etwa 12 000 t Braunkohle, das heißt 600 normale Güterwagenladungen. Für die im Bau befindlichen Großkraftwerke Lübbenau (1200 MW) und Vetschau (1800 MW) ergeben sich entsprechend höhere Zahlen. Es wäre wirtschaftlich nicht vertretbar, wollte man derart gewaltige Braunkohlemengen über große Strecken transportieren. Deshalb muß man Kraftwerke auf Braunkohlenbasis möglichst nahe an die Kohlevorkommen heranbringen, während man bei energieintensiveren Brennstoffen, so bei Steinkohle oder Öl, etwas längere Transportwege in Kauf nehmen kann.

Aber auch viele andere Faktoren beeinflussen den Standort eines Kraftwerkes, zum Beispiel die Kühlwasserbeschaffung und die Entfernung zu den Hauptverbrauchscentren der elektrischen Energie. Die umfangreichen Berechnungen, die die Wahl des besten Standortes ermöglichen, werden heute schon oft von elektronischen Rechenmaschinen übernommen.

Neben den „großen“ Wärmekraftwerken, die sich im Prinzip alle gleichen, haben sich Sonderformen herausgebildet, die meistens für kleinere Leistungen bestimmt sind. In großen

Städten unserer Republik werden „Heizkraftwerke“ errichtet. Sie liefern nicht nur elektrischen Strom, sondern Elektroenergie und Wärme. Der vom Kesselaggregat erzeugte Dampf wird nicht ausschließlich zum Generatorantrieb benutzt, sondern gleichzeitig auch für Heizzwecke. Man leitet ihn bei hoher Temperatur und unter hohem Druck zunächst in die Turbine, die mit einem Generator gekuppelt ist. Zwischen den Laufrädern wird Dampf, der bereits teilweise entspannt und abgekühlt ist, abgezapft und einem Wärmeaustauscher zugeführt, in dem Wasser erhitzt oder Dampf niedriger Temperatur erzeugt wird. Dieser Dampf beziehungsweise das heiße Wasser werden dann den Wärmeverbrauchern zugeleitet, beispielsweise zum Heizen von Wohnblöcken.

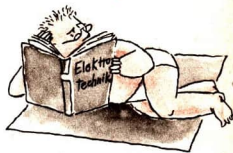
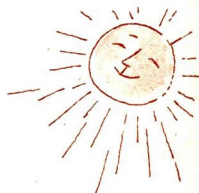
Auch für Betriebe hat sich diese „Heizkraftkupplung“ bewährt; denn es gibt zahlreiche Produktionsstätten, in denen gleichzeitig Elektroenergie und große Dampfmengen benötigt werden. Neben der guten Ausnutzung der Brennstoffe haben Heizkraftwerke den Vorteil, daß die unerwünschten Nebenerscheinungen von Einzelheizungen (Brennstofftransport, Asche, Rauchgase, Arbeitsaufwand) aus den Wohngebieten verbannt werden können. Die Sowjetunion ist seit Jahren auf dem Gebiet der Heizkraftkupplung führend.

Dieselmotoren werden gleichfalls für den Generatorantrieb verwendet. Schon vor einigen Jahren wurde in Italien eine Anlage für 40 MW – es war die größte Dieselmotorkraftanlage der Welt – errichtet. Auch die Gasturbine gewinnt für den Generatorantrieb rasch an Bedeutung (s. S. 162).

Bei Naturkatastrophen und auf abgelegenen Großbaustellen setzt man bewegliche Kraftwerke ein. Häufig werden sie auf Schienenfahrzeuge montiert. Es gibt Anlagen, deren Dampf von mehreren Lokomotiven geliefert wird. Ein fahrbares Kraftwerk der ČSSR besteht aus zwei Kesselwagen mit je einem Dampferzeuger, einem Wagen mit Turbine und Generator, einem Wagen mit den Schalteinrichtungen, drei Kühlerwagen und dem Unterhaltungswagen für das Betriebspersonal. Fahrbare Kraftanlagen der UdSSR sind mit Dampfturbinen, Dieselmotoren oder Gasturbinen ausgestattet. Leistungen von 10 MW werden von derartigen fahrbaren Kraftwerken erreicht.

Strom aus „weißer Kohle“

Es gibt einen „Treibstoff“ für Kraftwerke, der nicht gefördert werden muß, nicht verbrennt und immer wieder kostenlos zur Verfügung steht. Es ist die Energie der „weißen Kohle“, des strömenden Wassers. Weiße Kohle ist, im Gegensatz zu natürlichen Brennstoffen, unerschöpflich; sie wird „frei Haus“ geliefert, solange die Sonne die Erde erwärmt und damit den Wasserkreislauf aufrechterhält.



Auf etwa 3,75 Millionen MW schätzen sowjetische Wissenschaftler die Leistungsfähigkeit aller Wasserläufe. Obwohl man annimmt, daß nur ein Drittel dieser Leistung nutzbar ist, bleibt noch eine gehörige Portion übrig, nämlich etwa die Leistung von 1000 Großkraftwerken „Lübbenau“.

Am gesamten „Rohenergieaufkommen“ der Welt sind die Wasserkräfte trotzdem nur sehr spärlich beteiligt – nach Materialien der V. Weltkraftkonferenz mit noch nicht einmal 2%. Diese Zahl erscheint nur auf den ersten Blick verblüffend niedrig. Ein großer Teil der weißen Kohle steht in Gebieten zur Verfügung, die bisher nur wenig wirtschaftlich erschlossen wurden, beispielsweise in Südamerika und Zentralafrika. Auch die zugänglichen Wasserläufe sind nicht immer ohne weiteres für eine Kraftgewinnung größeren Maßstabes zu gebrauchen, etwa weil die Wasserführung starken Schwankungen unterliegt oder örtliche Gegebenheiten den Kraftwerksbau sehr erschweren. Vor allem aber herrscht in kapitalistischen Ländern die Tendenz vor, die großen Kosten für Wasserkraftwerke zu umgehen, solange natürliche Brennstoffe gefördert und mit hohem Profit verkauft werden können. Daran ändert auch die Tatsache nichts, daß manche kapitalistischen Staaten infolge besonders günstiger natürlicher Bedingungen oder wegen Brennstoffmangels ihre Wasserkräfte sehr weit ausgebaut haben, wie zum Beispiel Neuseeland, dessen Elektroenergie zu 86% aus Wasserkraftwerken stammt.

Die Errichtung großer Wasserkraftanlagen berührt nicht nur die Energiewirtschaft, sondern in gleicher Weise die Schifffahrt, die Fischerei, die Landwirtschaft, die Bereitstellung des Brauchwassers für Industrieanlagen. Unter kapitalistischen Verhältnissen ist es unmöglich, die beste Lösung zu verwirklichen, weil jeder Interessent nach möglichst großem Profit strebt. Deshalb muß die Wasserkraftnutzung im kapitalistischen Teil der Welt Stückwerk bleiben, und zahlreiche großartige Projekte wurden zwar in Form ausführlicher Studien niedergelegt, aber überhaupt nicht oder nur teilweise verwirklicht.

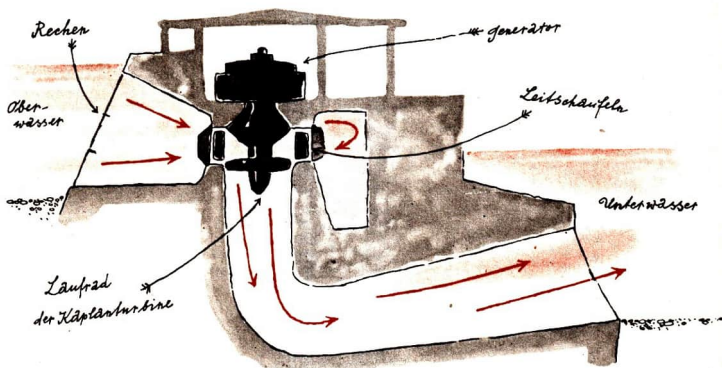
In den sozialistischen Ländern gibt es keinen Kampf zwischen „schwarzer“ und „weißer“ Kohle; die gesamte Energiegewinnung ist ein Teil der einheitlich geplanten und geleiteten Volkswirtschaft. Schon der GOELRO-Plan sah die Errichtung von großen Wasserkraftwerken vor; heute entstehen in Sibirien wahre Wasserkraft-Giganten. Im sozialistischen Teil der Welt geht man auch zielstrebig an die Verwirklichung solcher vom Kapitalismus immer wieder beiseite geschobener Pläne, wie zum Beispiel den Aufbau einer Kette von Donaukraftwerken.

Unserer Republik stehen nur verhältnismäßig geringe Wasserkräfte zur Verfügung. Sie sind zu einem großen Teil bereits ausgebaut. Lediglich die Elbe böte noch eine größere „Wasserkraftreserve“. Die kommenden Jahre werden die Entscheidung darüber bringen, ob man sie ausnutzen kann oder muß.

Wieviel die „weiße Kohle“ in einem Wasserkraftwerk zu leisten vermag, hängt von der Wassermenge ab, die in jeder Sekunde durch die Turbinen strömt, und von der Höhe, aus der das Wasser auf die Turbinen fällt.

Ideal wäre es, eine große Wassermenge aus großer Höhe in die Turbinen strömen zu lassen. Doch diese Voraussetzungen sind fast nirgends anzutreffen. Im Gebirge, wo durch die Geländebeschaffenheit oftmals große Fallhöhen genutzt werden können, ist die Wasserführung der Flüsse nur gering. Im Flachland dagegen führen die Flüsse zwar häufig viel Wasser; es läßt sich aber, wenn nicht weite Gebiete überflutet werden sollen, nur zu geringer Höhe aufstauen. Da zwischen der Fallhöhe und dem Wasserdruck gesetzmäßige Beziehungen bestehen, nennt man Wasserkraftwerke geringer Fallhöhe (bis 50 m) Niederdruckanlagen, Kraftwerke mit größerer Fallhöhe Hochdruckanlagen. Niederdruckkraftwerke werden vor allem an großen Strömen errichtet. Durch ein Wehr wird das Wasser aufgestaut, um eine gewisse Fallhöhe zu erreichen. Das Wehr muß so angelegt werden, daß weder Schifffahrt noch Fischerei behindert werden. Es sind Schleusen oder Schiffshebewerke und besondere „Fischtreppen“ erforderlich. Mitunter bleibt nichts anderes übrig, als das Kraftwerk ein Stück vom Fluß abzusetzen und für Wasserzufluß und -abfluß besondere Kanäle anzulegen.

Die Generatoren der Wasserkraftwerke werden von Turbinen getrieben. Bei Niederdruckwerken sind diese oft waagrecht eingebaut, so daß die unmittelbar mit dem Generator gekuppelte Turbinenwelle senkrecht steht und die Turbine sich unter dem Generator befindet.





Von zahlreichen Turbinenarten hat sich in Niederdruckkraftwerken vor allem die „Kaplanturbine“ bewährt. Sie ist gewissermaßen eine umgekehrte Schiffsschraube. Während bei dieser die Schraubendrehung das Schiff vorwärtstreibt, setzt bei jener das strömende Wasser die Turbinenschaufeln in Bewegung. Hat das Wasser seine Bewegungsenergie an die Turbine abgegeben, fließt es durch einen Tunnel zum „Unterwasser“ ab.

Kaplanturbinen werden für sehr große Leistungen gebaut. Die zwanzig Turbinen des Wasserkraftwerkes „Lenin“ bei Kuybischew zum Beispiel haben eine Maximalleistung von je 171 000 PS (126 000 kW). Um sie zu erreichen, müssen in der Sekunde mehr als 600 m³ Wasser auf jede Turbine treffen. Die Laufräder der Turbinen weisen einen Durchmesser von mehr als 9 m auf. Bei Kraftwerken mit Fallhöhen über 50 m, bei „Hochdruckkraftwerken“, kommt es weniger auf die Wassermenge an, die die Turbinen trifft, sondern vor allem auf eine hohe Strömungsgeschwindigkeit. Es wurden Turbinen geschaffen, die unter diesen Bedingungen besonders wirkungsvoll arbeiten, zum Beispiel die sogenannte „Freistrahlturbine“. Sie läßt die Verwandtschaft mit dem Wasserrad noch erkennen. Auf einem Laufrad sind längs des Umfanges löffelförmige Schaufeln verteilt. Aus einer oder aus mehreren Düsen schießt das Wasser mit großer Gewalt in freiem Strahl auf die Schaufeln und gibt dabei seine Bewegungsenergie ab. In den Düsen lassen sich „Nadeln“ vorstellen, mit deren Hilfe die Turbinenleistung reguliert werden kann. Die größten in Freistrahlturbinen ausnutzbaren Fallhöhen liegen gegenwärtig bei 2000 m.

Die meisten Hochdruckkraftwerke sind „Talsperrenkraftwerke“. Sie liegen am Fuße hoher Staumauern, die ein Tal oder einen Felseinschnitt abriegeln und so einen großen Wasserspeicher schaffen. Er dient meistens nicht der Energiegewinnung allein, sondern soll vor allem die Wasserführung von Flüssen ausgleichen, die Hochwassergefahr bannen und die Trink- und Brauchwasserversorgung verbessern. Oft sind diese Aufgaben so wichtig, daß die Energieerzeugung nur „nebenbei“ mit abfällt. Das ist in unserer Republik, in der zahlreiche kleinere Talsperrenkraftwerke arbeiten, häufig der Fall. Für Talsperren Großkraftwerke fehlen uns die natürlichen Voraussetzungen.

Eine Kette von Hochdruckkraftwerken entsteht gegenwärtig in Sibirien und wird der künftigen Industriebasis dieses Gebietes Energie liefern. Weltberühmtheit erlangte das Wasserkraftwerk Bratsk. Eine fast 130 m hohe Sperrmauer riegelt die Angara ab. An ihrem Fuß wird mit 20 Turbinensätzen, von denen jeder 225 MW leistet, eine elektrische Leistung von 4500 MW bereitgestellt. Ein Werk gleicher Leistung wird bei Ust-Ulimsk errichtet, ein noch leistungsfähigeres (5000 MW) bei Krasnojarsk. Es wird das größte Kraftwerk der Welt sein.

Ein Kraftwerk, das weite Teile Zentralafrikas mit elektrischem

Strom versorgt, ist das Werk an der Karibatsperre, 480 km unterhalb der Viktoriafälle am Sambesi gelegen. Eine mehr als 100 m hohe Betonmauer riegelt den Fluß ab und läßt einen Stausee von 280 km Länge und 40 km größter Breite entstehen. Das Wasserkraftwerk soll im Endausbau 1200 MW leisten. Auch an den Niagarafällen wird ein neues Großkraftwerk errichtet. Stehen im Gebirge natürliche Wasserreservoirs, beispielsweise Seen, zur Verfügung, kann man mitunter auf die Talsperrenanlagen verzichten und „Rohrbahnkraftwerke“ errichten. Der natürliche Speicher wird angezapft, das Wasser stürzt durch Druckrohre oder durch Stollen im Felsen steil nach unten in die Turbinen des Kraftwerkes. Oft werden an geeigneten Gebirgsflüssen Talsperren- und Druckrohranlagen miteinander kombiniert.

Der Sowjetunion gebührt das Verdienst, transportable Kleinstkraftwerke entwickelt zu haben, die an jedem Fluß, ja an jedem größeren Bach Strom für kleinere landwirtschaftliche Betriebe oder Siedlungen liefern können. Der Generator ist in einem wasserdichten, stromlinienförmigen Gehäuse untergebracht, aus dessen Vorderseite eine Welle mit propellerähnlichen Flügeln ragt. Zur Inbetriebnahme genügt es, das „Kraftwerk“ in den Wasserlauf zu hängen. Eine Wartung ist nicht erforderlich; alle notwendigen Regelvorgänge laufen automatisch ab. Wird die Anlage nicht mehr benötigt, kann sie innerhalb weniger Stunden abgebaut und an anderer Stelle neu installiert werden.

Wenn die Kohle knapp wird

Seit vielen Jahrzehnten sind natürliche Brennstoffe die Basis der Energiegewinnung. Sie werden viel schneller verbraucht, als sie „nachwachsen“. Seit vielen Jahrzehnten fragt man sich daher auch: Was wird sein, wenn die natürlichen Brennstoffe, vor allem Kohlen- und Erdölvorräte, zu Ende gehen? Immer wieder hat man das Gespenst einer „Welt ohne Wärme“ beschworen, einer Welt, in der die Menschen der Kälte schutzlos preisgegeben sind, in der Lokomotiven, Generatoren und Fabriken stillstehen, einer Welt, die aus Brennstoffmangel erstarrt.

Das Gespenst der Welt ohne Öfen ist heute gebannt. Immer neue Kohle- und Erdölvorkommen wurden in den vergangenen Jahren entdeckt. Sie würden, zusammen mit den schon länger bekannten Vorkommen, die Energieversorgung bis in die nicht mehr ferne Zeit sichern, da uns die technische Beherrschung der Kernverschmelzung für immer von Energiesorgen befreien wird. Warum „beeilt“ man sich dann heute so mit der Kernforschung? Warum entwickelt man auf der ganzen Welt Kraftwerke, die die Energie der Atomkernspaltung ausnutzen, zumal doch längst bekannt ist, daß diese Art der Kernenergiegewinnung nur eine Zwischenlösung darstellt?



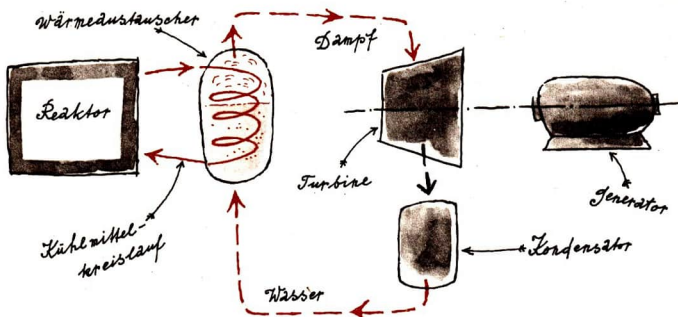
Von dem englischen Nobelpreisträger William Ramsay (1852 bis 1916) stammt das Wort, man könne statt mit Kohle ebensogut auch mit Geldscheinen heizen. In der Tat sind Kohle und Erdöl viel zu kostbar, um unmittelbar verbrannt zu werden. Beide Stoffe stellen unentbehrliche Ausgangsmaterialien der Chemie dar. Damit den Chemikern diese Rohstoffe noch möglichst lange reichlich zur Verfügung stehen, heißt es, ihren Verbrauch auf anderen Gebieten einzuschränken, soweit es nur möglich ist.

Gilt diese Forderung mehr oder weniger für alle Länder, so ergibt sich in einigen noch eine besondere Situation dadurch, daß sie arm an natürlichen Brennstoffen sind. Finnland zum Beispiel stehen nur Holz und Torf als natürliche Brennstoffe zur Verfügung. Deshalb legt man dort großen Wert auf die Erschließung von Wasserkraften; am Kemifluß entstehen 26 Kraftwerke. In einer ähnlichen Lage befindet sich die Schweiz.

Wir können aber „im Lande“ bleiben, um einen Einblick in die Überlegungen und Planungen der Energetiker zu bekommen, die mit solchen Sorgen konfrontiert werden. Wir sind das Land, das an der Spitze der Braunkohlenförderung in der Welt steht. Unsere Kohlevorräte sind bekannt, der Bedarf für die kommenden Jahrzehnte kann ausgerechnet werden. Außerdem weiß man, daß die jährlich zu fördernde Menge nicht über einen bestimmten Wert hinaus gesteigert werden kann. Unabänderlich rückt der Zeitpunkt näher, an dem maximale Fördermenge und Braunkohlebedarf einander die Waage halten. Von da ab fehlt, da der Energiebedarf weiter ansteigt, von Jahr zu Jahr eine größere Menge „Energierohstoff“.

Eine Entlastung kann bereits das Erdöl bringen, das aus der UdSSR unseren Verarbeitungsbetrieben durch die Erdölleitung „Freundschaft“ zufließt. Auch dieses Öl muß aber vor allem der chemischen Industrie zur Verfügung stehen. Etwa ab 1975 werden wir gezwungen sein, zu anderen Energieerzeugungsmethoden überzugehen. Hier bietet sich als günstigste Lösung die Errichtung von Kernkraftwerken an. Da man mit ihrem Entwurf nicht erst anfangen kann, wenn eine Energielücke klappt, begann man schon vor Jahren mit dem Bau des ersten Kernkraftwerkes in unserer Republik.

Dieses Werk gilt, wie gegenwärtig noch alle Kernkraftwerke, in erster Linie als Versuchsanlage, mit der man Erfahrungen sammeln will. Es kann nicht unsere Aufgabe sein, hier näher auf die physikalischen Grundlagen eines Kernkraftwerkes einzugehen. In wesentlichen Grundzügen unterscheiden sich Kernkraftwerke außerdem nur wenig von Wärmekraftwerken. Wieder ist es Wasserdampf, der Turbinen treibt, die ihrerseits die Läufer der Generatoren in Bewegung setzen. An die Stelle der Kesselaggregate treten „Kernreaktoren“. In ihnen werden Uranatome „gespalten“. Dabei werden große Wärmemengen freigesetzt, die den Dampf für die Turbinen erzeugen.



Allerdings ist es nicht ratsam, unmittelbar im Reaktor Wasser in Dampf zu verwandeln, denn dieser würde zahllose radioaktive Teilchen enthalten und sehr bald die ganze Anlage „verseuchen“. Zwischen Reaktor und Turbine wird daher ein Wärmeaustauscher angeordnet. Die im Reaktor erhitzte Substanz – Wasser, Kohlendioxid oder ein flüssiges Metall – durchströmt in ständigem Kreislauf Wärmeaustauscher und Reaktor und gibt ihre Wärmeenergie an Wasser ab, das dabei in Dampf verwandelt wird. Nachdem der Dampf durch die Turbinen geströmt ist, wird er kondensiert und als Wasser erneut dem Austauscher zugeführt.

Beim Aufbau und beim Betrieb eines Kernkraftwerkes ergeben sich zahlreiche Fragen, die bei Wärmekraftwerken keine Rolle spielen. So sind umfangreiche Sicherungsmaßnahmen zu treffen, die das Entweichen radioaktiver Strahlung ausschließen. Dazu gehört, daß jeder Betriebsangehörige eines Kernkraftwerkes mit einem Strahlungsmesser ausgerüstet wird und sich in kurzen Abständen ärztlichen Untersuchungen unterzieht. Auch die Beseitigung des im Reaktor „verbrannten“ Treibstoffes ist schwierig, da er noch stark radioaktiv ist. Demgegenüber ist der Brennstofftransport, der den Standort von Wärmekraftwerken oft bestimmt, nicht problematisch, da die „Brennstoffmengen“ des Kernkraftwerkes nicht nach Güterzugladungen, sondern nur nach Kilogramm zählen.

In der Sowjetunion, dem Land, das als erstes „Atomstrom“ an das öffentliche Energienetz abgab, sind inzwischen weitere, größere Kernkraftwerke im Bau oder schon vollendet: Nowo-Woronesh mit einer Leistung von 420 MW, Belojarsk mit 400 MW, Trotsk mit 600 MW und andere. Auch transportable Kernkraftwerke, die aus mehreren Bausteinen rasch zusammengesetzt werden können und mit Flugzeugen zu transportieren sind, befinden sich in der Entwicklung.



*nicht nur
ein Physiker!*

Obleich es auf der Welt noch reichlich Uran gibt, wird schon eifrig daran gearbeitet, es als Rohstoff für Kernkraftwerke wieder überflüssig zu machen. Die umständliche Urangewinnung und die Beseitigung des strahlenden „Atom Mülls“ entfallen, wenn nicht die Spaltung von Atomkernen, sondern die Verschmelzung leichterer zu schwereren Atomkernen als Grundlage der Energiegewinnung dient.

Die Sonne macht uns diese Art der Energiegewinnung seit Jahrmillionen vor: Vereinigt man die Kerne des im Wasser in geringen Mengen enthaltenen „schweren“ Wasserstoffs zu Heliumkernen, so wird eine Energiemenge freigesetzt, die 1 l Wasser 2500 kg Rohbraunkohle gleichwertig werden läßt. In der Wasserstoffbombe ist diese Art der Verschmelzung bereits „gelingen“, sofern dieser Ausdruck hier angebracht ist. Die Verwirklichung einer langsamen, in jeder Phase kontrollierbaren Kernverschmelzung dagegen bereitet noch größte Schwierigkeiten. Doch es zeichnen sich bereits Wege zu ihrer Überwindung ab. Niemand zweifelt ernsthaft daran, daß die ersten Kernverschmelzungs-Kraftwerke in nicht allzu ferner Zukunft arbeiten werden. Dies wird um so eher der Fall sein, je eher die friedliebende Menschheit die Einstellung der Produktion von Kernwaffen erzwingt.

An anderer Stelle werden wir erfahren, daß man auch noch anderen Methoden der Energiegewinnung auf der Spur ist.

ENERGIE FÜR KONTINENTE

Die Spannungen steigen

Die Fernübertragung von Energie hat die Techniker beschäftigt, seit man überhaupt begonnen hatte, sich die Naturkräfte dienstbar zu machen. Anfänglich waren es nur geringe Entfernungen, die man überbrücken wollte. Da war beispielsweise ein Wasserfall, der eine Mühle hätte treiben können; aber die Mühle konnte nicht unmittelbar neben der Kraftquelle gebaut werden, weil das Gelände den Getreide- und Mehtransport unmöglich machte. An anderer Stelle wurde eine Weberei von der Wasserkraft des Flusses betrieben, aber es kam immer wieder zu Ausfällen und Schäden, weil das Hochwasser die Fabrik erreichte; der nahe Hügel blieb trocken, doch es gab keine Möglichkeit, die Kraft der Wasserräder dorthin zu übertragen. In den Städten wurde an vielen Stellen mechanische Antriebskraft benötigt; doch die Aufstellung einer Dampfmaschine war für einen Kleinbetrieb unrentabel.

Was hat man nicht alles unternommen, um diese Hindernisse zu beseitigen! Seilübertragungen und Hebelgestänge wurden aufgebaut, um eine Verbindung zwischen Wasserrad und Fabrik

zu schaffen. In manchen Städten wurden Rohrnetze verlegt, in denen Druckwasser oder Preßluft strömten, die als Antriebskraft verkauft wurden. Die Ergebnisse befriedigten nicht. Die Reibungs- und Druckverluste waren so groß, daß mechanische Kraftübertragungen auf wenige hundert Meter, Druckwasser- und Preßluftübertragungen auf einige Kilometer beschränkt blieben. Daher experimentierte man mit der elektrischen Kraftübertragung, sobald es Generatoren und Motoren gab. Auf der „Wiener Elektrischen Ausstellung 1873“ wurde eine Pumpe mit elektrischem Strom angetrieben, der in einem etwa 500 m entfernten, von einer Dampfmaschine gedrehten Generator erzeugt wurde. 1879 betrieb eine französische Zuckerfabrik Pflüge, die von Seilen gezogen wurden, mit elektrischem Strom, und 1882 wurde in München die Übertragung einer Leistung von etwa 300 W – das ist die Leistung eines Tauchsieders – auf eine Entfernung von 50 km demonstriert.

Das alles waren bescheidene Anfänge. Um so mehr Aufsehen erregte die Fernübertragung, die auf der „Frankfurter Internationalen Elektrischen Ausstellung 1891“ vorgeführt wurde. In Lauffen am Neckar, etwa 175 km entfernt, trieb eine Wasserturbine einen Drehstromgenerator mit einer Leistung von 220 kW. Er erzeugte eine Spannung von 50 V, die auf etwa 14 000 V transformiert wurde. Diese Hochspannung wurde mit einer Fernleitung nach Frankfurt übertragen. Die Leitung, aus drei Kupferdrähten von etwa 4 mm Durchmesser bestehend, wurde über 3000 Stangen verlegt. In Frankfurt wurde die Spannung durch Transformatoren herabgesetzt. Die Energie aus Lauffen speiste 1000 Glühlampen und die Pumpe eines künstlichen Wasserfalls.

Alle Welt bewunderte das ausgeführte Projekt. Die Fachleute aber rechneten, und ihre Ergebnisse bestätigten die Richtigkeit des neuen Weges der Energiefernübertragung: Über 70% der in Lauffen gewonnenen Elektroenergie standen in Frankfurt zur Verfügung. Die Anlage besaß einen Wirkungsgrad, der den aller anderen Übertragungen bei weitem übertraf.

Doch warum die zweimalige Spannungswandlung, in Lauffen „nach oben“ und in Frankfurt wieder „nach unten“? Hätte man nicht die Transformatoren sparen und die Energie unmittelbar übertragen können?

Die elektrische Leistung ist, wie wir wissen, durch das Produkt aus Spannung und Stromstärke gegeben; es gilt:

$$N = U \cdot I$$

Betrachten wir diese Formel, scheint es gleichgültig zu sein, ob eine bestimmte Leistung mit hoher Spannung und geringer Stromstärke oder mit geringer Spannung und hoher Stromstärke übertragen wird. Doch man muß auch die dritte elektrische

Grundgröße berücksichtigen: Jede Leitung besitzt elektrischen Widerstand. Sie wird durch den fließenden Strom erwärmt, und die dazu nötige Leistung geht der Nutzleistung am Ende der Leitung verloren. Diese Leistung aber hängt unmittelbar von der Stromstärke und vom Widerstand ab:

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

Jede Verdopplung der Stromstärke bedeutet eine Vervielfachung der Verlustleistung, jede Verdreifachung der Stromstärke bedingt neunfachen Leistungsverlust.

Rechnen wir ein einfaches Beispiel durch. Es sei eine Leistung von 1 kW in einer Doppelleitung auf 50 km zu übertragen. Der Generator liefere eine Spannung von 1000 V, so daß in der Leitung ein Strom von 1 A fließen muß. Für die Übertragungsleitung wählen wir Kupferdraht von 4 mm² Querschnitt. Die gesamte Leitungslänge beträgt 100 km; man kann ausrechnen, daß diese Leitung einen Gesamtwiderstand von 450 Ω besitzt. Bei der Stromstärke 1 A würden die Leistungsverluste betragen:

$$\begin{aligned} N &= 1 \text{ A}^2 \cdot 450 \Omega \\ &= 450 \text{ W} \\ &= 0,450 \text{ kW} \end{aligned}$$

Wir erkennen, daß es sinnlos wäre, die gewünschte Stromstärke durch den Draht zu leiten. Die Verluste wären beinahe halb so groß wie die zu übertragende Leistung.

Erhöhen wir die Spannung auf 20 000 V, so braucht in der Leitung nur noch ein Strom von 0,05 A zu fließen. Rechnen wir wieder die Verluste nach, ergibt sich:

$$\begin{aligned} N &= \frac{25}{10000} \text{ A}^2 \cdot 450 \Omega \\ &= 1,125 \text{ W} \\ &= 0,001125 \text{ kW} \end{aligned}$$

Die Verluste sind jetzt so gering, daß man sie gegenüber der zu übertragenden Leistung in vielen Fällen völlig vernachlässigen kann.

Theoretisch gibt es noch eine andere Möglichkeit, die Verluste zu vermindern: Man müßte den Durchmesser des Leiters vergrößern, damit sein Widerstand entsprechend sinkt. Doch in der Praxis scheidet diese „Lösung“ aus. Bei der Lauffener Übertragung wog der Kupferdraht 60 000 kp. Wollte man, wie es heute allgemein üblich ist, Leistungen von vielen Megawatt übertragen, brauchte man statt der Drähte so dicke Kupferschienen, daß alles Kupfer der Welt nicht zu ihrer Herstellung ausreichte.

Ziehen wir einen Schlußstrich: Die Fernübertragung von Elektroenergie ist nur sinnvoll, wenn man mit möglichst hohen Spannungen, aber niedrigen Stromstärken arbeitet. Am Verwendungsort muß die Spannung soweit herabgesetzt werden, daß sie dem Verbraucher ohne kostspielige Isolierungs- und Sicherheitsmaßnahmen zur Verfügung gestellt werden kann; am Gewinnungsort muß sie, da Generatoren nur relativ niedrige Spannungen erzeugen, auf den für die Fernleitung nötigen Wert erhöht werden. Dieses Umspannen ist nur bei Wechsel- und bei Drehstrom auf einfache Weise, nämlich mit Transformatoren, möglich. Das ist ein Hauptgrund dafür, daß alle weiträumigen Energienetze Wechsel- beziehungsweise Drehstrom führen.

Die Übertragungsspannungen stiegen rasch. 1912 wurde von Lauchhammer nach Berlin die erste europäische Drehstromfernleitung mit einer Spannung von 100 kV in Betrieb genommen. 15 Jahre später gab es schon Leitungen für 220 kV. Diese Spannung ist heute weit verbreitet und wird in großen Teilen des Energieverteilungsnetzes unseres Landes benutzt.

Nicht allein das 220-kV-Netz wird weiter ausgebaut. Von den neuen Energieerzeugungszentren der Republik werden Übertragungsleitungen für eine Spannung von 380 kV nach Berlin, in die Halle-Leipziger Gegend und in den Raum von Karl-Marx-Stadt führen, um den Energiehunger der zahlreichen Industriebetriebe dieser Gebiete zu stillen.

Bei den großen Entfernungen, die in anderen Ländern oft zwischen den Kraftwerken und den wichtigsten Energieabnahmgebieten liegen, ist häufig die 380-kV-Spannung noch nicht das wirtschaftliche Maximum. Darum ist man in der Sowjetunion dabei, wichtige Energiefernleitungen auf eine Spannung von 525 kV umzustellen. Es laufen Entwicklungsarbeiten, deren Ziel noch höhere Spannungen sind.

Die 380- beziehungsweise 220-kV-Spannung wird nicht auf einmal, sondern in mehreren Stufen herabgesetzt. Oft transformiert man sie zunächst auf 110 kV. Mit dieser Spannung wird ein Netz gespeist, das einen Bezirk oder einen Landesteil erfaßt. In regional noch enger begrenzten Netzen wird die Spannung nochmals vermindert – etwa auf 6 bis 30 kV; in unmittelbarer Nähe des Verbrauchers setzt man sie in „Transformatorhäuschen“ auf die uns gewohnte Netzspannung von 380/220 V herab.

Trotz der hohen Übertragungsspannungen ist man bestrebt, den Leitungswiderstand so niedrig wie möglich zu halten. Kupferleitungen, die einen sehr geringen Widerstand aufweisen, sind zu kostbar und werden daher mehr und mehr durch Aluminium ersetzt. Den höheren spezifischen Widerstand des Aluminiums gleicht man durch größeren Leitungsquerschnitt aus.

Die Zugfestigkeit des Aluminiums ist geringer als die des Kupfers. Das ist ein Nachteil; denn Freileitungen werden nicht nur durch ihr Eigengewicht, sondern zusätzlich durch Schnee,





Reif, Eis oder Wind mechanisch beansprucht. Um die geringere Zugfestigkeit des Aluminiums auszugleichen, stellt man für Freileitungen Aluminiumseile mit Stahleinlage her, die den größten Teil der mechanischen Beanspruchung auffängt.

Freileitungen werden an Isolatoren aufgehängt. Diese sind so konstruiert, daß sie möglichst wenig verschmutzen und Strömen, die von Schmutzteilchen zu Schmutzteilchen „kriechen“ könnten, einen möglichst langen Weg und damit hohen Widerstand entgegensetzen. Sehr oft werden die Isolatoren zusätzlich mit feuchtigkeits- und schmutzabweisenden Schutzschichten versehen.

Sind die Verluste durch die Kriechströme sehr gering, so bereitet eine andere Erscheinung den Energiefachleuten schon mehr Sorgen. Unter einer Hochspannungsleitung ist bisweilen ein leise zischendes, knatterndes Geräusch zu vernehmen. Bei Nacht scheinen die Leiterseile manchmal von einer schwach leuchtenden, glimmenden Hülle umgeben zu sein.

Ursache des Zischens und Leuchtens ist der „Kóronaeffekt“, eine besondere Art der Spitzenwirkung (s. S. 50). Durch das starke elektrische Feld des Leiters wird die Luft in unmittelbarer Leiternähe bis zu einem gewissen Maße elektrisch leitend. Es fließt Energie vom Leiter ab.

Diese Verluste können unangenehm groß werden. Man hat zum Beispiel gemessen, daß auf einem 20-mm-Kupferseil durch den Koronaeffekt bei einer Spannung von 380 kV und sonnigem Wetter je Leitungskilometer 113 kW verlorengehen; bei Rauheif und feuchtem Wetter erhöht sich dieser Wert bereits auf 150 kW.

Man sucht den Koronaverlusten auf verschiedene Weise beizukommen. Da sie um so stärker in Erscheinung treten, je mehr die Oberfläche des Leiters gekrümmt ist, liegt es nahe, Leiter größeren Durchmessers mit entsprechend schwach gekrümmter Oberfläche zu verwenden. Das wäre jedoch unwirtschaftlich, weil man, um Material zu sparen, den Leiterquerschnitt niedrig halten will. Einen Ausweg bietet die Anwendung von Hohlleiterseilen. Trotz geringer Oberflächenkrümmung und großen Außendurchmessers bleiben die eigentlichen Leiterquerschnitte und der Materialverbrauch gering. Annähernd der gleiche Effekt läßt sich auch auf bedeutend einfachere Weise erzielen: Man nimmt statt eines stärkeren Leiterseiles mehrere dünne Vollseile, die parallel und in geringem Abstand voneinander gespannt werden. Häufig bilden die Seile dieses „Leiterbündels“ die Ecken eines Dreiecks oder Vierecks. Bereits bei der Aufteilung eines Leiterseils in zwei dünnere Seile ergeben sich erhebliche Verlustminderungen.

Sehr wichtig ist es, Freileitungen gegen Blitzschläge und ihre Folgen zu schützen. Einmal sind die Leitungen wegen ihrer freistehenden, hohen Stahlgittermasten an sich schon blitzgefähr-

det; zum anderen kann bereits ein in der Nähe einer Freileitung einschlagender Blitz in der Leitung sehr hohe Spannungen induzieren. Man hat zahlreiche Hilfsmittel ersonnen, die die Gefahr von Blitzschäden und Überspannungen auf ein Mindestmaß herabsetzen. Bereits die von Mast zu Mast über den Leitungen geführten und mit dem geerdeten Mast verbundenen „Erdseile“ stellen einen wirksamen Schutz dar. Auf keinen Fall ist es wahr, daß Hochspannungsleitungen Gewitter „anziehen“.

Neben Freileitungen werden auch Kabel für die Energieübertragung verwendet. Sie finden sich vorwiegend in dicht besiedelten Gebieten oder bei der Überbrückung größerer Wasserstrecken. Sehr große Entfernungen sind jedoch, wenn Wechsel- oder Drehstrom fortgeleitet werden soll, nicht mit Kabeln zu bewältigen. Hier würde sich zum Beispiel schon die Kapazität zwischen den Leitern des Kabels störend bemerkbar machen.

Das Netz ist geknüpft

Fiel eine Blockzentrale, eines jener ersten Kraftwerke, aus, saß man ringsum im Dunkeln. Das wäre heute noch so, wenn ein Kraftwerk nur *sein* Gebiet und *seine* Kunden versorgte – es sei denn, es gäbe so viele Reservemaschinen und -einrichtungen, daß sich Betriebsstörungen sofort ausgleichen ließen.

Doch Kraftwerke sind heute sehr selten auf sich allein gestellt. Meistens arbeiten sie im „Verbundbetrieb“. Sämtliche Kraftwerke eines Landes werden zu gemeinsamer Arbeit an *ein* vielfach verzweigtes Energienetz angeschlossen. Zwar kommt man auch beim Verbundbetrieb nicht ohne Reserveanlagen aus, aber die Kosten und der technische Aufwand lassen sich weit niedriger halten als im „Inselbetrieb“, bei dem jedes Kraftwerk für sich arbeitet. Sehr selten fallen mehrere Kraftwerke zu gleicher Zeit aus. Es genügt daher, an wenigen Stellen des Netzes Reserveeinrichtungen vorzusehen, die immer dann einspringen, wenn in einem beliebigen Kraftwerk des Verbundnetzes eine Havarie auftritt.

Doch die Vereinfachung der „Reservehaltung“ ist nur einer der Gründe für die Einführung des Verbundbetriebes. Stellen Sie sich vor, Ihr Betrieb bezöge seinen Strom von einem Wasserkraftwerk an einem kleinen Fluß und es gäbe kein Verbundnetz. In den trockenen Sommermonaten und während langer Frostperioden könnte diese Anlage bestimmt nicht genug Energie liefern; in den wasserreichen Monaten flößen viele Tausende Kubikmeter ungenutzt über das Wehr. Einmal Überschuß, einmal Mangel – und zu gleicher Zeit würde die Leistungsfähigkeit des 50 km entfernten Wärmekraftwerkes vielleicht nicht ausreichen oder aber es wüßte mit seinem Energieüberschuß nichts anzufangen! Der Verbundbetrieb kann die Schwankungen im Energieangebot ausgleichen.

Viel stärker schwankt allerdings der Energiebedarf. Zunächst gibt es einen Unterschied zwischen Sommer und Winter. An einem kurzen und kalten Wintertag wird weit mehr Elektroenergie als während eines Sommertages verbraucht. Folgeschwerer für die Energiewirtschaft sind jedoch die Bedarfschwankungen im Laufe eines Tages. Wir erkennen sie aus der „Belastungskurve“, die den Energieverbrauch eines größeren Gebietes während 24 Stunden widerspiegelt.



Der „Sommerkurve“ und der „Winterkurve“ ist gemeinsam, daß der Energiebedarf nachts stark abfällt. In den Wohngebieten wird sehr wenig Strom bezogen, Obus und Straßenbahn stehen still, zahlreiche Betriebe arbeiten nicht.

Die Morgenstunden bringen einen steilen Bedarfsanstieg, besonders während der Wintermonate. In den Wohnungen brennen zahlreiche Lampen, Einsatzwagen von Straßenbahn und Obus helfen den Berufsverkehr bewältigen, die Straßenbeleuchtung brennt noch, die Betriebe beginnen zu arbeiten. Die „Morgenspitze“ hält nicht lange an; im Sommer ist sie im allgemeinen weniger deutlich ausgeprägt.

Tagsüber schwankt der Energiebedarf nicht sehr. Im Winter steigt er jedoch bereits am Nachmittag wieder allmählich zur „Abendspitze“ an. Sie entsteht durch das Zunehmen des Berufsverkehrs, durch die von den Betrieben bezogene Elektroenergie, durch den erhöhten Strombedarf der Haushalte. Auch Rundfunk- und Fernsehgeräte sind an der Abendspitze beteiligt. In den späten Abendstunden geht der Energiebedarf wieder zurück. Soll die Energieversorgung reibungslos funktionieren, müssen die Kraftwerke eines Verbundnetzes in der Lage sein, den Spitzenbedarf zu decken. Das ließe sich in jedem Fall durch die

Errichtung entsprechend vieler und leistungsfähiger Kraftwerke erreichen. Es wäre aber sehr unwirtschaftlich, wollte man allein diesen Weg beschreiten. Ein Kraftwerk arbeitet am ökonomischsten, wenn es ständig ausgelastet wird. Orientierte sich die Energieversorgung aber nur auf die Deckung der Spitzenlast, wäre das nicht der Fall. Außerdem kann man die Kesselanlagen eines Wärmekraftwerkes dem wechselnden Energiebedarf nicht schnell genug anpassen; selbst ein Wasserkraftwerk darf sich oft nicht ausschließlich nach dem augenblicklichen Energiebedarf richten, sondern muß die übrigen Wasserbenutzer berücksichtigen.

Um zu einem wirtschaftlichen Verbundbetrieb zu kommen, muß man vor allem bemüht sein, die Belastungsspitzen abzuschneiden und den Energiebedarf gleichmäßig über den ganzen Tag zu verteilen. Wenn auch das Ideal – gleichmäßiger Energieverbrauch über 24 Stunden – nicht zu erreichen ist, so kann man ihm doch nahekommen. Das ist vor allem eine wichtige Aufgabe der Stromverbraucher – und damit werden wir alle unmittelbar angesprochen.

Presse und Rundfunk geben regelmäßig die „Spitzenzeiten“ besonders hohen Energiebedarfs bekannt. Es ist gewiß nicht zuviel verlangt, wenn wir uns ein wenig nach dieser Ankündigung richten. Müssen denn im Wohnzimmer außer der Leselampe noch 6 Birnen in der Deckenleuchte brennen? Muß die Heizung wirklich eingeschaltet sein? Es ist bestimmt nicht böser Wille, der uns manchmal zu „Wattfressern“ werden läßt, aber auch Unachtsamkeit und Gleichgültigkeit schaden der Volkswirtschaft. Die Ausrade „eine 60er-Birne macht es nicht“ ist nicht stichhaltig. In unserer Republik gibt es einige Millionen 60er-Birnen, die während der Spitzenzeiten entbehrlich wären. Der durch ihr Ausschalten gesparte Strom entspräche immerhin der Leistungsfähigkeit mehrerer großer Turboaggregate.

Betriebe sind gesetzlich dazu verpflichtet, die Spitzenzeiten zu beachten und dadurch Energiebedarf und Energieangebot möglichst in Einklang zu bringen. Auch der Dreischichtenbetrieb, bei dem der Energiebedarf während 24 Stunden nur geringfügig schwankt, „bröckelt“ die Spitzen der Belastungskurve ab. Künftig wird man noch mehr als jetzt bestrebt sein müssen, besonders energieverzehrende Arbeitsgänge auf die Nachtstunden zu verlegen. Der billige Nachtstrom für Haushalte (s. S. 22) ist dem Abbau des Energie-Spitzenverbrauchs gleichfalls förderlich.

Endlich läßt sich die Schärfe der Belastungsspitzen auch dadurch mindern, daß man die Anfangs- und Schlußzeiten verschiedener Betriebe staffelt. In der langen Frostperiode des Winters 1962/63 wurde auf diese einfache Weise die Energieversorgung in unserer Republik fühlbar entlastet.

Trotz aller ausgleichenden Maßnahmen bleiben gewisse Last-



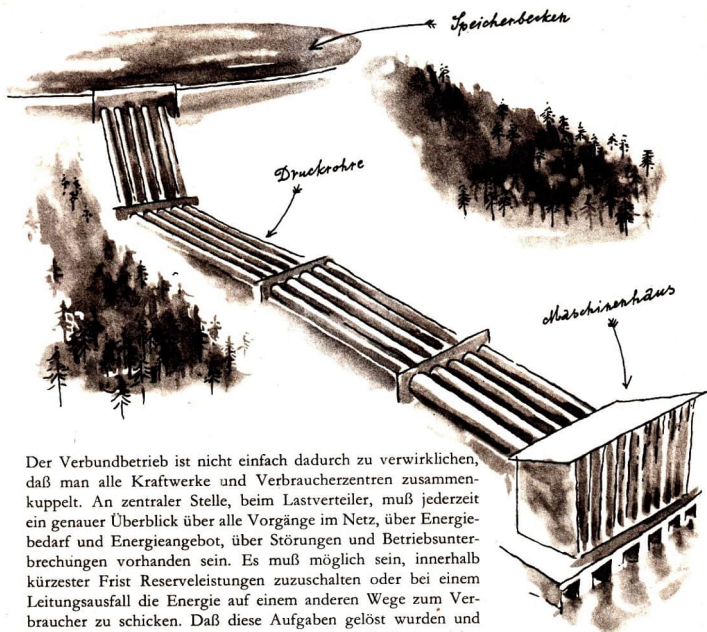


spitzen stehen, die abzudecken sind. Das übernehmen „Spitzenkraftwerke“. Es sind Anlagen, die im allgemeinen keine sehr große Leistung besitzen müssen, dafür aber schnell anlaufen und wieder auslaufen sollen. Kleinere Talsperren- oder Rohrbahnkraftwerke sind gut als Spitzenkraftwerke geeignet. In den lastschwachen Zeiten steigt der Wasserspiegel ihres Speichers, während der Spitzenzeiten wird ihm eine erhöhte Wassermenge entnommen. Auch Kraftwerke, die von Gasturbinen angetrieben werden, eignen sich gut zur Spitzenlastdeckung. In unserer Republik entstand das erste Werk dieser Art bei Erfurt. Es leistet 25 bis 30 MW und braucht zum Anlaufen nur 10 bis 20 Minuten. Weitere Gasturbinenanlagen werden ihm folgen.

Schon mehrfach haben wir bedauert, daß sich Elektroenergie nicht unmittelbar in großen Mengen speichern läßt. Wäre das der Fall, hätten wir uns alle Abschnitte über Spitzenlast sparen können. In lastschwachen Zeiten würden die Kraftwerke die Speicher füllen, die in den Spitzenzeiten zusätzlich entleert werden könnten. Eine „Konservierung“ größerer Energiemengen ist jedoch zur Zeit nur auf dem Umweg über die „Pumpspeicherung“ möglich. Mit der überschüssigen Elektroenergie der Nachtstunden pumpt man Wasser in ein hochgelegenes Speicherbecken. Bei erhöhtem Energiebedarf strömt dieses Wasser durch Druckrohre auf Turbinen, die Generatoren treiben. Beim Speichern wird den Generatoren Energie aus dem Verbundnetz zugeführt. Sie arbeiten dann als Motoren und treiben die Pumpen an.

In der Deutschen Demokratischen Republik schenkt man Pumpspeicherwerken besondere Beachtung. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde das Pumpspeicherwerk Niederwartha bei Dresden wieder aufgebaut, modernisiert und erweitert. Diese Anlage, die 1930 in Betrieb genommen worden war, galt seinerzeit als das erste leistungsfähige Pumpspeicherwerk der Welt. Es leistet heute 129 MW, das ist die doppelte Leistung des ursprünglichen Werkes. Das Speicherbecken faßt etwa 2 Millionen m^3 Wasser; mit ihrer Hilfe lassen sich 560 000 kWh gewinnen. Über vier Stunden kann das Werk mit diesem Wasservorrat seine volle Leistung an das Energienetz abgeben. Ein weiteres rekonstruiertes Pumpspeicherwerk ist das Werk Hohenwarte I, an der Saale. Es leistet 39 MW.

Seit 1956 ist ein besonders leistungsfähiges Werk in Bau, das Pumpspeicherwerk Hohenwarte II (früher Amalienhöhe genannt). Seine acht Maschinensätze werden im Endausbau eine Leistung von 320 MW zur Deckung der Spitzenbelastung abgeben und innerhalb weniger Minuten angefahren werden können. Das Speicherbecken faßt mehr als 3 Millionen m^3 Wasser, mit dem sich 2 Millionen kWh gewinnen lassen. Erwähnt sei schließlich noch das Speicherwerk Wendefurt im Harz, das eine zusätzliche Leistung von 80 MW abgeben wird.



Der Verbundbetrieb ist nicht einfach dadurch zu verwirklichen, daß man alle Kraftwerke und Verbraucherzentren zusammenkuppelt. An zentraler Stelle, beim Lastverteiler, muß jederzeit ein genauer Überblick über alle Vorgänge im Netz, über Energiebedarf und Energieangebot, über Störungen und Betriebsunterbrechungen vorhanden sein. Es muß möglich sein, innerhalb kürzester Frist Reserveleistungen zuzuschalten oder bei einem Leitungsausfall die Energie auf einem anderen Wege zum Verbraucher zu schicken. Daß diese Aufgaben gelöst wurden und daß wir meistens von einer Störung im Netz überhaupt nichts merken, weil die Stromversorgung so gut wie pausenlos weiterläuft, verdanken wir dem Zusammenspiel von Nachrichten-, Meß- und Regeltechnik. Über die Hochspannungsleitungen laufen, wie wir schon erwähnten, nicht nur große Energiemengen, sondern auch Meßwerte, Steuerimpulse und Ferngespräche. Der Lastverteiler sieht an seinen Instrumenten, was in jedem Kraftwerk vorgeht, er kann sich ohne Wartezeit mit jedem Knotenpunkt, mit jeder Schaltstation des Netzes in Verbindung setzen. Da Kraftwerke mehr und mehr „unbemannt“ laufen, gibt er oft selbst die notwendigen Steuerkommandos.

Eine höhere Stufe erreicht der Verbundbetrieb durch den Einsatz elektronischer Rechenautomaten. Das Verbundnetz des Moskauer Gebietes, dessen Energie teilweise über Entfernungen von mehr als 1000 km transportiert werden muß, wird von Rechenautomaten gesteuert, die für einen reibungslosen Betrieb sorgen und die Werke und Leitungen außerdem so schalten und steuern, daß der Betrieb möglichst wirtschaftlich läuft.

Strom über die Grenzen

Wie groß, wie weitläufig soll ein Verbundsystem sein? Auf diese Frage gibt es eine einfache Antwort: Je größer, je weitläufiger, desto besser. In der Sowjetunion existieren mehrere große, aber weit auseinanderliegende Verbundnetze, die ständig erweitert und ausgebaut werden, zum Beispiel ein Netz für die europäischen Gebiete der Sowjetunion, ein Netz für die mittelasiatischen Sowjetrepubliken und das sibirische Verbundnetz. Was wird gewonnen, wenn diese Netze, wie das Programm der KPdSU es vorsieht, miteinander verknüpft werden?

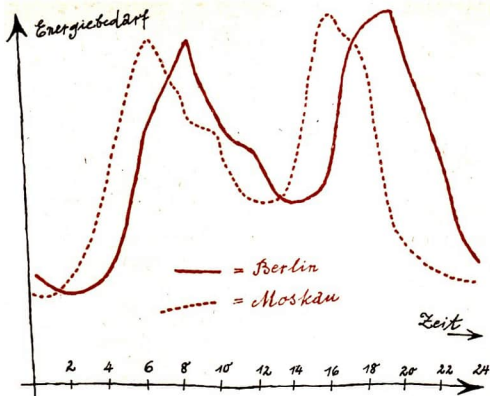
Die sowjetischen Energiefachleute stehen vor einer besonderen Schwierigkeit, die sich am besten durch die Gegenüberstellung von zwei Zahlenpaaren deutlich machen läßt: 1960 betrug der Bevölkerungsanteil des europäischen Gebietes 85%, der der asiatischen Gebiete 15% der Gesamt Einwohnerzahl. Von den Energiereserven dagegen liegen 13% im europäischen, 87% im asiatischen Teil der UdSSR. Zwar wird sich, nicht zuletzt durch die industrielle Erschließung Sibiriens, das Verhältnis der Bevölkerungszahlen in Richtung auf einen Ausgleich verschieben, aber noch für viele Jahre wird es nötig sein, große Energiemengen vom Osten nach dem Westen der UdSSR zu transportieren. Werden die Verbundnetze miteinander verknüpft, ist dieser Transport möglich, und die westlichen Teile der UdSSR können vom Energieüberschuß der östlichen Gebiete zehren.

Im Zuge dieser großartigen Pläne wurden seit 1959 in der UdSSR 100 000 km Hochspannungsleitungen für Spannungen über 35 kV gebaut. Weitere 115 000 km werden bis 1965 folgen. Zur Elektrifizierung der Landwirtschaft sollen in den nächsten 15 Jahren 3 Millionen km Niederspannungsleitungen verlegt werden. Was würde der bereits genannte H. G. Wells, der schon den GOELRO-Plan für undurchführbar hielt, zu diesen Zahlen sagen?

Noch einen gewaltigen Vorteil hat diese Verknüpfung: Wenn in Wladiwostok die Straßenbeleuchtung eingeschaltet wird, ist es in Moskau heller Mittag. Geht in Wladiwostok die Sonne auf, liegt Moskau in tiefem Schlummer. Durch die große Ost-West-Erstreckung der Sowjetunion beginnt und endet der Tag in verschiedenen Teilen des Landes mit großem Zeitunterschied. Entsprechend verschieben sich auch die Spitzenzeiten. Bereits zwischen Berlin und Moskau wäre, wie die Belastungskurven zeigen, der Unterschied in den Spitzenzeiten deutlich ausgeprägt. Werden die Verbundnetze der auseinanderliegenden Landesteile zusammengeschaltet, lassen sich die Spitzenbelastungen gegeneinander austauschen: Das europäische Verbundnetz kann zum Beispiel mit seinem Nachtstrom die Morgenspitze des fernen Ostens abdecken; der Osten wieder schickt Nachtstrom nach Westen, um dort die Abendspitze zu füllen. Man hat errechnet, daß allein durch einen solchen Austausch mehrere Großkraftwerke ihre Energie für andere Zwecke zur Verfügung stellen könnten.

*Mr. Wells
hat sich
geirrt*



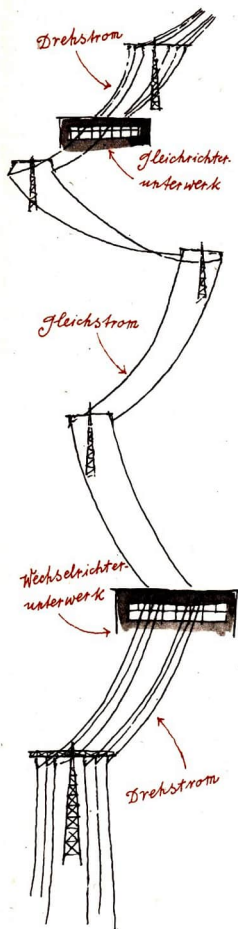


Beim Zusammenschluß der Verbundnetze sind Strecken von 1000 bis 2000 km zu überbrücken. Doch bei Entfernungen von mehr als 600 oder 700 km arbeitet die Drehstromübertragung nicht mehr stabil genug; außerdem wird sie unwirtschaftlich. Es machen sich störende Einflüsse bemerkbar, die man nur durch Zwischenstationen mit umfangreichen und teuren Kompensationseinrichtungen beheben könnte.

Seit mehr als 20 Jahren wird daher eine andere Art der Energieübertragung diskutiert und erprobt, die Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung. Bereits während des zweiten Weltkrieges wurde in Deutschland eine Versuchsstrecke zwischen Vockerode und Berlin aufgebaut; sie konnte jedoch nicht mehr in Betrieb genommen werden.

Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung heißt, daß auf den Fernleitungen kein Drehstrom, sondern Gleichstrom sehr hoher Spannung fließt. Das bedeutet keinesfalls die Rückkehr zu den Gleichstromnetzen aus der Anfangszeit der Elektrotechnik! An den Generatoren, den Transformatoren, an den regionalen Verbundnetzen und bei den Stromverbrauchern ändert sich nichts. Nach wie vor wird Drehstrom erzeugt und verteilt. Nur auf den langen Transportstrecken wird die Elektroenergie als Gleichstrom befördert.

Am Anfang der Gleichstrom-Übertragungsstrecke steht ein „Gleichrichterunterwerk“. Hier wird der ankommende Drehstrom auf eine Spannung von mehreren hunderttausend Volt transformiert und anschließend in Gleichstrom verwandelt. Dieser geht nun auf die Reise – entweder über eine Freileitung oder über ein Kabel. Am Endpunkt der Strecke fließt er in ein „Wechselrichterunterwerk“ und wird in Drehstrom zurückverwandelt.



Die Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung ist auf weiten Strecken dem Drehstrom überlegen. Die Leitungslänge wirkt sich nicht auf die Stabilität der Übertragung aus. Die Fernleitungen werden billiger; denn für eine Drehstromübertragung sind drei Leiterseile nötig, für eine Gleichstromübertragung dagegen nur zwei. Unter Umständen kann man sogar noch eines der beiden Leiterseile sparen und das Erdreich für die Stromrückführung benutzen. Die Koronaverluste sind bei einer Gleichstromübertragung geringer als auf einer Drehstromfernleitung gleicher Leistungsfähigkeit. Auch eine Kabelübertragung auf große Entfernungen bereitet keine unüberwindlichen Schwierigkeiten, da bei Gleichstrom die Kabelkapazität keine wesentlichen Energieverluste mit sich bringt.

Diesen Vorteilen stehen einige Nachteile gegenüber. Die Gleichrichter- und Wechselrichterunterwerke benötigen sehr teure und komplizierte Einrichtungen. Auch lassen sich mit ihnen zur Zeit noch nicht derart hohe Leistungen bewältigen, wie sie für die Fernstreckenübertragung wünschenswert wären. Außerdem kann Energie bei der Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung nach dem derzeitigen Stand der Technik nur an den Leitungsendpunkten zugeführt und abgenommen werden, nicht aber unterwegs.

Das sind Hindernisse, die man beseitigen wird. In mehreren Ländern werden Gleichstrom-Höchstspannungsübertragungen betrieben, um Erfahrungen zu sammeln. Die größte Anlage dieser Art verbindet das Wasserkraftwerk Wolgograd mit dem Donbass. Bei einer Spannung von 800 kV werden 750 MW über fast 500 km Entfernung übertragen. Weitere, längere Übertragungsstrecken werden in den nächsten Jahren folgen, und man spricht bereits von Spannungen bis 2 Millionen Volt.

Kleinere Länder haben weniger Möglichkeiten eines „inneren“ Energieaustauschs als die Sowjetunion. An seine Stelle tritt immer häufiger eine internationale Zusammenarbeit. Erwähnen wir zunächst einen Austausch, der zugleich ein interessantes Beispiel für eine Gleichstromfernübertragung ist. Seit Ende 1961 ist zwischen England und Frankreich ein Gleichstromkabel in Betrieb, das auf dem Grunde des Ärmelkanals verläuft. In den Wochen der Schneeschmelze gibt Frankreich seinen aus Wasserkraftwerken stammenden Energieüberschuß an das englische Netz ab. Während der trockenen Sommermonate dagegen, wenn die französischen Flüsse wenig Wasser führen, sind die englischen Wärmekraftwerke nicht immer voll ausgelastet – die Stromlieferung erfolgt dann in umgekehrter Richtung. Neben diesem „Saisonausgleich“ dient das Kabel auch zur Deckung der täglichen Spitzenbelastung. Wenn auch die Zeitdifferenz zwischen England und Frankreich nur eine Stunde ausmacht, wird doch die „Schärfe“ der Spitzen erheblich gemildert.

In der ČSSR ist wegen günstiger natürlicher Bedingungen der Anteil der Wasserkraft an der Energieerzeugung weit höher

als in der DDR. Da beide Länder auch in der Energieversorgung zusammenarbeiten, können die tschechoslowakischen Wasserkraftwerke unseren Spitzenbedarf befriedigen helfen. Umgekehrt können in belastungsschwachen Zeiten die Wärmekraftwerke der DDR einen Teil des tschechischen Energiebedarfs decken. Beide Länder haben Vorteile von diesem Austausch. Die vorhandenen Anlagen werden besser ausgenutzt. Bei gleicher nutzbarer Anschlußleistung kann die Gesamtleistung beider Energienetze geringer sein, als wenn beide Netze für sich betrieben würden.

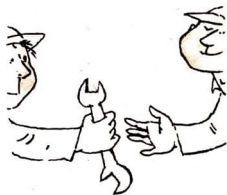
Auch eine andere Art des Austausches ist möglich. Das Kraftwerk „Friedensgrenze“ in Hirschfelde liefert Strom in die Volksrepublik Polen. Dafür wird das Werk mit Braunkohle aus den polnischen Gruben Turow I und II beliefert.

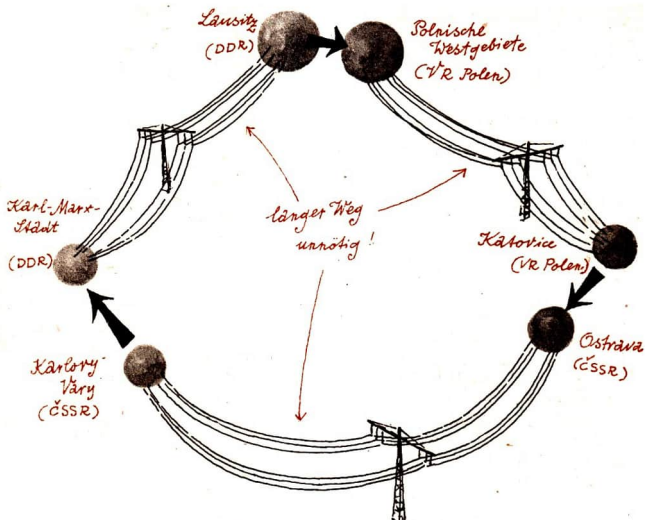
Das alles sind nur Teile eines in der Welt bisher einmaligen, zum Teil bereits verwirklichten Planes. Er sieht die Schaffung eines internationalen Elektroenergieverbundnetzes in den Ländern des Rates für gegenseitige Wirtschaftshilfe vor.

Bereits 1960 wurden die Verbundnetze der ČSSR, Volkspolens und der DDR miteinander verknüpft. Teile Ungarns und der Sowjetunion arbeiten ebenfalls schon in diesem gemeinsamen Netz. Bis 1965 werden neue Übertragungsleitungen zwischen der UdSSR und der ČSSR, der UdSSR und der Rumänischen Volksrepublik und zwischen der Rumänischen und der Bulgarischen Volksrepublik in Betrieb genommen werden. Nach der Vereinigung der Energienetze der Sowjetunion werden die Länder des Rates für gegenseitige Wirtschaftshilfe über ein Energienetz verfügen, das vom Stillen Ozean bis zur Elbe, von Murmansk bis zum Schwarzen Meer reicht.

In diesem Netz wird wegen der großen Zeitunterschiede ein wirkungsvoller Spitzenausgleich möglich sein. Die Generalreparatur von Kraftwerken kann zwischen den verschiedenen Ländern so abgestimmt und vorgenommen werden, daß sich der durch die Stillsetzung unvermeidliche Energieausfall in der Volkswirtschaft nicht bemerkbar macht. Die „Havariehilfe“ wird durch den Zusammenschluß der Energienetze ebenfalls vereinfacht.

Sogar Transportverluste, die die Elektroenergie auf ihrem Wege erleidet, lassen sich herabsetzen. Ein Beispiel dafür ist das „Große Karussell“: In den westlichen Teilen Polens gibt es keine Großkraftwerke, man müßte die Energie aus großer Entfernung heranzuführen, etwa aus dem oberschlesischen Industriegebiet. Die Gegend um Ostrava in der ČSSR hat gleichfalls einen hohen Energiebedarf, der in einem rein nationalen Verbundnetz nur durch Energiezufuhr über größere Entfernung zu decken wäre. Vor einer ähnlichen Situation stünde bei uns der Raum um Karl-Marx-Stadt, in dem zahlreiche große Industriebetriebe konzentriert sind. Hier müßte Energie aus der Lausitz herangeschafft werden. Das Große Karussell verkürzt die Reisewege des elektrischen





schen Stromes erheblich: Wir liefern über kurze Zubringerstrecken Energie in die polnischen Westgebiete. Der Raum um Ostrava in der ČSSR bezieht Energie aus den nahegelegenen polnischen Großkraftwerken, und im Ausgleich dafür schickt die ČSSR Strom aus dem Gebiet um Karlovy Vary in den Raum um Karl-Marx-Stadt.

Damit das internationale Verbundnetz der RGW-Länder reibungslos und möglichst wirtschaftlich arbeiten kann, muß es von zentraler Stelle geleitet werden.

Anfang 1963 hat in Prag die „Zentrale Dispatcherverwaltung“ ihre Tätigkeit aufgenommen. Ihr „Kommandostand“ steht in direkter Verbindung mit den nationalen Dispatcherzentralen und kann über ein eigenes Fernmeldenetz notwendige Entscheidungen unverzüglich an die verschiedenen Länder weitergeben. In Kürze werden zahlreiche Fernmeßanlagen das Fernmeldenetz wirkungsvoll ergänzen.

Fachleute aus den Ländern des Rates für gegenseitige Wirtschaftshilfe sind die „Besatzung“ der Dispatcherzentrale. 1967 wird in diesem internationalen Verbundnetz – dem größten der Welt – eine Leistung von 60 000 MW vereint sein und den Partnern zugeführt werden. 860 Millionen Menschen müßten ihre ganze Muskelkraft einsetzen, um auf die gleiche Leistung zu kommen.

ELEKTRONEN UNTERWEGS

Sprung ins Vakuum

Erwärmen wir Wasser, wird die Bewegung seiner Moleküle heftiger. Bei einer bestimmten Temperatur reicht ihre Bewegungsenergie aus, den Flüssigkeitsverband zu sprengen. Sie entweichen als Wasserdampf.

Leitungselektronen befinden sich ebenfalls niemals in Ruhe, sondern schwirren zwischen den Atomen des Leiters umher. Verlassen können sie ihn nicht; denn durch die Abgabe von Elektronen sind die Metallatome positiv elektrisch geworden und üben auf die Leitungselektronen Anziehungskräfte aus, die sofort wirksam werden, wenn ein Elektron aus dem Metall zu entweichen sucht. Das Metall ist ein „Käfig“ für Leitungselektronen. Sie können sich in seinem Inneren zwar nahezu ungehindert bewegen, ihre Bewegungsenergie reicht aber zunächst nicht aus, die „Käfiggitter“ zu durchbrechen.

Wird der Leiter erhitzt, nimmt die Geschwindigkeit der Leitungselektronen zu. Ihre Bewegungsenergie wächst so, daß schließlich Elektronen die Anziehungskräfte überwinden und in die Umgebung des Leiters austreten können. Es entkommen jedoch längst nicht alle Leitungselektronen, sondern stets nur ein geringer Teil der Gesamtzahl. Das liegt daran, daß niemals alle Elektronen die gleiche Geschwindigkeit und damit Energie besitzen. Die Geschwindigkeiten verteilen sich vielmehr um einen Mittelwert, und bei den in der Technik üblichen Temperaturen gelingt nur den schnellsten „Außenseitern“ der Sprung ins Freie.

Thomas Alva Edison beobachtete diesen Effekt als erster. Am Glaskolben brennender Glühlampen stellte er elektrische Aufladungen fest, die nur durch Elektronen hervorgerufen sein konnten, die den Leuchtdraht verlassen hatten.

Den Elektronenaustritt aus erhitzten Metallen hat man nicht schon früher entdeckt, weil Elektronen in Luft fortwährend mit Gasteilen zusammenstoßen und infolgedessen nur eine sehr kurze Wegstrecke zurücklegen können. Aus den Lampenkolben hingegen hatte Edison die Luft weitgehend entfernt.

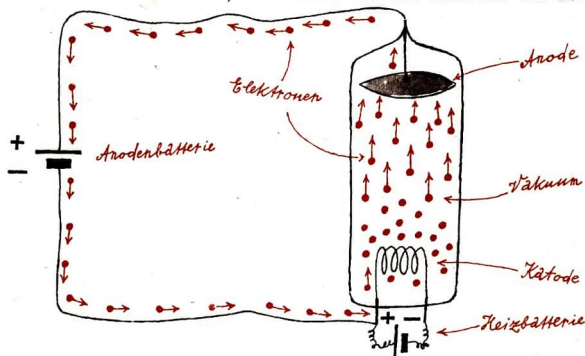
Die Temperatur, bei der an Leitern merkliche „Elektronenemission“ auftritt, hängt vom Material ab. Stoffe mit niedriger „Austrittsarbeit“ – das sind Stoffe, in denen die Elektronen nur wenig Energie aufbringen müssen, um zu entweichen – geben bereits bei Temperaturen von einigen 100°C zahlreiche Elektronen ab. Zu diesen Stoffen zählen Barium und Zäsium. Aus Materialien hoher Austrittsarbeit, zum Beispiel aus Wolfram, tritt erst bei Temperaturen von weit über 1000°C eine größere Elektronenmenge aus.

Was geschieht, wenn wir in einem evakuierten Glaskolben einen Draht anbringen, den wir durch elektrischen Strom auf Glüh-



temperatur erhitzen? Der Draht emittiert zwar Elektronen; weil diese aber den größten Teil ihrer Energie bereits aufwenden mußten, um dem Draht zu entfliehen, kommen sie nicht mehr weit. Um den Draht bildet sich eine Elektronenwolke. Sie ist negativ geladen und behindert infolgedessen den Austritt weiterer Elektronen, die nun auch noch die abstoßenden Kräfte der Raumladung überwinden müssen.

Das ändert sich, sobald in dem Glaskolben ein Blechplättchen angebracht wird und eine zweite Batterie so an Blech und Glühdraht angeschlossen wird, wie es die Skizze zeigt. Zwischen dem Blech – der „Anode“ – und dem Glühdraht – der „Katode“ – treten jetzt zusätzliche elektrische Kräfte auf. Weil die Anode



positiv ist, zieht sie Elektronen aus der Raumladung an. Diese fliegen zur Anode und werden von der „Anodenbatterie“ wieder zur Katode zurückgepumpt, worauf sich der Kreislauf wiederholt. Es fließt ein ständiger Strom über Katode und Anode. Er wird von der Anodenbatterie angetrieben und hält an, solange die Katode Elektronen emittiert.

Die Elektronen sind nicht mehr während ihres ganzen Weges an Leiter gebunden; im Inneren des Glaskolbens fliegen „freie Elektronen“ durch das Vakuum. Die Geschwindigkeit der Elektronen nimmt während des Fluges zur Anode ständig zu; sie fallen gewissermaßen zur Anode. Dabei hängt die Endgeschwindigkeit nur von der Spannung zwischen Anode und Katode ab. Bei einer Spannung von 100 V prallen die Elektronen mit nahezu 6000 km/s auf die Anode; bei einer Spannung von 500 V liegt die Endgeschwindigkeit bei 13 000 km/s.

Durch ihr „Fallen“ erlangen die Elektronen Bewegungsenergie. Sie wird beim Aufprall auf die Anode zum größten Teil in Wärme umgewandelt; die Anode wird heiß. Die Elektronen

können aber außerdem weitere Elektronen aus der Anode herausschlagen, sogenannte Sekundärelektronen. Diese sind allerdings langsamer als die auslösenden Elektronen und fallen sofort auf die positive Anode zurück.

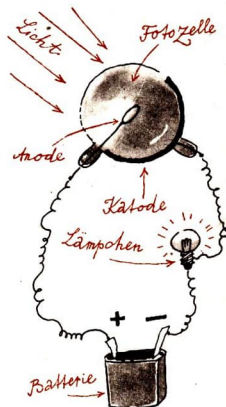
Genug der Theorie! Was kann man mit den durch die „Röhre“ fliegenden freien Elektronen anfangen? Schon die einfachste Anwendung ist wichtig. Eine Röhre von der Art, wie wir sie beschrieben, ist ein „elektrisches Ventil“, das Strom nur in einer Richtung hindurchläßt. Schließen wir nämlich die Anodenbatterie so an, daß die Katode positiv und die Anode negativ wird, kann kein Strom durch die Röhre fließen: Die negative Anode stößt die Elektronen der Raumladung zurück.

Besonders interessant wird diese Anordnung, wenn man die Batterie zwischen Katode und Anode mit einem Wechselspannungsgenerator vertauscht. In diesem Fall wird die Anode gegenüber der Katode abwechselnd positiv und negativ – genau im Takt der Wechselspannungshalbwellen. Strom kann aber immer nur dann durch die Röhre fließen, wenn die Anode für die Dauer einer Halbwelle positiv ist. Alle Halbwellen der umgekehrten Stromrichtung werden abgeriegelt. Das bedeutet nichts anderes, als daß mit Hilfe der Röhre Wechselstrom in pulsierenden Gleichstrom verwandelt wird, in einen Gleichstrom, der aus einzelnen, durch Pausen von Halbwelldauer unterbrochenen Stromstößen besteht.

Der evakuierte Glaskolben mit Katode und Anode ist eine „Gleichrichterröhre“, wie sie von Rundfunk- und Fernsehgeräten her bekannt ist. Man kann mit einer solchen Röhre – wegen der zwei Elektroden Katode und Anode nennt man sie auch „Diode“ – Wechselspannungen bis zu den höchsten Frequenzen gleichrichten. Die Stromstärken, die man mit solchen Dioden erhalten kann, sind allerdings gering und liegen im allgemeinen unterhalb von 1 A. Dafür lassen sich mit entsprechend ausgeführten Dioden – sie sind über einen Meter lang – noch Wechselspannungen von Hunderttausenden Volt gleichrichten. Erst in jüngster Zeit wird die Gleichrichterröhre von Halbleiter-Gleichrichtern immer mehr verdrängt.

Das Verfahren, Leitungselektronen die zum Entweichen notwendige Energie durch Erhitzen des Leiters zuzuführen, ist sehr bequem; es stellt aber nicht die einzige Möglichkeit dar. Viele Stoffe setzen auch Elektronen frei, wenn sie mit Licht bestrahlt werden. Diesem Effekt verdanken wir die Fotozelle.

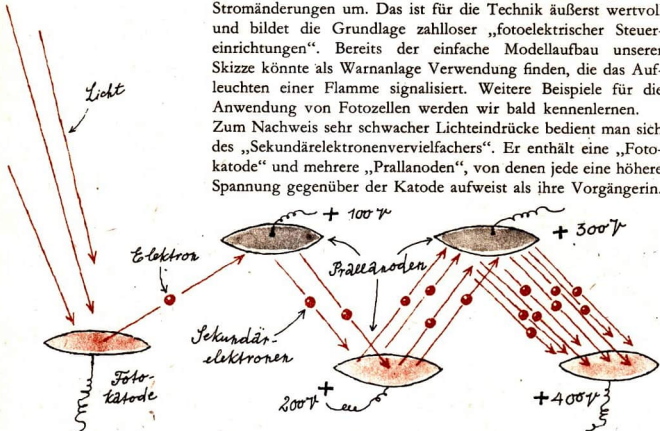
Auf die Innenwand eines evakuierten Glaskolbens wird eine großflächige „Fotokatode“ aufgetragen. Sie besteht aus Materialien, die bei Lichteinfall leicht Elektronen abgeben. Im Innenraum des Glaskolbens ist eine Anode angebracht. Sie wird so geformt, daß sie den Lichteinfall möglichst wenig behindert. Oft besteht sie nur aus einem kleinen Drahtring. Die Luft wird aus dem Glaskolben entfernt.



Wir verbinden die Fotozelle mit einer Batterie und einem kleinen Lämpchen. Solange die Fotozelle im Dunkeln bleibt, verlassen keine Elektronen die Katode. Der Stromkreis ist unterbrochen, das Lämpchen leuchtet nicht. Fällt dagegen Licht auf die Katode der Fotozelle, fliegen in ununterbrochenem Strom Elektronen zur Anode und fließen von da über Lämpchen und Batterie wieder zur Katode zurück. Das Lämpchen brennt.

Die Fotozelle setzt also Lichtänderungen in Spannungs- und Stromänderungen um. Das ist für die Technik äußerst wertvoll und bildet die Grundlage zahlloser „fotoelektrischer Steuerungseinrichtungen“. Bereits der einfache Modellaufbau unserer Skizze könnte als Warnanlage Verwendung finden, die das Aufleuchten einer Flamme signalisiert. Weitere Beispiele für die Anwendung von Fotozellen werden wir bald kennenlernen.

Zum Nachweis sehr schwacher Lichteindrücke bedient man sich des „Sekundärelektronenvervielfachers“. Er enthält eine „Fotokatode“ und mehrere „Prallanoden“, von denen jede eine höhere Spannung gegenüber der Katode aufweist als ihre Vorgängerin.



Fällt Licht auf die Katode, werden Elektronen freigesetzt. Sie fliegen, schneller werdend, zur ersten Prallanode. Beim Auftreffen löst jedes Elektron mehrere Sekundärelektronen aus. Diese werden von der nächsten Prallanode angezogen, befreien dort wiederum eine größere Elektronenzahl usw. Der Elektronenhagel wird also von Prallanode zu Prallanode dichter, und bereits ein durch Licht „befreites“ Elektron kann eine ganze Elektronenlawine auslösen.

„X-Strahlen“

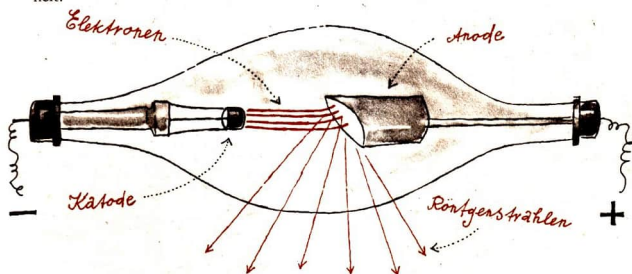
So geheimnisvoll die Bezeichnung „X-Strahlen“ auch klingt – wir kennen sie alle, wenn auch unter einem anderen Namen. X-Strahlen nannte nämlich der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) die von ihm entdeckten neuen Strahlen, die seitdem als „Röntgenstrahlen“ zum Helfer ungezählter Menschen geworden sind.

Was sind Röntgenstrahlen, wie entstehen sie? Zwei Wirkungen

schneller Elektronen, die auf eine Anode prallen, haben wir kennengelernt. Die Anode wird heiß; es können aus ihr Sekundärelektronen geschlagen werden. Wir erwähnten bisher nicht, daß ein kleiner Teil der Bewegungsenergie auftreffender Elektronen in Röntgenstrahlung verwandelt wird.

Schon Röntgen vermutete, daß seine Strahlen mit dem Licht verwandt seien. In der Tat sind Röntgenstrahlen, genau wie Licht, elektromagnetische Wellen (s. S. 236), deren Wellenlängen jedoch etwa hundert- bis zehntausendmal kürzer sind als die des Lichtes.

Eine Röntgenröhre ist ähnlich gebaut wie eine Gleichrichterröhre (tatsächlich gehen von den Anoden leistungsfähiger Gleichrichterröhren Röntgenstrahlen aus). Eine elektrisch geheizte Katode emittiert Elektronen. Sie werden zur positiven Anode gerissen. Damit die Elektronen eine möglichst hohe Geschwindigkeit erreichen, legt man sehr hohe Anodenspannungen an. Mehrere hunderttausend Volt sind keine Seltenheit.



Als Anode dient ein Metallblock. Er ist so geformt und abgeschrägt, daß die Röntgenstrahlung bevorzugt nach einer Seite austritt. Weil sich die Anode im Betrieb stark erhitzt, muß sie durch einen Luft- oder Wasserstrom gekühlt werden. Es gibt auch Röntgenröhren, deren Anode sich ständig dreht. Da fortwährend eine andere Stelle von Elektronen getroffen wird, steigt die Temperatur nicht zu sehr.

Röntgenstrahlen sind unsichtbar. Manche Stoffe leuchten jedoch, wenn sie von Röntgenstrahlen getroffen werden, zum Beispiel Zink-Kadmium-Sulfid, dem Spuren von Silber zugesetzt wurden. Fotografische Platten, Filme und Papiere werden von ihnen geschwärzt.

Die Röntgenstrahlen haben die bekannte und sehr wichtige Eigenschaft, in alle Körper einzudringen oder sie zu durchdringen. Einen für sie grundsätzlich undurchlässigen Stoff gibt es nicht. Wie tief Röntgenstrahlen in einen Grundstoff eindringen, hängt

von seiner Stellung im Periodensystem der Elemente ab. Je höher seine Ordnungszahl ist, desto stärker absorbiert er sie. Deshalb spielt Blei eine so wichtige Rolle als Schutz vor Röntgenstrahlung. Die Wellenlänge der Röntgenstrahlen beeinflusst die Eindringtiefe ebenfalls. Kurzwellige, sogenannte „harte“ Strahlen, durchdringen dickere und dichtere Materialsichten als langwellige, „weiche“ Strahlen. Da die Wellenlänge der Strahlen davon abhängt, mit welcher Geschwindigkeit die Elektronen die Anode treffen, kann man die Strahlenhärte durch Verändern der Anodenspannung regulieren.

Am ältesten ist die Anwendung der Röntgenstrahlen für diagnostische Zwecke. Bringt man Teile des menschlichen Körpers zwischen eine Röntgenröhre und einen Schirm, der mit Zink-Kadmium-Sulfid überzogen wurde, so zeichnen sich die Knochen wegen ihrer größeren Dichte deutlich auf diesem „Röntgensschirm“ ab. Bereits die ersten Röntgenröhren halfen, die Lage von Knochenbrüchen festzustellen oder eingedrungene Fremdkörper zu lokalisieren.

Hohlorgane des menschlichen Körpers absorbieren die Röntgenstrahlen nur sehr wenig und zeichnen sich daher kaum auf dem Schirm ab. Man kann diese Organe jedoch sichtbar machen, indem man sie mit „Kontrastmitteln“ füllt, das heißt mit Stoffen, die schlecht strahlendurchlässig sind. Je nachdem, welches Körperorgan untersucht werden soll, gelangen verschiedene Kontrastmittel zur Anwendung.

Die Durchleuchtungs- und Aufnahmetechnik hat in den vergangenen fünfzig Jahren wesentliche Veränderungen und Verbesserungen erfahren. So kann man die Bewegungen von Körperorganen, etwa des Herzens, filmen oder durch eine besondere Aufnahmetechnik eng begrenzte und verschieden tief liegende Körperbezirke scharf abbilden, während alle übrigen zum „Verschwimmen“ gebracht werden. In der zahnärztlichen Praxis wird die Röntgenstrahlung ebenfalls mit Erfolg angewandt.

Uns allen sind die jährlichen Röntgenreihenuntersuchungen bekannt, bei denen von jedem erwachsenen Bürger Röntgenaufnahmen gemacht werden, um krankhafte Veränderungen im Brustraum bereits im Stadium des Beginns zu erkennen. Es ist auch ein Erfolg dieser Untersuchungen, daß in der DDR die Lungentuberkulose viel von ihrem Schrecken eingebüßt hat.

Lebendes Gewebe wird durch harte oder lange Zeit hindurch einwirkende weiche Röntgenstrahlen geschädigt oder zerstört. Aus diesem Grunde sind Röntgenanlagen stets mit einem Strahlenschutzmantel gepanzert; das Röntgenpersonal ist verpflichtet, besondere Schutzbekleidung mit Bleieinlagen zu tragen.

Ängstliche Gemüter glauben bisweilen, schon von der jährlichen Reihenuntersuchung Schäden befürchten zu müssen. Diese Angst ist völlig unbegründet. Die „Strahlenbelastung“ während der kurzen Zeit der Aufnahme ist absolut gefahrlos. Gleiches gilt



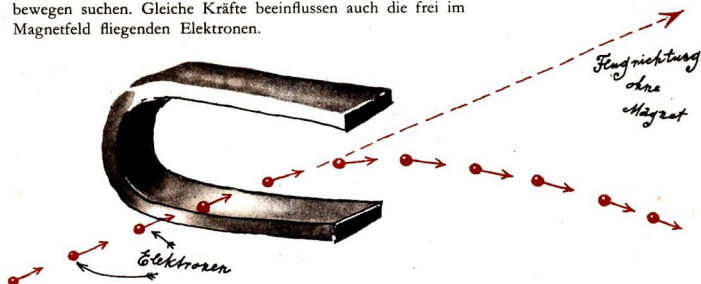
auch für die „Röntgenstrahlen vom Fernsehschirm“. Tatsächlich gehen Röntgenstrahlen vom Bildschirm eines Fernsehgerätes aus. Sie sind aber so weich und so wenig intensiv, daß sie außerhalb der Bildröhre nur mit empfindlichsten Instrumenten nachgewiesen werden können. Schädliche Wirkungen haben sie nicht. Der Einfluß der Röntgenstrahlen auf die Zellen des menschlichen Körpers wird auch bewußt ausgenutzt. Neben Hauterkrankungen sind es vor allem Geschwulstkrankheiten, bei denen man die Röntgenstrahlung zur Zerstörung kranken oder wuchernden Gewebes einsetzt. Die Bestrahlungsgeräte sind ähnlich aufgebaut wie die Geräte zur Diagnostik, arbeiten allerdings mit härteren Strahlen.

Dem Techniker geben Röntgenstrahlen die Möglichkeit, in das Innere eines Werkstückes zu „sehen“. In Gußstücken können sich beim Erstarren Hohlräume bilden, die von außen nicht zu entdecken sind. Die Verwendung solcher Stücke würde den Ausfall einer Maschine oder Produktionsanlage verursachen oder zu Unfällen führen. Eine Durchleuchtung mit Röntgenstrahlen offenbart Materialfehler rechtzeitig. Nach dem gleichen Verfahren werden auch Schweißnähte untersucht.

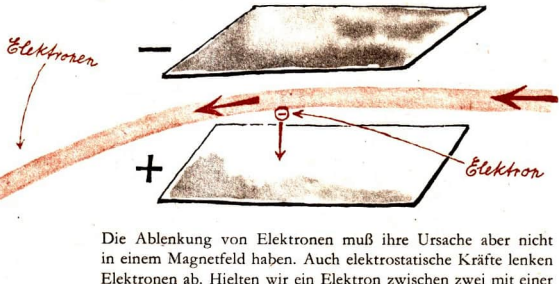
Die zur Werkstoffprüfung verwendeten Röntgenstrahlen sind sehr hart, zumal wenn dicke Metallschichten durchleuchtet werden sollen. Häufig werden die Anlagen als transportable Einheiten ausgeführt, um Prüfungen nicht nur in Werkhallen, sondern auch auf Baustellen und Montageplätzen vornehmen zu können. Neben Röntgenröhren werden seit einigen Jahren immer häufiger radioaktive Isotope (z. B. Kobalt 60), die gleichfalls sehr harte Röntgenstrahlen aussenden, zur Materialprüfung und -untersuchung eingesetzt.

Elektronen auf krummen Wegen

Es gäbe keine Elektromotoren, wenn nicht auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld Kräfte wirkten, die ihn zu bewegen suchen. Gleiche Kräfte beeinflussen auch die frei im Magnetfeld fliegenden Elektronen.



„Schießen“ wir ein Elektron in ein Magnetfeld, wird es durch diese Kräfte aus seiner Flugbahn gelenkt. Tritt es senkrecht zu den Kraftlinien in das Magnetfeld ein, beschreibt es einen Kreisbogen. Sein Radius ist um so kleiner, je geringer die Geschwindigkeit des Elektrons und je stärker das Magnetfeld ist. Im Bereich eines kräftigen Magneten kann man Elektronen zwingen, einen vollständigen Kreis oder eine Schleife zu durchlaufen; Elektronen, die schräg zu den Kraftlinien in ein Magnetfeld fliegen, bewegen sich auf schraubenförmigen Bahnen.



Die Ablenkung von Elektronen muß ihre Ursache aber nicht in einem Magnetfeld haben. Auch elektrostatische Kräfte lenken Elektronen ab. Hielten wir ein Elektron zwischen zwei mit einer Gleichspannungsquelle verbundene Platten, „fiel“ es zur positiven Platte, sobald wir es losließen. Fliegt ein Elektron von der Seite in den Plattenzwischenraum, so überlagert sich diese Vertikalbewegung der Horizontalbewegung, genau wie beim Flug eines waagrecht oder schräg geworfenen Steines im Schwerfeld der Erde. Für beide Teilchen – Stein im Schwerfeld und Elektron im elektrischen Feld – gelten ähnliche Bewegungsgesetze. Der Stein beschreibt die bekannte Wurfparabel, das Elektron einen Parabelbogen. Die Ablenkung ist um so größer, je langsamer das Elektron fliegt und je höher die Spannung zwischen den Platten ist.

Physik und Technik haben in gleicher Weise Nutzen aus der Elektronenablenkung durch magnetische und elektrische Kräfte gezogen. Mit ihrer Hilfe gelang es zum Beispiel den Physikern, die Masse und die Geschwindigkeit der Elektronen zu bestimmen. Diese Messungen waren besonders bedeutungsvoll, als die Existenz des Elektrons als noch nicht erwiesen galt.

„Schnelle“ Elektronen, deren Geschwindigkeit bereits in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s) kommt, werden von Wissenschaft und Forschung häufig benötigt. Solche Elektronen können zum Beispiel, wenn sie auf ein Hindernis treffen, eine äußerst harte Röntgenstrahlung verursachen; sie werden für Werkstoffuntersuchungen und auch für medizinische Zwecke verwendet.

Bereits in der Diode erlangen die Elektronen sehr große Geschwindigkeiten. Man kann diese steigern, indem man die Spannung zwischen Katode und Anode erhöht. Für sehr große Geschwindigkeiten ist diese Methode allerdings nicht geeignet, weil die erforderliche Beschleunigungsspannung nur sehr schwer oder überhaupt nicht zu erzeugen ist. Man hilft sich mit einem Kunstgriff: Durchlaufen die Elektronen mehrmals hintereinander eine niedrigere Spannung, erhalten sie dabei jedesmal einen Impuls und werden etwas schneller. Wir können uns das veranschaulichen, indem wir an einen Radfahrer denken, der an einer Kette von Menschen vorbeifährt und von jedem Mitglied der Kette einen „Schub“ bekommt.

Technisch wird dieses Prinzip verwirklicht, indem man die Elektronen durch eine Reihe von hintereinander liegenden Zylindern fliegen läßt, die mit einer Wechselspannungsquelle hoher Frequenz verbunden werden. Sie wird so an die Zylinder angeschlossen, daß die Elektronen immer beschleunigt werden, wenn sie die Lücke zwischen zwei Zylindern passieren. Man hat bereits derartige „Linearbeschleuniger“ konstruiert, die mehr als 70 m lang sind.

Weit weniger Raum beansprucht ein Beschleuniger, in dem die Elektronen in rasender Geschwindigkeit eine Kreisbahn durchlaufen. Das „Betatron“, die „Elektronenschleuder“, ist das bekannteste Gerät dieser Art. Seine Wirkungsweise ähnelt der eines Transformators.

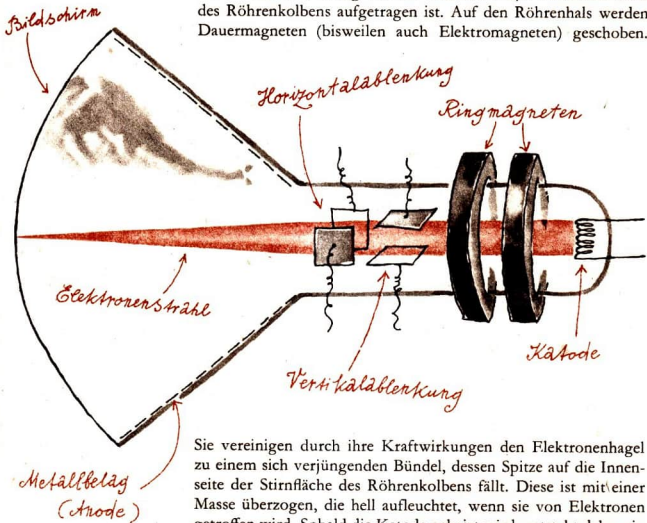
An die Stelle der Sekundärwicklung tritt ein luftleer gepumptes Rohr, in das aus einer Katode Elektronen eintreten. Wie in einem normalen Transformator werden diese Elektronen durch die Induktionswirkung in Bewegung gesetzt und beschleunigt, da sie im Gegensatz zum Wandern in Leitern keinen „Reibungswiderstand“ zu überwinden haben. Die Beschleunigung hält an, solange die Induktionswirkung wächst. In dieser kurzen Zeitspanne, die nur nach Millisekunden zählt, führen die Elektronen mehrere Millionen Umkreisungen aus. Damit sie nicht mit den Rohrwänden kollidieren, ist ein magnetisches „Führungsfeld“ vorgesehen. Es hält die Elektronen auf der Kreisbahn und muß seine Stärke rasch steigern, weil die Elektronen mit wachsender Geschwindigkeit „auszubrechen“ suchen. Wird das Führungsfeld kurzzeitig unwirksam gemacht, verlassen die Elektronen ihre Kreisbahn und können ausgeschleust werden.

Jeder Fernsehempfänger enthält als wichtigstes, größtes und teuerstes Bauelement die „Bildröhre“. In jeder Radarstation begegnet uns das Leuchten von Bildschirmen, und in vielen Laboratorien, Werkstätten und Prüffeldern können wir beobachten, wie auf den Bildschirmen von „Oszillographen“ leuchtende Linien und Kurven entstehen, die dem Fachmann oft mehr über die Arbeitsweise komplizierter Anlagen verraten als lange und mühsame Meßreihen.



Die Bildschirme sind die Stirnfläche einer „Braunschen Röhre“, einer „Katodenstrahlröhre“. Sie ist ein unmittelbarer Nachfahre jener Röhre, die von dem Physiker Ferdinand Braun (1850–1918) ersonnen wurde, um schnell ablaufende elektrische Vorgänge sichtbar zu machen.

Im schlanken Hals der Katodenstrahlröhre ist eine elektrisch geheizte Katode untergebracht. Sie setzt einen dichten Elektronen- hagel frei. Die Elektronen werden durch eine Anode beschleunigt, die als leitender Belag auf die Innenseite des konischen Teils des Röhrenkolbens aufgetragen ist. Auf den Röhrenhals werden Dauermagneten (bisweilen auch Elektromagneten) geschoben.



Sie vereinigen durch ihre Kraftwirkungen den Elektronenhagel zu einem sich verjüngenden Bündel, dessen Spitze auf die Innenseite der Stirnfläche des Röhrenkolbens fällt. Diese ist mit einer Masse überzogen, die hell aufleuchtet, wenn sie von Elektronen getroffen wird. Sobald die Katode geheizt wird, entsteht daher ein kleiner heller Fleck auf diesem „Bildschirm“.

Im Inneren des Röhrenkolbens finden wir zwei rechtwinklig zueinander angeordnete Paare von kleinen Blechplatten, das „Ablensystem“. Mit seiner Hilfe kann man den leuchtenden Fleck an jede Stelle des Bildschirms verschieben. Nehmen wir an, vom Plattenpaar für die „Vertikale Ablenkung“ sei die obere Platte positiv, die untere negativ. Dann wird das Elektronenbündel durch die elektrischen Kräfte nach oben „verbogen“, der Leuchtfleck wandert in Richtung auf den oberen Bildschirmrand. Um wieviel er sich verschiebt, hängt von der Größe der an den Platten liegenden „Ablenspannung“ ab. Vertauschen wir die Plattenanschlüsse, gleitet der Leuchtfleck auf dem Bild-

schirm nach unten. Würden wir an die Platten eine Wechselspannung legen, folgte der Leuchtfleck der sich rasch ändernden und ihr Vorzeichen wechselnden Ablenkspannung unverzüglich. Infolge der Trägheit unseres Auges sähen wir einen leuchtenden Strich auf dem Bildschirm.

Entsprechend verhält sich das Elektronenbündel, wenn wir die Platten für die „Horizontalablenkung“ mit einer Spannungsquelle verbinden. Ist die linke Platte positiv, wandert er nach links, ist die rechte positiv, wandert er nach rechts.

Liegen Ablenkspannungen an beiden Plattenpaaren, stellt sich der Leuchtfleck entsprechend ein. Ist die linke Platte des Horizontal-Paares und die obere Platte des Vertikal-Paares positiv, gleitet der Leuchtfleck nach links oben. Durch entsprechendes Einstellen der Ablenkspannungen kann auf diese Weise jeder Punkt des Bildschirms zum Leuchten gebracht werden.

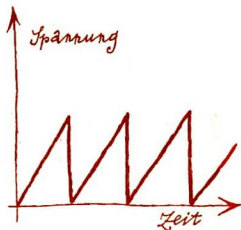
Eine der ersten Anwendungen der Braunschen Röhre war es, den Verlauf von Wechselspannungen sichtbar zu machen. Man geht dabei so vor:

An das Plattenpaar für die Horizontalablenkung wird eine solche Spannung gelegt, daß der Leuchtfleck mit gleichbleibender Geschwindigkeit waagrecht von links nach rechts über den Bildschirm wandert und vom rechten Rand an den Anfang seiner Bewegung zurückspringt. Die dazu nötige Spannung hat einen sägezahnähnlichen Verlauf. Folgen die „Sägezähne“ einander schnell genug, sehen wir einen leuchtenden Strich.

Die zu untersuchende Wechselspannung wird an die Platten für die Vertikalablenkung angeschlossen. Infolgedessen wird der Leuchtfleck zusätzlich zu seiner waagerechten Bewegung im Rhythmus der Wechselspannung nach oben und nach unten ausgelenkt. Wird die Frequenz der Sägezahnspannung entsprechend eingestellt, setzen sich beide Bewegungen so zusammen, daß auf dem Bildschirm die Kurve des Wechselspannungsverlaufs aufgezeichnet wird und beobachtet werden kann. Jede Abweichung oder Verformung der Kurve wird wiedergegeben.

Daraus folgt bereits die große technische Bedeutung der Katodenstrahlröhre. Man kann nicht nur untersuchen, ob eine bekannte Wechselspannung „richtig“ abläuft, sondern man kann auch Wechselspannungen aufzeichnen, über deren Verlauf zunächst nichts bekannt ist. Schwingungen von Maschinenteilen, der Verlauf der Herztätigkeit, der Klang von Musikinstrumenten und viele andere Schwingungsvorgänge lassen sich auf diese Weise analysieren.

Da Elektronen auch durch magnetische Kräfte aus ihrer Bahn geworfen werden, ist man nicht unbedingt auf Ablenkplatten angewiesen. Man kann sie durch zwei stromdurchflossene Spulenpaare ersetzen, die von außen auf den Röhrenhals geschoben werden. In der Fernseh- und in der Radartechnik wird meistens diese „magnetische Ablenkung“ angewandt.



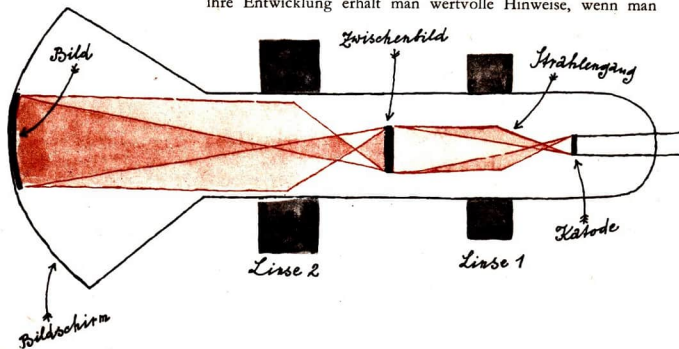
Blick in den Mikrokosmos

Als man die Elektronenablenkung durch elektrische und magnetische Felder genauer untersuchte, stieß man auf Gesetzmäßigkeiten, die an bekannte optische Gesetze erinnerten. Elektronen werden durch elektrische und magnetische Felder ähnlich abgelenkt wie Lichtstrahlen, die durch Linsen fallen. Man kann einen Elektronenschwarm „sammeln“ und das so erhaltene Strahlenbündel in einem Punkt vereinigen, indem man die Elektronen durch Lochblenden schießt, die an verschiedenen hohen elektrischen Spannungen liegen. Das gleiche Ergebnis bekommt man, wenn die Elektronen den Innenraum einer stromdurchflossenen Spule oder das Innere eines dauermagnetischen Ringes passieren.

Diese Beobachtungen legten es nahe, sich an der Konstruktion elektrischer und magnetischer Linsen für Elektronenstrahlen zu versuchen. Die Experimente glückten, und man entwickelte „Elektronenlinsen“, mit denen man alles das erreichen kann, was mit Lichtstrahlen und optischen Linsen möglich ist: Elektronenstrahlenbündel sammeln und zerstreuen, „Bilder“ vergrößern und verkleinern.

Da sich elektronische Linsen wie optische Linsen verhalten, muß man auch „elektronische Paralleltypen“ zu optischen Geräten konstruieren können. Verständlicherweise sind mit einem elektronenoptischen Gerät nur Dinge zu beobachten, die entweder selbst Elektronen aussenden oder so beschaffen sind, daß sie Elektronenstrahlen mehr oder weniger durchlassen. Außerdem muß das unserem Auge zunächst verborgene elektronische Bild in ein optisches Bild transformiert werden. Für diese Umwandlung benutzt man ähnliche Leuchtschirme wie in Braunschen Röhren. Darüber hinaus müssen elektronenoptische Geräte evakuiert sein, weil Elektronen nur im luftleeren Raum größere Strecken zurücklegen können.

In Verstärkerröhren, in Fotozellen, Röntgenanlagen und für viele andere Zwecke braucht man leistungsfähige Katoden. Für ihre Entwicklung erhält man wertvolle Hinweise, wenn man



Katoden in Betrieb beobachten kann. Dabei interessieren die Emissionsvorgänge, nicht das optische Bild. Mit dem „Emissionsmikroskop“ kann man sie in starker Vergrößerung betrachten.

Die zu untersuchende Katode wird in einen Glaskolben gebracht, der anschließend evakuiert wird. Auf dem Hals des Kolbens, nur wenig von der Katode entfernt, sitzt eine „magnetische Linse“, die aus einer ringförmigen Spule besteht. Werden ihr Abstand von der Katode und die Stromstärke entsprechend eingestellt, entsteht auf der Stirnwand der Röhre ein vergrößertes Bild der Katodenoberfläche. Es wird mit einem Bildschirm aufgefangen, der auf der Innenfläche der Stirnseite sitzt.

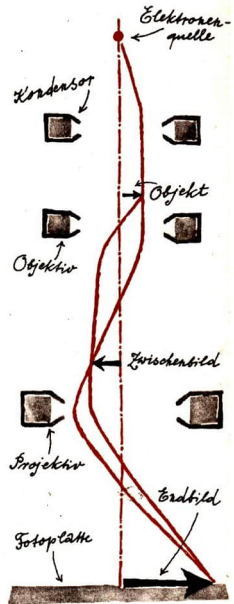
Für genaue Untersuchungen reicht die Vergrößerung durch eine Linse oft nicht aus. Man sieht dann noch eine zweite Linse vor. Linse 1 entwirft ein vergrößertes „Zwischenbild“, das von Linse 2 weitervergrößert und auf den Bildschirm geworfen wird. Noch einfacher wird das Emissionsmikroskop, wenn man die Elektromagneten durch verschiebbare dauermagnetische Ringe ersetzt.

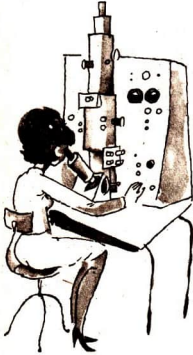
In vielen Forschungsstätten, Laboratorien und Entwicklungsabteilungen gibt es heute „Elektronenmikroskope“. Es sind teure, große und komplizierte Apparaturen, deren Bedienung nicht gerade einfach ist. Man ist jedoch auf sie angewiesen, wenn man tiefer in die Welt des Mikrokosmos vordringen will; denn bei mehr als 2000 facher Vergrößerung versagt das Lichtmikroskop. Eine Verbesserung ist nicht möglich, weil diese Grenze durch die physikalischen Eigenschaften des Lichts gezogen wird. Das Elektronenmikroskop dagegen, in dem die Lichtwellen durch Elektronen ersetzt werden, gestattet 200 000 fache Vergrößerungen und ist noch nicht am Ende seiner Möglichkeiten angelangt.

Man baut Elektronenmikroskope mit magnetischen Linsen und Elektronenmikroskope mit elektrischen Linsen, mit Linsen also, in denen die Elektronen durch elektrische Kräfte abgelenkt werden. Sehen wir uns nur den prinzipiellen Aufbau eines Elektronenmikroskops mit magnetischen Linsen an.

Eine Glühkatode emittiert einen kräftigen Elektronenstrom, der durch eine erste magnetische Linse, den „Kondensor“, zu einem parallelen Strahlenbündel geformt wird. Das Elektronenbündel durchsetzt das auf einem geeigneten Träger angebrachte Präparat, wobei die Elektronen – der Massenverteilung des zu untersuchenden Gegenstandes entsprechend – mehr oder weniger absorbiert oder abgelenkt werden. Es folgt die erste Vergrößerungsstufe, das „Objektiv“, das gleichfalls aus einer magnetischen Linse besteht. Es entwirft ein vergrößertes Zwischenbild des Präparats, das in vielen Mikroskopen bereits auf einem Bildschirm betrachtet werden kann.

Zur weiteren Vergrößerung kann ein Ausschnitt des Zwischenbildes ausgewählt werden. Diese „Endvergrößerung“ ist Sache





einer dritten magnetischen Linse, des „Projektiv“. Auf einem Bildschirm oder einer fotografischen Schicht entsteht dann das endgültige Bild.

Im Elektronenmikroskop mit elektrischen Linsen finden wir die gleiche Anordnung. Allerdings ist es, um hohe Vergrößerungen bei kleiner Baulänge des Mikroskops zu erreichen, üblich, noch mehrere Zwischenlinsen einzuschalten.

Der ganze Strahlengang des Elektronenmikroskops muß im Vakuum verlaufen. Sämtliche Bedienungseinrichtungen, mit denen Blenden in den Strahlengang geschoben oder die Ausschnitte des Zwischenbildes eingestellt werden sollen, sind so zu konstruieren, daß keine Luft von außen eindringen kann. Selbstverständlich müssen auch die zu untersuchenden Präparate in das Vakuum eingeschleust werden. Es ist daher eine Pumpenanlage nötig, die das Vakuum erzeugt und während des Betriebes aufrechterhält.

Der Leuchtschirm kann durch mehrere Fenster beobachtet werden. Sie sind mit Bleiglas verschlossen, um die beim Elektronenaufprall auf den Bildschirm entstehenden Röntgenstrahlen abzuschildern. Wird der Bildschirm hochgeklappt, fällt das vergrößerte Bild auf eine Fotoplatte oder auf einen Film. Plattenwechsel beziehungsweise Filmtransport sind gleichfalls so eingerichtet, daß man nicht erst nach jeder Aufnahme das Mikroskop öffnen und anschließend erneut evakuieren muß.

Die Präparate können nicht, wie in der Lichtmikroskopie, zwischen Glasplättchen eingeschlossen werden; denn Glas ist für Elektronen „undurchsichtig“. Man hilft sich, indem man die Präparate über ein kleines Loch in einem Metallplättchen legt oder sie von einem Kollodiumfilm tragen läßt, der nur wenige Millionstel eines Millimeters stark ist. Ein Färben der Objekte zur Steigerung der Kontraste wäre beim Elektronenmikroskop sinnlos, da Elektronen nur auf die Massenverteilung, nicht aber auf die Farbe eines Gegenstandes reagieren. Man kann die Kontraste eines elektronenoptischen Präparats jedoch erhöhen, indem man es unter flachem Winkel mit Metall bedampft.

In Biologie und Medizin haben die Elektronenmikroskope unseren Gesichtskreis im wahren Sinne des Wortes erheblich erweitert. Sie sind zum Beispiel eines der wichtigsten Hilfsmittel der Virusforschung. Daneben ist es vor allem die Werkstoffkunde, die der Elektronenmikroskopie wertvolle neue Ergebnisse verdankt. Die Beschaffenheit von Werkstoffoberflächen, die Einwirkung von Chemikalien auf solche Flächen, das Gefüge von Legierungen sowie Plaste, Farben und Lacke werden mit dem Elektronenmikroskop untersucht. Neben den „großen“ Elektronenmikroskopen entwickelte man für einfachere Aufgaben Elektronen-Kleinmikroskope. Sie sind einfacher aufgebaut und auch entsprechend einfacher zu handhaben. Teilweise rüstet man Kleinmikroskope sogar mit dauermagnetischen Linsen aus.

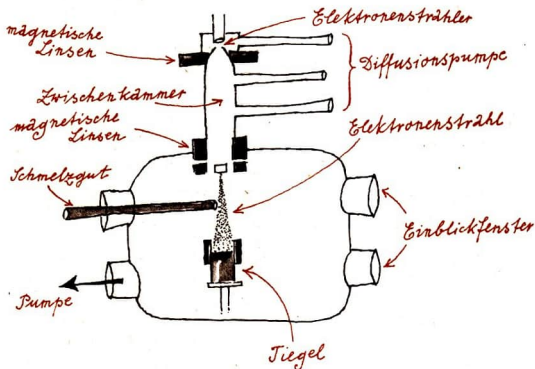
Der Elektronenstrahl als Werkzeug

Wenn Elektronen auf ein Hindernis treffen und plötzlich abgebremst werden, verwandelt sich der weitaus größte Teil ihrer Bewegungsenergie in Wärme. Das hat manchmal unangenehme Folgen: Die Anode einer überlasteten Gleichrichterröhre beginnt unter Umständen zu glühen und schmilzt schließlich; eine Röntgenröhre, deren Kühleinrichtung versagt, wird zerstört; ein elektronenmikroskopisches Präparat, das zu lange intensiver Strahlung ausgesetzt bleibt, wird unbrauchbar. Der „Elektronenstrahlöfen“ jedoch zeigt, daß diese Wärme auch ihr Gutes haben kann.

Für viele technische Spezialaufgaben, zum Beispiel für hochbeanspruchte Teile von Turbinen und Strahltriebwerken, werden Werkstoffe mit Eigenschaften benötigt, die nur durch hohe Reinheit und genaueste Einhaltung der Legierungsbestandteile zu erzielen sind. Ähnlich strenge Forderungen gelten für Stoffe, die in der Halbleitertechnik Verwendung finden sollen. Diesen Bedingungen zu genügen, ist mit den üblichen Schmelzmethoden nur unter großen Schwierigkeiten möglich. In die Oberfläche der Metallschmelze dringen Verunreinigungen; in der Schmelze eingeschlossene Gasreste werden nicht restlos ausgetrieben.

Für die Gewinnung solcher Sonderwerkstoffe bewährt sich das Schmelzen unter extrem niedrigem Luftdruck, das Vakuumschmelzen. Eines der jüngsten und für die „Vakuumm Metallurgie“ geeignetsten Geräte ist der Elektronenstrahlöfen. Bei seiner Entwicklung und Konstruktion steht unsere Republik in der Welt an der Spitze.

Eine große, kesselähnliche Vakuumkammer ist mit einem leistungsfähigen Pumpenaggregat verbunden, das die Luft aus



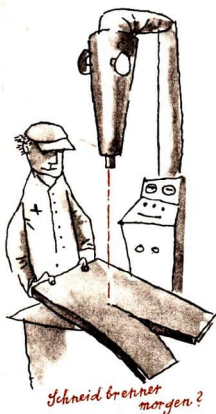
der Kammer bis auf einen geringen Rest entfernt. In der Kammer befindet sich ein Schmelztiegel, der durch Wassenumlauf gekühlt wird. Von der Seite wird das stangenförmige Schmelzgut eingeschoben und nachgeführt. Fenster ermöglichen die Beobachtung der Vorgänge in der Vakuumkammer. Wichtigster Teil des Strahlofens ist ein System, das einen sehr intensiven Elektronenstrahl erzeugt. Es besteht aus einer Glühkatode und aus mehreren magnetischen Linsen und Metallblenden. Diese formen und lenken den Elektronenstrahl so, daß er vor allem auf das Ende des Schmelzgutes fällt. Dabei schmilzt jeweils eine dünne Schicht des Schmelzgutes ab. Ehe das Material in den Tiegel tropft, wird es durch die Hitze und durch das Vakuum vollständig „entgast“, alle eingeschlossenen Gasreste entweichen.

Wird die Aufschlagstelle der Elektronen, der „Brennfleck“, sehr verkleinert, lassen sich Temperaturen erreichen, wie sie an der Sonnenoberfläche herrschen. Es gibt kein Material, das ihnen widerstehen könnte. Sogar Wolfram kann im Brennfleck verdampft werden. Für die nationale Wirtschaft der DDR ist der vom Forschungsinstitut Manfred von Ardenne entwickelte Elektronenstrahl – er wird bereits für verschiedene Leistungsstufen hergestellt – von großer Bedeutung; denn er ermöglicht das Erschmelzen von Spezialwerkstoffen, die den besten Materialien des Auslands überlegen sind.

Der Elektronenstrahl gibt auch einen vorzüglichen „Schweißbrenner“ ab. Schweißnähte werden weder durch Flußmittel noch durch Wirkungen von außen verunreinigt. Die Schweißgeschwindigkeit ist hoch. Man hat 10 mm starke Bleche mit einer Geschwindigkeit von 30 cm/min, Bleche von 1 mm Stärke mit 300 cm/min miteinander verschweißt. Es können nicht nur Materialien mit sehr hohem Schmelzpunkt, wie Wolfram, Molybdän oder Tantal, geschweißt werden, sondern auch Stoffe mit sehr unterschiedlicher Schmelztemperatur.

Die Möglichkeiten des „Werkzeugs Elektronenstrahl“ sind damit bei weitem nicht erschöpft. Er ist auch Bohrer, Säge, Fräser und Gravierstichel von einer Feinheit, wie sie noch vor zwei Jahrzehnten unvorstellbar war.

Durch elektronische Linsen kann man den Brennfleck bis zu mikroskopischen Dimensionen verkleinern. Die so auf engstem Raum konzentrierte Hitze durchbohrt Bleche, ja sogar Stahlplatten in Sekundenbruchteilen. Bohrungen von 1 μ m Durchmesser sind ebenso sauber und leicht herzustellen wie größere Löcher. Führt man den Brennfleck durch magnetische oder elektrische Kräfte über das Werkstück, entsteht ein so feiner Schnitt, wie er mit keiner anderen Methode erreichbar ist. Bereits die allernächste Umgebung des Schnittes wird nicht durch die Wärmeentwicklung in Mitleidenschaft gezogen, besonders dann nicht, wenn man den Elektronenstrahl nicht ununterbrochen, sondern in einzelnen Impulsen wirken läßt. Auch präziseste Fräsarbeiten können durch



den Elektronenstrahl ausgeführt werden. Spinddüsen, Ziehsteine, feinste Filter, Blenden für elektronenoptische Geräte werden bereits seit einigen Jahren auf diese Weise hergestellt.

Gerade in der Elektrotechnik wird sich der Elektronenstrahlmethode ein weites Anwendungsfeld erschließen. Vor allem im Nachrichtenwesen sowie in der elektronischen Steuer-, Regel- und Rechentechnik ist man gezwungen, die Abmessungen der Geräte immer weiter zu verringern. Man nähert sich dabei Dimensionen, die dem menschlichen Auge nur noch über das Mikroskop zugänglich sind. Für diese „Technik der tausendstel Millimeter“ ist der Elektronenstrahl wahrscheinlich *das* Werkzeug.

Auch der künftige Ausbau der Elektronenstrahlmethode zeichnet sich bereits ab. Wird in den Strahlengang eines Elektronenstrahlwerkzeugs eine Schablone gebracht, die – einem fotografischen Diapositiv ähnlich – nur an bestimmten Stellen vom Strahl durchdrungen wird, so kann man von ihr ein beliebig verkleinertes elektronenoptisches Bild auf dem Werkstück erzeugen, das sich „einbrennt“. Es wird auf diese Weise wahrscheinlich schon in nächster Zukunft möglich sein, an Kleinstbauelementen und -baugruppen gleichzeitig Tausende von Bohrungen, Schnitten und anderen Bearbeitungsgängen vorzunehmen.

DAS PLASMA HILFT UNS WEITER

Lawine im Glasrohr

Der Elektronenstrom in den meisten Gleichrichterröhren oder Fotozellen zählt nur nach Milliampere. Das ist für viele Aufgaben zu wenig. Man kann über eine solche Gleichrichterröhre beispielsweise keinen Elektromotor speisen, und es ist nicht möglich, einen kräftigen Elektromagneten unmittelbar durch eine Fotozelle zu steuern.

Man hat zwar durch sorgfältige Auswahl des Katodenmaterials und durch Erhöhen der Spannung zwischen Katode und Anode die Stromstärke erhöht, gelangte aber bald an eine zunächst unüberschreitbare Grenze. Auch die ausgeklügeltsten Herstellungsverfahren konnten nichts daran ändern, daß sich nur soviel Elektronen am Strom durch die Röhre beteiligen, wie von der Katode emittiert werden.

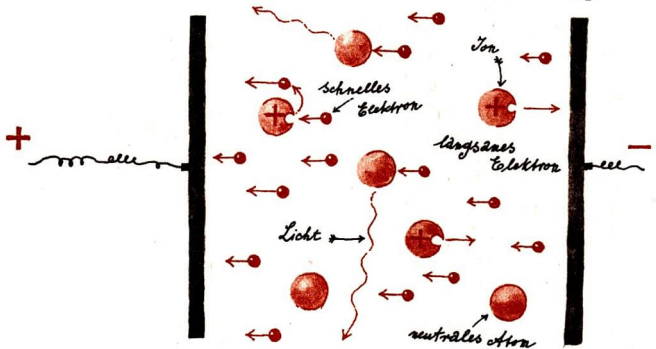
Durch einen verhältnismäßig einfachen Kunstgriff können wir aber die Stromstärke in einer Gleichrichterröhre oder einer Fotozelle vervielfachen. Nach dem Evakuieren füllen wir in den Röhrenkolben eine geringe Menge Edelgas (z. B. Argon oder Helium) oder Quecksilberdampf. Liegt zwischen Katode und Anode einer solchen „gasgefüllten Gleichrichterröhre“ eine

Spannung von wenigen Volt, fließt ein kaum meßbarer Strom. Erhöhen wir die Spannung allmählich, beginnt das Röhreninnere bei einer bestimmten Spannung plötzlich in einer für das jeweilige Füllgas charakteristischen Farbe zu leuchten: bläulich-grün bei Quecksilberdampf, violett bei Argon, gelb-rosa bei Helium. Gleichzeitig schnellte die Stromstärke in die Höhe, und zwar auf solche Werte, daß die Röhre zerstört würde, wenn man nicht den Strom durch einen vorgeschalteten Widerstand oder durch den angeschlossenen Verbraucher auf einen unschädlichen Maximalwert begrenzte.

Das plötzliche Anwachsen der Stromstärke und das Aufleuchten des Füllgases lassen darauf schließen, daß in der Röhre ein Vorgang eingesetzt hat, der sich grundsätzlich vom Geschehen in einer evakuierten Gleichrichterröhre unterscheidet.

Wegen des Füllgases fliegen die von der Katode emittierten Elektronen nicht mehr ungehindert zur Anode. Sie stoßen unterwegs fortwährend mit Gasatomen zusammen. Bei der Kollision kann, wenn eine bestimmte Spannung zwischen Katode und Anode, die sogenannte Zündspannung, überschritten wird, zweierlei geschehen.

Das getroffene Atom wird zu einem Lichtblitz angeregt; die Summe aller Lichtblitze sehen wir als Leuchten des Füllgases.



Elektronen, die ein Atom zu einem solchen Lichtblitz anregen, brauchen nur eine verhältnismäßig geringe Geschwindigkeit zu besitzen.

Zahlreiche Elektronen erhalten durch ihr Fallen in Richtung Anode soviel Bewegungsenergie, daß sie weitere Elektronen aus den Gasatomen heraus schlagen. Damit werden die getroffenen Atome zu positiven Ionen, die sich in Richtung zur negativen Katode in Bewegung setzen. Die herausgeschlagenen Elektronen

dagegen fliegen zur Anode. Auch sie werden während ihres Fluges immer schneller und können bald andere Atome zur Lichtaussendung anregen oder weitere Elektronen aus den Atomen befreien. Elektronen und Ionen vermehren sich lawinenartig; die Stärke des durch die Röhre fließenden Stromes nimmt entsprechend zu.

Mit der gasgefüllten Gleichrichterröhre – kurz Gasdiode genannt – lassen sich viel stärkere Ströme gleichrichten als mit der Diode, deren Wirkung allein auf den im Vakuum fliegenden Elektronen beruht. Ströme von der Größenordnung 20 A sind ohne Schwierigkeiten zu erhalten. Daher bewährt sich die Gasdiode überall dort, wo die Hochvakuumgleichrichterröhre nicht ausreicht. Sie hat in der Industrie ein weites Anwendungsfeld gefunden. Der „Quecksilberdampfgleichrichter“, mit dem sich Stromstärken von Hunderten Ampere gleichrichten lassen, beruht ebenfalls auf Ionisierungserscheinungen. Sie laufen diesmal in einer Quecksilberdampfatmosphäre ab.

Nicht ganz so „stürmisch“ geht es in der „Edelgas-Fotozelle“ zu. In ihr ionisieren die durch Lichtstrahlen aus der Kathode geschlagenen Elektronen Atome des Füllgases und schaffen damit weitere Ladungsträger. Diese lassen bei gleichem Lichteinfall den Strom auf das Fünf- bis Zehnfache gegenüber der Vakuum-Fotozelle anwachsen. Eine Edelgas-Fotozelle kann daher weit stärkere Ströme steuern als die Vakuum-Fotozelle.

Weder in der Gasdiode noch in der Edelgas-Fotozelle werden sämtliche Gasatome von Elektronen getroffen. Außerdem „rekombinieren“ ständig Ionen und Elektronen zu neutralen Atomen. Das Füllgas der „gezündeten“ Röhre setzt sich also aus Elektronen, Ionen und elektrisch neutralen Atomen zusammen. Wegen der gleichmäßigen Verteilung negativer und positiver Ladungen erscheint es nach außen hin elektrisch neutral. Ein solches Gas, das zum größten Teil in Ionen und Elektronen zerfallen ist, nennt man „Plasma“.

Vielen Lesern wird der Name Plasma in den vergangenen Jahren des öfteren begegnet sein, allerdings weniger bei der Beschreibung so „harmloser“ Dinge wie einer Gleichrichterröhre, sondern bei Aufsätzen über die Weltraumfahrt, die Kerntechnik, die Erforschung der oberen Atmosphärenschichten und in astronomischen Arbeiten. Es hat einen sehr einfachen Grund, weshalb sich heute die Wissenschaftler so eifrig mit der „Plasma-physik“ befassen: Mehr als 99% der Materie im Universum sind Plasma!

Wir müssen uns darauf beschränken, einige Beispiele zu nennen. Einer die Erde in großer Höhe umspannenden Plasmahülle, der Ionosphäre, verdanken wir die Möglichkeit, um den Erdball telefonieren und fernschreiben zu können. Andererseits trägt diese Hülle die Schuld daran, daß Funkverbindungen mit kosmischen Flugkörpern nur in bestimmten Wellenlängenbereichen



Alles Plasma!



möglich sind. Das Polarlicht ist eine Plasmaerscheinung. Die Sonne und die Fixsterne werden von Plasmahüllen umgeben. Kometenschweife und leuchtende kosmische Nebelwolken befinden sich im Plasmazustand. Es ist nicht übertrieben zu behaupten, daß die Astrophysik heute größtenteils Plasmaphysik ist. So spannt sich ein weiter Bogen von der „Lawine im Glasrohr“ bis in die Tiefen des kosmischen Raumes. Erscheinungen aus Gebieten, die scheinbar überhaupt nichts miteinander zu tun hatten, zeigten auf einmal enge und überraschende Zusammenhänge, als man die Gesetzmäßigkeiten der Plasmaphysik auf sie anwandte. Diese Gesetzmäßigkeiten sind, wie wir nicht näher ausführen können, so grundverschieden vom Verhalten normaler Gase, daß man den Plasmazustand mit Recht als den „vierten Aggregatzustand“ der Materie bezeichnet. Ihn noch besser und genauer kennenzulernen, das ist heute eine der wichtigsten Aufgaben der physikalischen Forschung.

Viele Formen – viele Farben

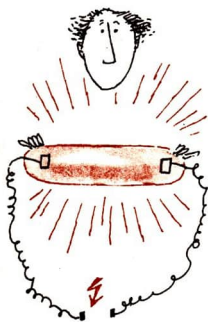
Der Innenraum einer Gasdiode leuchtet, wenn die Röhre in Betrieb ist. Für einen Gleichrichter ist dieses Leuchten nebensächlich, für die Wissenschaft aber war es überhaupt der Anlaß, sich mit dem Stromfluß durch verdünnte Gase und durch das Vakuum zu befassen.

Seit es in den Schulen Physikunterricht gibt, führt man den Schülern „Geißlersche Röhren“ vor (Heinrich Geißler, 1814 bis 1879). Es sind Glasröhren, in deren Enden zwei Metallplättchen eingeschmolzen wurden. Die Röhren enthalten verdünnte Luft oder ein anderes Gas unter niedrigem Druck.

Legt man eine Spannung von mehreren tausend Volt an die Metallplatten, leuchtet das Röhreninnere auf, und zwar wiederum in einer für das Füllgas charakteristischen Farbe. In der Röhre treten die uns bekannten Ionisierungserscheinungen auf. Die Ladungsträger, die den Anstoß zur Ionen- und Elektronenlawine geben, entstammen diesmal allerdings keiner Glühkatode, sondern dem Füllgas selbst. Stets gibt es darin einige Elektronen und Ionen, die durch die hohe Spannung so viel Bewegungsenergie erhalten, daß sie Atome ionisieren oder zu Lichtblitzen anregen.

Die Hoffnung, aus den Geißlerschen Röhren eine Lichtquelle für die allgemeine Beleuchtung entwickeln zu können, erfüllte sich nicht. Die Helligkeit blieb zu gering; die Farben waren für das Auge ungünstig. Die hohe Betriebsspannung erschwerte wegen der Isolierung die Installation.

Trotzdem haben sich die Nachfahren der Geißlerschen Röhren ein Anwendungsgebiet reserviert. Ihre Farben und die Möglichkeit, die Glasröhren zu den verschiedensten Formen zu biegen, machen sie für Aufgaben gut geeignet, bei denen vor allem eine auffällige Wirkung erzielt werden soll. Das gilt, besonders für



„Werbeleuchtröhren“, deren Licht, über Geschäften oder Gaststätten strahlend, das bunte Bild abendlicher Straßen bestimmt. Die Werbeleuchtröhren werden mit Wechselspannung betrieben, die durch einen Transformator auf den erforderlichen hohen Wert gebracht wurde. Im allgemeinen wählt man die Spannung des Transformators so, daß mehrere Werbeleuchtröhren hintereinandergeschaltet werden können. Der Transformator ist so konstruiert, daß er selbsttätig ein unzulässiges Anwachsen der Stromstärke verhindert.

Auch nach der Erfindung der Glühlampe erlosch das Interesse an den Leuchterscheinungen in verdünnten Gasen nicht – im Gegenteil: Der sehr schlechte Wirkungsgrad aller Glühlampen lenkte die Aufmerksamkeit der Techniker erneut auf die Schaffung anderer Lichtquellen.

Eines der ersten Ergebnisse war die „Natriumdampflampe“. Bringt man in einer Röhre durch Anlegen einer elektrischen Spannung Natriumdampf zum Leuchten, strahlt er ein intensives gelbes Licht aus, für das unser Auge besonders empfindlich ist. Der Wirkungsgrad einer Natriumdampflampe übertrifft den einer Glühlampe mehrfach. Trotzdem ist die Natriumdampflampe nur in Verbindung mit anderen Lichtquellen für die Allgemeinbeleuchtung geeignet; denn in ihrem einfarbigen Licht verschwinden alle Farbunterschiede im beleuchteten Raum. Die Gegenstände – außer gelben – erscheinen grau oder schwarz. Die Natriumdampflampe wird daher vor allem dort eingesetzt, wo es auf gute Erkennbarkeit der Konturen von Gegenständen ankommt. Wir finden sie bei der Straßenbeleuchtung, auf Werkhöfen und Lagerplätzen.

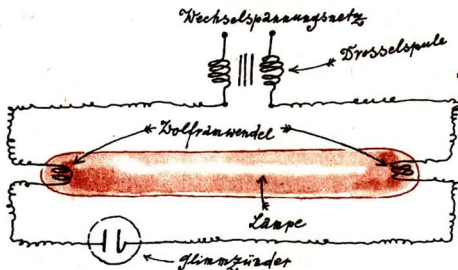
Weit verbreitet ist die „Leuchtstofflampe“. Sie wird – im Gegensatz zu Werbeleuchtröhren – mit normaler Netzspannung betrieben; man nennt sie daher genauer „Niederspannungs-Leuchtstofflampen“. Ihr Kolben enthält Quecksilberdampf unter niedrigem Druck.

Quecksilberdampf sendet, wenn er zum Leuchten angeregt wird, nicht nur das bereits erwähnte bläulich-grüne Licht aus, sondern vor allem unsichtbare ultraviolette Strahlung. Wenn man den Röhrenkolben aus Quarzglas anfertigt, tritt diese Strahlung ins Freie. Damit wird die Röhre zur „Höhensonne“, deren biologische Wirkungen jedermann bekannt sind.

In der Leuchtstofflampe verbleiben die ultravioletten Strahlen im Röhrenkolben, weil er aus gewöhnlichem Glas besteht. Sie prallen auf eine Leuchtstoffschicht, mit der die Innenwand der Röhre überzogen ist. Diese Schicht setzt sich aus Stoffen zusammen, die hell aufleuchten, wenn sie von ultravioletter Strahlung getroffen werden. Die Leuchtstoffschicht „transformiert“ also das unsichtbare ultraviolette Licht in sichtbares Licht. Seine Farbtonung läßt sich durch eine entsprechende Zusammensetzung des Leuchtstoffes variieren.



Damit die Leuchtstofflampe trotz der niedrigen Netzspannung zünden kann, sind noch einige Zusatzeinrichtungen erforderlich. Zunächst müssen reichlich Elektronen zur Verfügung stehen. Sie entstammen Wolframwendeln, die beim Einschalten der Lampe



zum Glühen gebracht werden. Nach einer Anheizdauer von einigen Sekunden wird der Strom durch die Wolframwendel vom „Glimmzünder“ selbsttätig unterbrochen. Dieser ist im Prinzip nichts anderes als eine Sonderform des uns hinlänglich bekannten Bimetallschalters.

Beim Ausschalten des Heizstromes bricht das Magnetfeld der Drosselspule zusammen, die der Leuchtstoffröhre vorgeschaltet wird. Durch die Selbstinduktion der Drosselspule entsteht ein Impuls hoher Spannung, der die Röhre zündet. Sie brennt anschließend mit der normalen Netzspannung weiter. Während des Betriebes der Röhre begrenzt die Drosselspule durch ihren Wechselstromwiderstand die Stromstärke.

Der technische Aufwand für eine Niederspannungs-Leuchtstofflampe ist demnach größer als der für eine Glühlampe. Er wird aber schnell wettgemacht: Die Lichtausbeute der Leuchtstofflampe ist drei- bis viermal so groß wie die der Glühlampe, ihre Lebensdauer drei- bis fünfmal höher.

Glimmzünder und Drosselspule sind entbehrlich, wenn man die Leuchtstofflampen mit Hochspannung speist. Wie bei Werbeleuchttröhen werden mehrere Leuchtstofflampen hintereinandergeschaltet, ein Spezialtransformator sorgt gleichzeitig für die Hochspannung und für die nötige Strombegrenzung. Ein Nachteil dieser Lampen ist wieder, daß die hohen Betriebsspannungen besondere Isolierungs- und Sicherheitsmaßnahmen erfordern.

MHD-Generator und Ionenrakete

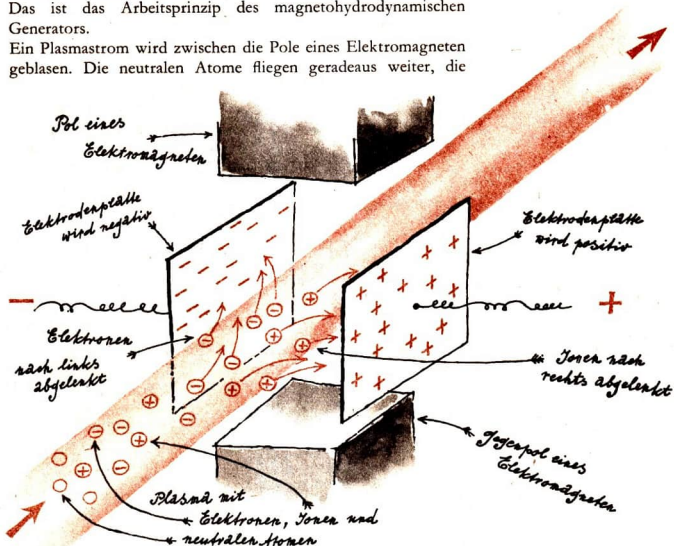
Wissenschaftler und Techniker sind selten Freunde langer Worte. Immer wieder prägen sie neue Abkürzungen, und nicht wenige

davon haben wir in unseren täglichen Sprachschatz übernommen, denken wir etwa an „PVC“ oder „UKW“.

Den meisten Lesern wird der Name „MHD-Generator“ noch fremd klingen, auch wenn er in jüngster Zeit immer häufiger in Zeitschriften und Büchern auftaucht. Die Bezeichnung „magneto-hydrodynamischer Generator“ verrät bereits ein wenig mehr. Offensichtlich handelt es sich um eine Elektroenergiequelle, in der nicht nur magnetische Kräfte eine Rolle spielen, sondern auch Gesetzmäßigkeiten der Strömungslehre, der Hydrodynamik. Der magnetohydrodynamische Generator stellt einen weiteren Versuch dar, die Energiegewinnung möglichst zu vereinfachen und den Umweg über Turbinen und Generatoren wegfällen zu lassen.

Im Plasma finden wir nebeneinander Ionen, Elektronen und neutrale Atome. Da diese Teilchen gut durcheinandergemischt sind, ist das Plasma nach außen hin elektrisch neutral. Doch was würde geschehen, wenn wir die Ladungsträger im Plasma so sortierten, daß sich alle Ionen an einer und alle Elektronen an anderer Stelle sammeln? Offensichtlich würde dann zwischen den beiden Ladungsgebieten eine elektrische Spannung entstehen, die man zum Antrieb eines Stromes ausnutzen könnte. Das ist das Arbeitsprinzip des magnetohydrodynamischen Generators.

Ein Plasmaström wird zwischen die Pole eines Elektromagneten geblasen. Die neutralen Atome fliegen geradeaus weiter, die



Elektronen und Ionen aber werden als geladene Teilchen von den magnetischen Kräften zur Seite gelenkt. Dabei weichen die negativen Elektronen nach der einen, die positiven Ionen nach der anderen Seite aus. Beide Arten von Ladungsträgern treffen auf je eine Elektrodenplatte, wo sie ihre Ladung abgeben: Die Elektronen sammeln sich auf der einen Platte, die infolgedessen negativ wird; die Ionen entziehen der anderen Platte Elektronen und lassen sie damit positiv werden. In einem Leiter, der die Platten miteinander verbindet, fließt Gleichstrom.

Woher stammt das Plasma? Neben der „elektrischen“ Erzeugung eines Plasmas, wie wir sie auf den vorausgegangenen Seiten kennenlernten, gibt es noch einen anderen Weg. Erhitzt man ein Gas stark, so dissoziieren seine Moleküle in ^{*}Atome, und bei sehr hohen Temperaturen kommt es durch Zusammenstöße der mit hoher Geschwindigkeit durcheinanderfliegenden Atome zur Ionisierung. Das Gas geht in den Plasmazustand über.

Die notwendige Erhitzung des Gases ließe sich in einer Brennkammer erreichen oder aber, indem man das Gas durch einen Kernreaktor strömen ließe. Es könnte nach dem Passieren des Magnetfeldes wieder aufgefangen und in ständigem Kreislauf erneut durch den Kernreaktor gepumpt werden. Damit wäre tatsächlich die direkte Umwandlung der im Reaktor freiwerdenden Wärme in Elektroenergie erreicht. Berechnungen haben ergeben, daß sich die Umwandlung mit einem Wirkungsgrad vollzöge, der den aller anderen Methoden der Energieerzeugung weit hinter sich ließe.

Gegenwärtig gibt es nur Versuchsmodelle von MHD-Generatoren, die für einige Minuten im Höchstfall eine Leistung von wenigen Kilowatt abgeben. Unter anderem sind es vor allem Werkstoffprobleme, die dem Bau leistungsfähiger MHD-Generatoren noch im Wege stehen. MHD-Generatoren müssen möglichst mit Gastemperaturen von mehr als 3000 °C arbeiten, und man kennt heute noch keine Werkstoffe, die solche Temperaturen auf die Dauer aushalten.

Noch viel kritischer ist die Werkstofffrage bei einer äußerst wichtigen Aufgabe, die ebenfalls nur in engem Zusammenhang mit der Plasmaphysik gelöst werden kann: bei der Gewinnung von Kernenergie durch Verschmelzung leichter Atomkerne. Wir können die auftretenden Probleme nicht näher behandeln, sondern nur erwähnen, daß es dabei unter anderem nötig ist, ein Plasma auf eine Temperatur von einigen hundert Millionen Grad zu erhitzen und für eine kurze Zeitspanne auf dieser Temperatur zu halten.

Ein Raumschiff, das die Erde verläßt, braucht ein Triebwerk, das einen sehr großen „Schub“ liefert. Befindet sich das Raumschiff dagegen in den Tiefen des Planetensystems, so ist normalerweise nur ein Antriebssystem geringen Schubs nötig. Es muß dafür aber längere Zeit hindurch arbeiten können. Seit einigen

Jahren sieht man im „Ionentriebwerk“ eine Möglichkeit, Raumschiffe über lange Zeitspannen zu beschleunigen.

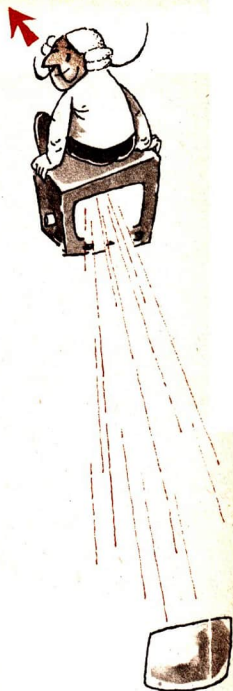
Stellen Sie sich vor, man habe die Bildröhre Ihres Fernsehempfängers in den Weltraum gebracht und den Bildschirm samt der Stirnfläche entfernt. Schalten Sie die Heizung der Röhre ein, fliegen Elektronen in Richtung auf den ehemaligen Bildschirm. Sie werden durch die Anode beschleunigt und treten mit hoher Geschwindigkeit in den Weltraum aus. Wie bei jedem anderen Raketentreibmittel würde der Rückstoß die Bildröhre entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Elektronen beschleunigen. Die Bildröhre wäre zur „Elektronenrakete“ geworden.

Trotzdem wird man wahrscheinlich keine Raumschiffe mit Elektronenantrieb bauen. Elektronen sind sehr leicht; infolgedessen bliebe der Rückstoß sehr gering.

Weit bessere Ergebnisse werden möglich sein, wenn man die Elektronen durch die vieltausendfach schwereren Ionen ersetzt; denn auch diese lassen sich durch elektrische Kräfte auf hohe Geschwindigkeit bringen. Wenn man sie in den Weltraum ausstößt, können sie ein Raumschiff beschleunigen.

Als „Treibstoff“ für eine Ionenrakete eignen sich Alkalimetalle (z. B. Zäsium oder Lithium). Man verdampft und ionisiert sie. Die entstehenden positiven Ionen werden durch Elektroden, die an hoher negativer Spannung liegen, beschleunigt und strömen in den Weltraum. Die beim Ionisieren abgespalteten Elektronen werden ebenfalls durch einen Beschleuniger in den Raum „geschossen“ und vereinigen sich hinter der Rakete wieder mit den Metallionen. Andere Überlegungen gehen dahin, statt Elektronen negative Ionen zu verwenden. Die Rakete stieße dann einen Strom positiver und einen Strom negativer Ionen aus, die sich hinter der Rakete vermischen und „neutralisieren“ würden.

Wenn gegenwärtig auch noch keine Ionentriebwerke gebaut werden können, so wird doch in einigen Ländern an ihrer Verwirklichung gearbeitet. Ob und wann sie je zum Einsatz kommen werden, vermag heute noch niemand zu entscheiden.



VIELSEITIGE HALBLEITER

Leitungselektronen bekommen Gesellschaft

Bereits auf den ersten Seiten dieses Buches erwähnten wir die Halbleiter¹. Sie leiten den elektrischen Strom schlechter als Leiter, aber besser als Isolatoren; außerdem hängt ihr Leistungsvermögen in starkem Maße von der Temperatur ab. Je höher sie ist, desto geringeren Widerstand setzen Halbleiter dem elektrischen Strom entgegen.

¹ Siehe auch: Walter Conrad: Streifzüge durch die Halbleitertechnik. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1963.

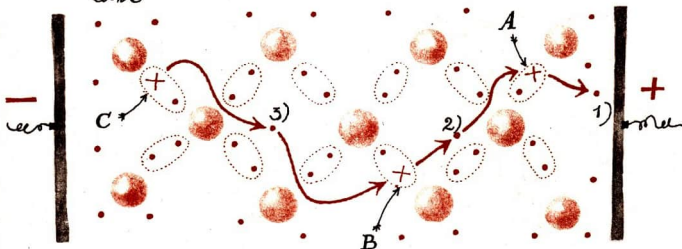
Aus diesem Verhalten können wir schließen, daß in Halbleitern die Leitungselektronen weniger dicht verteilt sind als in Leitern und daß die Zahl der Leitungselektronen mit der Temperatur wächst. Um herauszufinden, welche Vorgänge sich in einem Halbleiter abspielen, wollen wir eine der vielen Halbleitersubstanzen näher untersuchen, und zwar das für die Halbleitertechnik besonders wichtige Germanium (Ge).

Germanium ist vierwertig. Jedes seiner vier „Valenzelektronen“ (Außenelektronen) ist im „idealen“ Germaniumkristall an ein Valenzelektron eines Nachbaratoms gebunden. Die Skizze zeigt das Schema des Kristallaufbaus. Sämtliche Valenzelektronen werden für den Kristallaufbau benötigt, Leitungselektronen bleiben nicht „übrig“. Der dargestellte Germaniumkristall wäre ein Nichtleiter.

In Wirklichkeit sind die Germaniumatome, wie die Atome jedes anderen Stoffes, in ständiger Bewegung. Sie schwingen um ihre Ruhelagen. Dabei „zerreißen“ Bindungen zwischen den Atomen, und es werden Elektronen frei, die sich fortan als Leitungselektronen durch den Kristall bewegen können. Je höher die Temperatur des Kristalls ist, desto heftiger schwingen die Atome, desto mehr Bindungen brechen auf. Die Zahl der Leitungselektronen und damit die elektrische Leitfähigkeit nehmen mit der Temperatur rasch zu. Trotzdem bleiben es wenige Leitungselektronen, verglichen mit der Zahl der vorhandenen Valenzelektronen.

Überall dort, wo eine Bindung aufbrach, fehlt ein Elektron. Es entsteht ein „Loch“, das sich wegen des Mangels an negativer Ladung wie eine positive elektrische Ladung verhält. Es kann zwar durch ein anderes Leitungselektron geschlossen werden, aber auch dort, wo dieses Leitungselektron seiner Bindung „entkam“, ließ es ein Loch zurück. Es „springen“ also nicht nur Elektronen durch den Germaniumkristall, sondern – in entgegengesetzter Richtung wie die Elektronen – auch Löcher. Verbinden wir gegenüberliegende Flächen des Germaniumkristalls mit einer Spannungsquelle, wandern die Leitungs-

- 1) Ein Elektron ist abgewandert, Loch A entsteht
- 2) Ein Elektron füllt Loch A und hinterläßt Loch B
- 3) Ein Elektron füllt Loch B, hinterläßt Loch C



*Eigenleitung
in Germanium*

elektronen in Richtung des positiven Anschlusses, die Löcher dagegen in Richtung des negativen. Neben dem Elektronenstrom fließt im Germanium in Gegenrichtung ein „Löcherstrom“. Das ist ein grundsätzlicher Unterschied zum Verhalten der Leiter, in denen bereits bei normaler Temperatur fast jedes Atom ein Leitungselektron beigesteuert hat und damit ein „Loch“ aufweist.

In Leitern wird die Leitfähigkeit durch geringfügige Verunreinigungen stark verändert – denken wir nur an die Notwendigkeit der elektrolytischen Kupferraffination. Bei Halbleitern ist dieser Effekt noch viel auffälliger. Hier reichen oft schon Verunreinigungen, die nicht einmal mehr chemisch nachweisbar sind, um das Verhalten des betreffenden Halbleiters gründlich zu wandeln. Die Gewinnung von Halbleitermaterial wird dadurch ungemein erschwert. Andererseits kann man durch „gewollte“ Verunreinigungen, durch den Einbau von „Störstellen“, Halbleiter mit genau vorbestimmten Eigenschaften gewinnen.

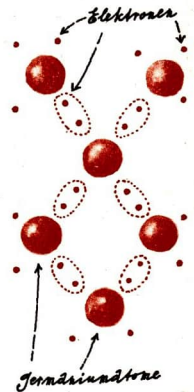
„Bauen“ wir zum Beispiel in einen Germaniumkristall fünfwertige Arsenatome ein, so werden von den fünf Valenzelektronen des Arsens nur vier an benachbarte Germaniumatome gebunden. Das fünfte ist bereits bei Zimmertemperatur frei und kann im Kristall wandern. Es besteht daher in einem solchen Halbleiter ein Überschuß an negativen Leitungselektronen; wir nennen das mit Arsen (oder einem anderen fünfwertigen Stoff) „dotierte“ Germanium „n-Germanium“.

Ebenso wichtig ist ein anderer Typ der „Störstellenleitung“: Man kann auch dreiwertige Atome, zum Beispiel Aluminium, in einen Halbleiterkristall einfügen. Diesmal fehlt von vornherein ein Elektron an jeder Störstelle; es tritt ein Loch auf. Daher sind es vor allem die positiven Löcher, die die Leitfähigkeit verursachen. Deshalb heißt das mit dreiwertigen Atomen dotierte Germanium „p-Germanium“.

Man kennt eine große Zahl von halbleitenden Stoffen. Neben Germanium und Silizium zählen zu ihnen beispielsweise Selen, unter gewissen Voraussetzungen sogar Kohlenstoff, außerdem viele anorganische Verbindungen, wie Kupferoxydul, Urandioxyd, Blei- und Kadmiumsulfid, Siliziumkarbid, Zinkoxyd und andere. In jüngster Zeit beginnen auch organische Verbindungen mit Halbleitereigenschaften Bedeutung zu erlangen.

Die Gewinnung der meisten Halbleitersubstanzen ist nur durch komplizierte technologische Prozesse möglich, weil sich die notwendige Reinheit des Materials nur sehr schwer erreichen läßt.

Besonders deutlich ist das bei den Elementen Germanium und Silizium. Sie dürfen, wenn sie als „halbleiterrein“ gelten sollen, unter 1 Milliarde Atomen nur 1 Fremdatom enthalten! Mit chemischen Methoden ist eine solche Reinheit nicht zu erreichen. Nur physikalische Verfahren, in deren Verlauf Germanium und Silizium mehrmals geschmolzen werden und wieder erstarren,



führen zum Ziel. Auch die Gewinnung der Kristalle ist alles andere als einfach, denn es werden Kristalle mit ganz regelmäßigem, fehlerlosem Aufbau gefordert, sogenannte „Einkristalle“.

Widerstände und Gleichrichter auf neue Art

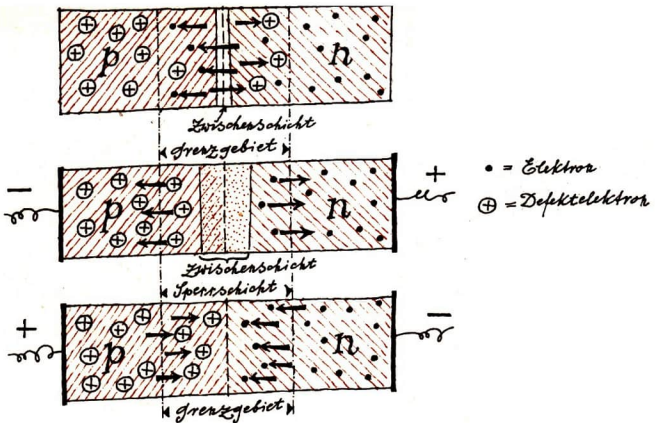
Der Widerstand vieler Geräte und Bauelemente nimmt im Betrieb durch die Erwärmung zu. Der Widerstand von Halbleitermaterial dagegen sinkt bei einer Temperaturerhöhung. Schaltet man daher einen Widerstand aus Halbleitermaterial mit einem „normalen“ Widerstand in einem Stromkreis hintereinander, läßt sich erreichen, daß die Widerstandsabnahme des ebenfalls warmwerdenden Halbleiters und die Widerstandszunahme des metallischen Leiters einander gerade aufheben. Der Gesamtwiderstand im Stromkreis bleibt unverändert. Das ist häufig wichtig, zum Beispiel für Meßapparaturen, die möglichst temperaturunabhängig arbeiten sollen.

Es gibt spezielle Halbleiterwiderstände für solche Zwecke, die uns bereits bekannten „Heißleiter“. Sie werden auf verhältnismäßig einfache Weise und aus billigen Halbleitermaterialien hergestellt. Man kann sie nicht nur als Ausgleichswiderstände, sondern auch als Schutzwiderstände benutzen. Glühlampen und Motoren zum Beispiel setzen unmittelbar nach dem Einschalten dem elektrischen Strom einen nur geringen Widerstand entgegen. Um diesen „Einschaltstromstoß“ abzufangen, schaltet man Glühlampen und Motoren kleiner Leistung bisweilen Heißleiter vor. Im Augenblick des Einschaltens sind diese noch kalt und setzen daher dem Strom großen Widerstand entgegen. Der geringe Widerstand der nachgeschalteten Lampe oder des nachgeschalteten Motors kann demzufolge keinen unzulässig starken Strom hervorrufen. Allmählich sinkt dann der Widerstand des sich erwärmenden Thermistors; währenddessen ist aber auch der Lampen- beziehungsweise der Motorwiderstand gewachsen, und infolge dieses Wechselspiels klettert die Stromstärke nur langsam auf ihren Betriebswert.

Mit der Bedeutung der Heißleiter für Temperaturmessungen haben wir uns schon beschäftigt. Erwähnen wir noch, daß man auch bei der Messung von Strömungsgeschwindigkeiten und bei der Kontrolle der Zusammensetzung von Rauchgasen häufig auf Heißleiter zurückgreift.

Schon mehrfach erwähnten wir die Notwendigkeit, Wechselstrom in Gleichstrom zu verwandeln. Mit Hilfe der „Halbleitergleichrichter“ ist diese Umwandlung leicht und mit hohem Wirkungsgrad möglich.

Untersuchen wir ein Stück Halbleitergermanium oder -silizium, dessen linke Hälfte p-leitend und dessen rechte Hälfte n-leitend ist. Auch an der Trennfläche zwischen den beiden Gebieten bleiben die Elektronen und Löcher niemals in Ruhe. Aus dem n-Gebiet



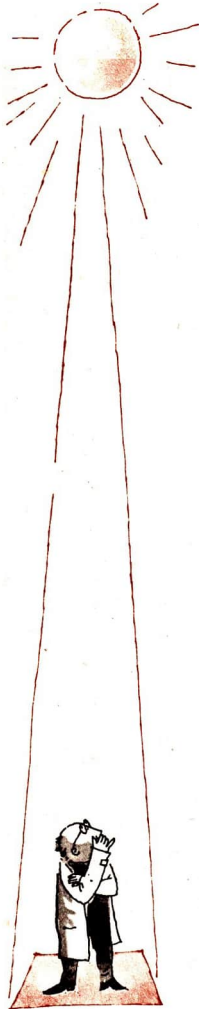
geraten einige Elektronen in das grenznahe p-Gebiet, aus dem p-Gebiet dringen Löcher in das grenznahe n-Gebiet vor. Außerdem gehen einige Löcher und Elektronen durch gegenseitige Vereinigung, durch Rekombination, verloren.

Die ersten Elektronen, die ins p-Gebiet gelangten, stoßen ihre Nachfolger ab. Entsprechend verhalten sich die in das n-Gebiet eingedrungenen Löcher. Es entsteht auf jeder Seite eine Art Zaun, der weitere „Ladungsträger“ von der anderen Seite aussperrt. Unmittelbar an der Trennfläche bildet sich eine dünne Zwischenschicht, die fast keine Ladungsträger mehr aufweist und daher wie ein hoher Widerstand wirkt.

Die Verhältnisse ändern sich, sobald eine elektrische Spannung an den Kristall gelegt wird. Ist der Pluspol der Spannungsquelle mit dem n-Gebiet, der Minuspol mit dem p-Gebiet verbunden, fließt so gut wie kein Strom durch den Kristall. Es werden Ladungsträger aus dem Grenzgebiet abgesaugt, während die eingedrungenen „verkehrten“ Ladungsträger zurückbleiben. Die Zwischenschicht verbreitert sich; das Grenzgebiet läßt überhaupt keinen Strom mehr hindurch, es wird zur „Sperrschicht“.

Polt man die Spannungsquelle um, sinkt der Widerstand des Grenzgebietes stark ab, die Sperrschicht verschwindet. Die Spannungsquelle „schiebt“ jetzt Ladungsträger, Elektronen und Löcher, in das Grenzgebiet. Die „Zäune“ zwischen n- und p-Gebiet werden niedergerissen.

Der „pn-Kristall“ verhält sich also wie ein Ventil: In einer Richtung läßt er den Strom ungehindert passieren, in der anderen dagegen fast überhaupt nicht.



Wenn man den pn-Kristall in den Stromkreis einer Wechselspannungsquelle schaltet, wirkt er als Gleichrichter. Es fließt immer nur während der Halbwellen Strom durch den Kristall, bei denen der positive Pol der Spannungsquelle am p-Gebiet liegt. Die anderen Halbwellen werden „gesperrt“.

Halbleitergleichrichter sind anderen Gleichrichterarten in vieler Hinsicht überlegen. Zunächst beanspruchen sie nur einen kleinen Bruchteil des Raumes älterer Gleichrichter (s. S. 170). Bereits bei zwei bekannten Halbleitergleichrichtern, beim Selen- und beim Kupferoxydulgleichrichter, wirkt sich das aus. Viel deutlicher wird es beim Germanium- und Siliziumgleichrichter. Die „Gleichrichterröhre“, die noch in zahlreichen Rundfunk- und Fernsehgeräten vertreten ist, kann ohne weiteres durch einen Halbleitergleichrichter von der Größe einer Bohne ersetzt werden. Industriegleichrichter für große Leistungen benötigen, wenn man sie mit Siliziumgleichrichtern ausstattet, keinen „Gleichrichtersaal“ mehr, sondern sind in einem schrankähnlichen Gestell unterzubringen.

Im Wirkungsgrad sind Halbleitergleichrichter allen anderen Gleichrichtern weit überlegen. Mehr als 99% der Energie, die einem Siliziumgleichrichter zugeführt wird, finden sich im Gleichstrom wieder. Dieser hohe Wirkungsgrad ist nicht nur wertvoll, weil dadurch erhebliche Mengen an Elektroenergie eingespart werden, sondern auch deshalb, weil mit den sinkenden Verlusten die Wärmeentwicklung am Gleichrichter zurückgeht. Die Kühleinrichtungen für Gleichrichteraggregate können infolgedessen verhältnismäßig einfach bleiben.

Erwähnen wir schließlich noch, daß Halbleitergleichrichter keine besondere Wartung erfordern und sich durch beinahe unbegrenzte Lebensdauer auszeichnen.

Halbleiter im Strahlenkegel

Es dürfte schwerfallen, jemanden zu finden, der den Ausdruck „Sonnenbatterie“ noch nicht gelesen oder gehört hat. Doch das ist erst seit wenigen Jahren so, genaugenommen seit dem 4. Oktober 1957; denn an diesem Tage stieß die Sowjetunion durch den Start des ersten Sputniks das Fenster zum Weltraum auf, und seitdem sind Sonnenbatterien als Energiequellen für die elektrischen Anlagen von Satelliten und Raumschiffen immer wichtiger geworden.

Allerdings interessieren sich Fachleute schon viel länger für den gewaltigen Strom von Energie, den die Sonne zur Erde schickt. Denkt man sich die Erdatmosphäre weg, so kommt bei senkrechtem Strahleneinfall auf jeden Quadratmeter Erdoberfläche eine Leistung von rund 1,4 kW. Wenn auch die wirklich erreichbaren Werte, bedingt durch die Atmosphäre, durch geographische und klimatische Verhältnisse, weit niedriger liegen, so ist die

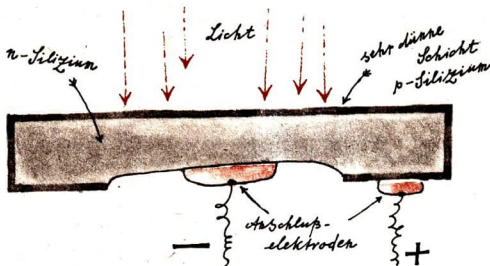
↖ 1,4 kW

Ausnutzung der Sonnenenergie für die Technik doch ein sehr erstrebenswertes Ziel.

Die meisten Versuche früherer Zeiten gingen davon aus, die Sonnenstrahlung durch Brenngläser oder -spiegel zu sammeln; schon Archimedes soll auf diese Weise römische Schiffe in Brand gesetzt haben. Aber eine Energiegewinnung mit Brennsiegeln oder Sammellinsen war doch recht kompliziert und blieb auf einige wenige Ausführungen beschränkt.

Erst als man entdeckte, daß sich mit sogenannten Fotoelementen Lichtstrahlung unmittelbar in Elektrizität verwandeln läßt, rückte die Ausnutzung der Sonnenenergie näher.

Besondere Bedeutung hat das Siliziumfotoelement. Seine Herstellung beginnt mit n-leitendem Silizium. Daraus gewinnt man dünne, einer Rasierklinge nach Größe und Form ähnliche



Plättchen. Sie werden an der Oberfläche mit dreiwertigen Boratomen dotiert. Das ganze Plättchen wird dadurch in eine hauchdünne, p-leitende Schicht „eingepackt“. Auf der Rückseite des Plättchens wird die p-Schicht anschließend wieder weggeätzt. p- und n-Gebiet werden mit Anschlußelektroden versehen.

Entscheidend für die Funktion des Fotoelements ist die Übergangsschicht zwischen p- und n-leitendem Silizium. Zunächst haben wir es mit ähnlichen Vorgängen zu tun wie beim Halbleitergleichrichter. Elektronen verlaufen sich in das p-Silizium und Löcher in das n-Silizium; sehr bald stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem keine weiteren Grenzübertritte mehr stattfinden.

Setzen wir das Fotoelement dem Licht aus, so dringt dieses durch die dünne p-Schicht bis zum pn-Übergang vor. Dort „zerreißt“ die Lichtenergie Bindungen zwischen den Siliziumatomen; es entstehen zahlreiche neue Ladungsträgerpaare. Dabei werden die Löcher gezwungen, in das p-Silizium zu wandern, während die befreiten Elektronen in das n-Silizium gedrängt werden. Im n-Silizium sammelt sich ein Elektronenüberschuß,

im p-Silizium herrscht Elektronenmangel (bzw. Löcherüberschuß). Zwischen beiden Gebieten entsteht eine elektrische Spannung. Verbinden wir p- und n-Silizium durch einen Leiter, fließt Strom.

Die Spannung des Siliziumfotoelements ist gering und beträgt noch nicht einmal 1 V. Sie hängt vor allem von der Intensität des Lichts, nicht aber von der Größe der Elementenfläche ab. Werden höhere Spannungen benötigt, muß man eine entsprechende Zahl von Fotoelementen hintereinanderschalten.

Die Stärke des verfügbaren Stromes dagegen wächst mit der Elementenfläche. Da man noch keine Siliziumelemente sehr großer Oberfläche herstellen kann, schaltet man mehrere Elemente parallel.

Meistens werden Hintereinander- und Parallelschaltung gleichzeitig angewendet; statt einzelner Elemente benutzt man „Sonnenbatterien“. Zur Stromversorgung von Satelliten sind oftmals Tausende einzelner Siliziumzellen zu Batterien zusammengeschaltet.

Lange vor dem Siliziumfotoelement wurde die Selenzelle entdeckt, ein Fotoelement auf der Grundlage von Selen und Selenverbindungen. Sie liefert bei heller Beleuchtung eine Spannung von nur etwa 0,5 V. Diese ist ein Maß für die Beleuchtungsstärke, sie kann in einem elektrischen Meßinstrument angezeigt werden. Auf dieser Basis arbeiten die bekannten fotoelektrischen Belichtungsmesser.

Wie steht es um die Energiegewinnung aus Fotoelementen? Hier ist zunächst eines zu bedenken: Sonnenenergie steht uns zwar in reichem Maße zur Verfügung; sie verteilt sich aber auf eine sehr große Fläche. In keinem Fall könnten wir einem Quadratmeter sonnenbestrahlter Fläche eine Leistung von mehr als 1,4 kW entnehmen. In Wirklichkeit ist, wie erwähnt, es bereits, die verfügbare Leistung noch weit niedriger. Sie sinkt, wenn wir die klimatischen und geographischen Verhältnisse Mitteleuropas zugrunde legen, sogar auf einen Bruchteil des theoretischen Maximalwertes.

Da Sonnenbatterien vorerst noch teuer sind und man keine beliebig große Fläche mit ihnen bedecken kann, muß man die verfügbare Sonnenenergie so gut wie möglich ausnutzen. Es kommt darauf an, den Wirkungsgrad der Fotoelemente zu erhöhen.

Dabei schneidet das Selenfotoelement von vornherein sehr schlecht ab. Sein Wirkungsgrad beträgt nicht einmal 1%, von 1 kW eingestrahelter Sonnenleistung erhielten wir bestenfalls 10 W an elektrischer Leistung. Selbst in sehr günstig gelegenen, sonnenreichen Gebieten brauchte man, um etwa eine kleine Trinkwasserpumpe anzutreiben, bereits eine Elementenfläche von mindestens 50 m². Allein Unterbringung und Drehung der Batterie mit der Sonne würden große Schwierigkeiten bereiten.

Weit höher ist der Wirkungsgrad des Siliziumfotoelements. Er kann 20% erreichen und liegt bei Sonnenzellen aus der Serienfertigung ungefähr bei 12 bis 14%. Der Quadratmeter Elementenfläche würde bei 1 kW Einstrahlung bereits 120 bis 140 W bringen, zum Pumpenantrieb reichen 4 m². Zur Speisung eines Rundfunk-Kleinpempfängers genügen Siliziumbatterien von der Größe einer Schokoladentafel.

Wegen der komplizierten Technologie, wegen des noch hohen Preises und nicht zuletzt wegen der in weiten Teilen der Erde verhältnismäßig geringen Sonnenscheindauer werden Sonnenbatterien bis heute nur eingesetzt, wenn eine Energieversorgung aus anderen Spannungsquellen unmöglich oder sehr schwer wäre.

Satelliten sind hierfür ein Musterbeispiel. Sie sollen monate- oder jahrelang in Betrieb bleiben, das heißt Meßwerte und Beobachtungsdaten zur Erde funken oder Telegramme, Ferngespräche, Rundfunk- und Fernsehsendungen übermitteln. Wollte man die Stromversorgung ausschließlich galvanischen Batterien überlassen, wäre eine Versorgung der elektronischen Bordgeräte ausgeschlossen, weil die Batterien zu groß und zu massig ausfallen müßten. Daher überträgt man die Energieversorgung Sonnenbatterien, die im Weltraum weder durch die Atmosphäre noch durch Bewölkung beeinträchtigt werden.

Um die Sonnenbatterien auch dann auszunutzen, wenn der Satellit nicht sendet, schaltet man zwischen die Sonnenbatterien und die Geräte Akkumulatoren als Elektrizitätsspeicher. Sie werden geladen, solange die Sonnenbatterien dem Licht ausgesetzt sind. Infolgedessen steht auch dann Elektroenergie zur Verfügung, wenn ein Satellit im Erdschatten fliegt; außerdem kann den Akkumulatoren kurzzeitig eine weit größere Leistung entnommen werden als Sonnenbatterien.

Rundfunkempfänger, die aus Sonnenbatterien gespeist werden, existieren seit einigen Jahren. Auch sie müssen mit einem Akkumulator ausgerüstet sein, um die sonnenscheinlosen Stunden zu überbrücken. Da aber in den wirtschaftlich erschlossenen Ländern ein Akkumulator leicht am Lichtnetz aufgeladen werden kann, hat in diesem Fall die teure Sonnenbatterie keine rechte Existenzberechtigung. Deshalb wird der allgemeine Einsatz von Sonnenbatterie-Empfängern vorerst auf Gebiete beschränkt bleiben, die noch nicht elektrifiziert sind.

In der Sowjetunion werden mehrere Empfängertypen angeboten, die vorwiegend für Neulandgebiete, für Jäger, Hirten und Forscher bestimmt sind und aus Sonnenbatterien gespeist werden.

Es gibt außerdem Sonnenkleinstkraftwerke, die von jedermann mit wenigen Handgriffen aufgestellt werden können und beispielsweise Strom für ein Funkgerät oder zum „Entsalzen“ von Wasser liefern. Auch zum Antrieb von Pumpenmotoren werden



in Wüstengebieten hier und da schon mit gutem Erfolg Sonnenbatterien eingesetzt. Es ist nicht ausgeschlossen, daß sie die Diesel- oder Windmotoren auf diesem speziellen Anwendungsgebiet verdrängen werden.

Immer wieder wird die Frage diskutiert, ob es eines Tages Sonnengroßkraftwerke geben wird. 250 Patentanmeldungen und mehr als 6000 wissenschaftliche Arbeiten galten bisher diesem Problem, doch nicht einmal die Wissenschaftler vertreten zur Zeit eine einheitliche Meinung. Gegenwärtig sprechen ernsthafte Gründe gegen die Errichtung von Sonnengroßkraftwerken. Nur wenige Gegenden sind für ihre Aufstellung geeignet. Das Problem der „Spitzenbelastung“ wäre aber auch in diesen Gebieten nicht zu lösen. Nachts und während der Morgen- und Abendspitze ist das Sonnenkraftwerk außer Betrieb. Sonnengroßkraftwerke hätten also nur Sinn, wenn es gelänge, Elektroenergie in großen Mengen zu speichern. Solche Speicher existieren bis heute nicht.

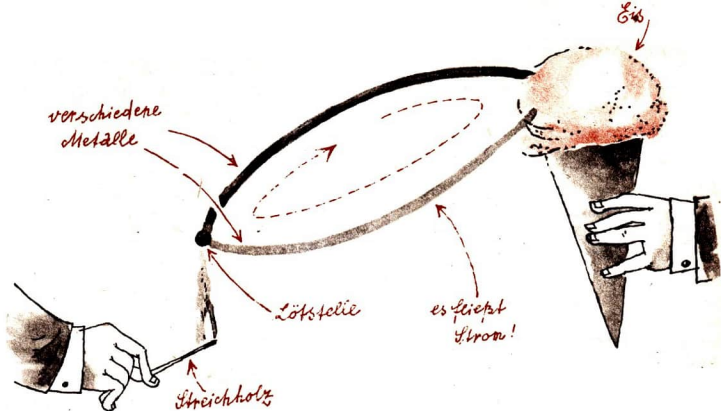
In einer friedlichen, international zusammenarbeitenden Welt, vor allem in der sozialistischen Welt von morgen werden die Energetiker allerdings einer ganz anderen Situation gegenüberstehen. Das ist auch der Grund, weshalb viele Wissenschaftler den Sonnengroßkraftwerken doch recht optimistische Prognosen stellen.

In ein Verbundnetz größten Ausmaßes, das etwa den asiatischen, den afrikanischen und den europäischen Kontinent erfaßte, ließen sich Sonnenkraftwerke sehr wohl nutzbringend eingliedern. Die günstigsten Betriebszeiten mittelasiatischer und nordafrikanischer Werke zum Beispiel liegen um mehrere Stunden auseinander, und es könnte in größerem Umfange ein Energieaustausch erfolgen. Die Möglichkeiten erweiterten sich, wenn man auch den amerikanischen Kontinent an dieses Netz anschloße.

Es läßt sich nicht sagen, ob man eines Tages auf diese heute schon erörterten Projekte zurückgreifen wird oder ob bis dahin andere Energiequellen erschlossen sein werden. Unabhängig davon aber wird die Bedeutung kleinerer Sonnenkraftanlagen in den kommenden Jahren erheblich wachsen.

Spannungsquelle – Kühlschrank – Ofen

Elektrischer Strom erzeugt Wärme: Diese Feststellung ist schon sehr alt. Nicht viel jünger ist auch die Beobachtung der Umkehrung: Wärme kann – ohne den Umweg über mechanische Energie – einen Strom zum Fließen bringen. Schon in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts entstanden „Thermoelemente“, in denen Wärme in Elektrizität umgewandelt wird. Sie sind denkbar einfach aufgebaut: Zwei Drähte aus verschiedenem Material werden an ihren Enden zusammengelötet. Eine



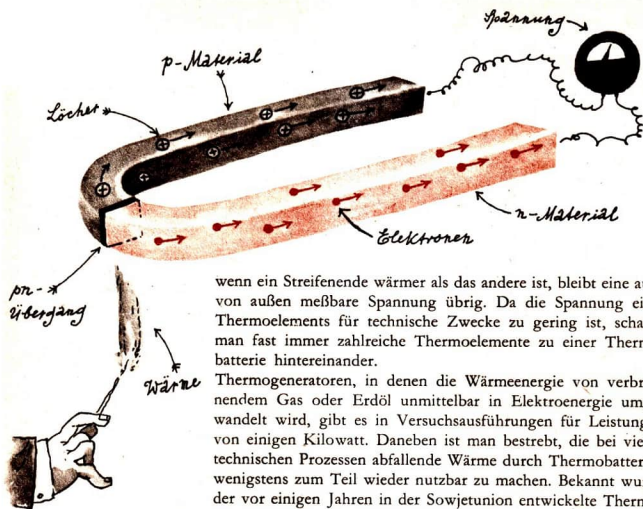
Lötstelle wird erhitzt, die andere gekühlt, und schon fließt in der aus den Drahtstücken gebildeten Schleife Strom!

Trennt man die Schleife an der kalten Lötstelle auf, ist zwischen den Drahtenden eine elektrische Spannung meßbar. Sie kann Strom durch ein elektrisches Gerät treiben.

Wählt man Metalle für den Bau eines Thermoelements, bleibt die Spannung sehr niedrig. Selbst bei großen Temperaturunterschieden zwischen beiden Lötstellen zählt sie nur nach Millivolt. Der Wirkungsgrad der Umwandlung ist denkbar schlecht und erreicht nicht einmal 1%. Daher scheiden solche Thermoelemente für eine Energiegewinnung aus; nur als Temperaturfühler in der Meß- und Regeltechnik werden sie angewandt.

Weit bessere Resultate erhält man, wenn man die Metalle durch Halbleiter ersetzt, etwa durch Indium-Antimon- oder durch Blei-Tellur-Verbindungen. Der Wirkungsgrad erhöht sich auf 5 bis 10%; auch die Spannung steigt.

Ein Halbleiterthermoelement besteht aus einem n- und einem p-leitenden Schenkel, die an einem Ende verbunden sind. Erhitzt man die Verbindungsstelle, kommt es zu ähnlichen Vorgängen wie im Fotoelement. Durch die Wärmeenergie werden neue Ladungsträger erzeugt, die wieder „sortiert“ werden. Im n-Material sammelt sich ein Elektronenüberschuß, im p-Material ein Überschuß an Löchern. Eine elektrische Spannung entsteht. Es ist leicht einzusehen, daß diese Spannung vom Temperaturunterschied zwischen den Schenkeln abhängt. Stellen wir uns vor, auch die kalten Enden seien wieder zusammengefügt. An dieser Stelle entsteht ebenfalls eine elektrische Spannung, die aber der Spannung an der anderen Verbindungsstelle entgegengesetzt ist. Haben beide Nahtstellen die gleiche Temperatur, heben sich die Spannungen auf, da sie gleich groß sind. Nur



wenn ein Streifenende wärmer als das andere ist, bleibt eine auch von außen meßbare Spannung übrig. Da die Spannung eines Thermoelements für technische Zwecke zu gering ist, schaltet man fast immer zahlreiche Thermoelemente zu einer Thermobatterie hintereinander.

Thermogeneratoren, in denen die Wärmeenergie von verbrennendem Gas oder Erdöl unmittelbar in Elektroenergie umgewandelt wird, gibt es in Versuchsausführungen für Leistungen von einigen Kilowatt. Daneben ist man bestrebt, die bei vielen technischen Prozessen abfallende Wärme durch Thermobatterien wenigstens zum Teil wieder nutzbar zu machen. Bekannt wurde der vor einigen Jahren in der Sowjetunion entwickelte Thermogenerator, der die Wärme einer Petroleumlampe in Strom für einen Rundfunkempfänger umwandelt. Ähnliche Batterien werden konstruiert, um die Wärme von Auspuffgasen oder von erhitztem Kühlwasser zur Stromerzeugung zu verwerten.

Das Großkraftwerk auf der Basis von Thermoelementen ist jedoch noch nicht in Sicht. Ehe man es entwerfen könnte, müßte der Wirkungsgrad der Thermoelemente entscheidend verbessert werden; außerdem müßte man Thermoelementen weit höhere Temperaturen zumuten können, als es bis heute der Fall ist.

Eine andere thermoelektrische Erscheinung dagegen wird bestimmt bald verbreitete technische Anwendungen finden. Dreht man den Energiefluß im Thermoelement um, indem man von außen Strom in bestimmter Richtung durch die früher heiße Lötstelle schickt, so entzieht diese ihrer Umgebung Wärme. Mit anderen Worten: Die Lötstelle kühlt. Dieser Effekt ist ebenfalls schon sehr lange bekannt. Seine technische Anwendung galt noch vor fünfzehn Jahren als sinnlos, da mit Metallen nur geringfügige Kühlwirkungen zu erzielen sind.

Auch hier änderte die Einführung von Halbleitermaterialien die Situation gründlich: Verwendet man Wismut-Tellur- oder Wismut-Antimon-Verbindungen zum Aufbau eines „Kühlelementes“, kann man Temperaturerniedrigungen um 80 °C erreichen; dabei wird mehr als die Hälfte der dem Kühlelement

zugeführten elektrischen Leistung in Kühlleistung umgewandelt. Auch diesmal kann man mehrere Kühlelemente zu einer Batterie entsprechender Leistungsfähigkeit vereinen.

Warum das neue Kühlverfahren für die Technik so wichtig werden kann, versteht jeder, der einmal Ärger mit dem Kühlschrank hatte. Die heute üblichen Kälteaggregate sind im Grunde viel zu kompliziert, groß und störanfällig. Ein Halbleiterkühlelement dagegen besteht nur aus einem Stück n- und einem Stück p-leitenden Materials und Kontaktschenkeln. Es enthält keine Teile, die einem Verschleiß unterworfen wären, keine Ventile, keine Heizpatrone, keinen Motor und keine Pumpe. Lediglich ein Transformator und ein Halbleitergleichrichter sind außer dem Kühlelement nötig, um den erforderlichen Gleichstrom zu erzeugen.

In einigen Ländern werden Halbleiter-Kühlbatterien bereits serienmäßig gefertigt. Sie sind ungefähr 4 cm · 4 cm groß, 1 cm dick und können für verschiedene Kühlleistungen kombiniert werden. Es gibt kleine Kühlkammern für Laboratorien, in denen der Kühlraum nur wenige Kubikzentimeter beträgt. Man kennt Halbleiterkühlschränke, die bei gleichem Fassungsvermögen viel kleiner und leichter als Absorber-Kühlschränke sind, und auf internationalen Ausstellungen wurden Halbleiter-Getränkekühler vorgeführt.

Berichte aus der Sowjetunion beschreiben eine Halbleiteranlage zum Milchkühlen, die in der Stunde 120 Liter Milch bis auf 5 °C kühlt.

Plus- und Minuspol dürften Sie allerdings bei einem Halbleiterkühlschrank nicht verwechseln; wenn Sie ihn verkehrt herum anschließen, heizte er. Auch das wird man vielleicht eines Tages technisch nutzen. Man könnte sich beispielsweise in Wohnräumen „Öfen“ denken, die im Winter die Zimmerluft erwärmen, im Sommer dagegen kühlen. Auch sind Temperaturregeleinrichtungen vorstellbar, die je nach Bedarf einmal erwärmen, einmal kühlen.

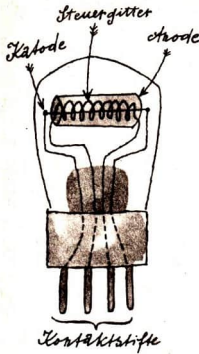


KLEINE URSACHE – GROSSE WIRKUNG

Die Diode wird umgebaut

Als wir das Telefon kennenlernten, haben wir erfahren, wie wichtig die Erfindung der Verstärkerröhre für die Fernsprechtechnik war. Die Notwendigkeit, schwache Wechselspannungen oder -ströme zu verstärken, bestand aber auch an anderer Stelle, zum Beispiel in der Funktechnik oder bei der Messung kleinster elektrischer Spannungen.

Erinnern wir noch einmal daran, warum ein Relais keine Wechselspannungen verstärken kann. Es schaltet mit Hilfe schwacher

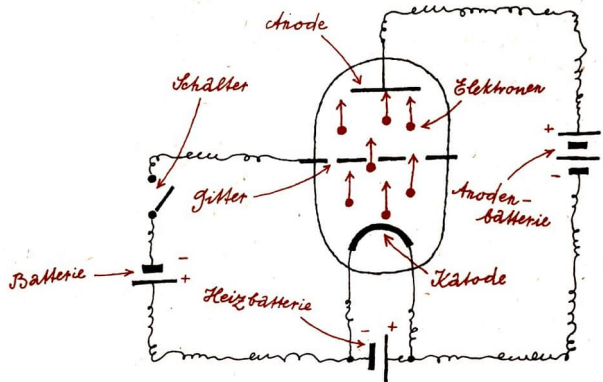


Ströme stärkere Ströme zwar ein und aus, kann sie aber nicht stetig verändern; sein Anker und die Kontaktfedern sind außerdem zu träge, um höheren Wechselspannungsfrequenzen folgen zu können. Die Verstärkerröhre, auch Elektronenröhre genannt, besitzt diese Mängel nicht. In wichtigen Einzelheiten ähnelt ihr Aufbau dem der Diode.

Aus einer elektrisch geheizten Katode treten Elektronen und fliegen durch den luftleeren Glaskolben der Röhre zur Anode. An Anode und Katode wird eine Gleichspannungsquelle so geschaltet, daß die Elektronen durch die Röhre und über die Batterie einen ununterbrochenen Kreislauf vollführen.

Zwischen Katode und Anode ist als dritte Elektrode ein „Steuergritter“ angebracht. Wegen dieser drei Elektroden nennt man die Röhre „Triode“.

Was wird durch die Einfügung des Steuergritters – es ist kein eigentliches Gitter, sondern eine Drahtwendel – erreicht? Zwischen Gitter und Katode der Röhre wurde eine weitere Spannungsquelle angeschlossen. Solange der Schalter geöffnet bleibt,



ist sie allerdings nicht mit dem Gitter verbunden. Die von der Katode kommenden Elektronen fliegen zwischen den Gitterwindungen hindurch zur Anode; ein geringer Teil der Elektronen lädt das Gitter auf.

Betätigen wir den Schalthebel, wird das Gitter mit der Spannungsquelle verbunden. Zwischen Gitter und Katode liegt jetzt Spannung; dabei ist das Gitter gegenüber der Katode negativ. Weil Elektronen gleichfalls negative Ladung tragen, können sie, das Gitter nun nicht mehr ungehindert passieren; sie werden von den Gitterwindungen abgestoßen. Infolgedessen sinkt die

Stromstärke im Kreis Katode–Anode–Anodenbatterie. Je höher die Spannung der Batterie zwischen Gitter und Katode ist, desto größer ist auch die Behinderung des Anodenstromes. Bei einer bestimmten Spannung gelingt es überhaupt keinen Elektronen mehr, das Gitter zu passieren; der Anodenstrom setzt aus.

Was geschieht, wenn wir die Anschlüsse der Batterie zwischen Gitter und Katode vertauschen? Dann ist das Gitter gegenüber der Katode positiv, das heißt, es zieht, wie die Anode, Elektronen an. Da auf die Elektronen gleichzeitig die anziehenden Kräfte der Anode und des Gitters wirken, wird der Elektronenstrom gefördert. Die Stromstärke im Anodenkreis wächst. Zum anderen aber werden jetzt Elektronen vom Gitter weggefangen; sie fließen über die Batterie zur Katode zurück. Gemessen an der Gesamtzahl der durch die Röhre fliegenden Elektronen sind es nur wenige, so daß wir sie hier unbeachtet lassen können. Auch diesmal wirkt sich jede Spannungsänderung auf den Anodenstrom aus.

Das Gitter ist der Katode sehr nahe. Daher rufen bereits kleine Spannungsänderungen am Gitter große Änderungen des Anodenstromes hervor.

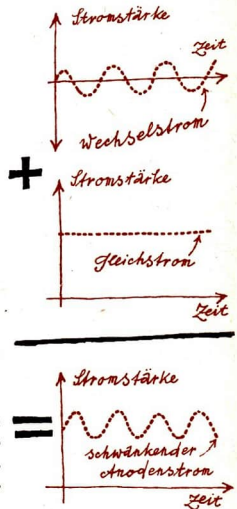
Der Anodenstrom sinkt oder steigt im gleichen Augenblick, da wir den Schalthebel betätigen; denn die Elektronen fliegen mit so hoher Geschwindigkeit durch die Röhre, daß sich jede Änderung am Gitter fast unmittelbar auf den Anodenstrom auswirkt. Die Stromänderung erfolgt so gut wie verzögerungsfrei.

Wir legen nun die Batterie beiseite und schließen stattdessen eine Wechselspannungsquelle an. Sobald wir einschalten, liegt die Wechselspannung zwischen Gitter und Katode der Röhre. Der Anodenstrom wird im Rhythmus der Wechselspannung geschwächt oder verstärkt, er pendelt mit der Frequenz der Wechselspannung am Gitter. Wir können uns vorstellen, daß der Anodenstrom aus Gleichstrom besteht, auf dem ein Wechselstrom „reitet“.

Kleine Spannungsänderungen am Gitter rufen ein kräftiges Schwanken des Anodenstromes hervor – das ist fast schon so etwas wie eine Verstärkerwirkung. Doch ehe wir uns ansehen, wie ein Verstärker tatsächlich aufgebaut ist und funktioniert, seien noch einige Worte über die Röhre gesagt.

Etwas länger als ein halbes Jahrhundert ist es her, seit die ersten Röhren erprobt wurden. In der Zwischenzeit hat man sie ständig verbessert. Die ersten Röhren hatten ungefähr das Format einer Sektflasche. Moderne Empfängerröhren sind im Durchschnitt knapp 5 cm hoch und daumenstark.

Um einen kräftigen Elektronenstrom zu erzielen und die Katode mit Wechselstrom heizen zu können, der sich auf einfache Weise einem Transformator entnehmen läßt, wurde die „indirekt geheizte“ Katode eingeführt. Sie besteht aus einem dünnen Röhrchen. Es ist mit einer Schicht überzogen, die Elektronen



emittiert. Im Röhrchen ist der „Heizer“ untergebracht, eine dünne Drahtwendel, die durch den Heizstrom zum Glühen gebracht wird.

Sehr bald stellte es sich heraus, daß Röhren betriebssicherer und wirkungsvoller arbeiten, wenn man dem Steuergitter weitere Gitter im Raum zwischen Steuergitter und Anode hinzufügt. Unerwünschte Rückwirkungen der Anode auf das Gitter werden vermieden, indem man ein „Schirmgitter“ zwischen diesen beiden Elektroden anbringt. Sekundärelektronen, die unter Umständen aus der Anode herausgeschlagen werden können, macht man durch ein besonderes „Bremsgitter“ unschädlich. So entsteht ein Röhrentyp mit drei Gittern. Es ist die „Pentode“, die in jedem Rundfunkgerät, in jedem Fernsehempfänger und in zahllosen anderen elektronischen Apparaten zu finden ist.

Daneben gibt es zahlreiche Spezialröhren, die teilweise sieben Gitter enthalten. Man baut auch häufig mehrere Röhrensysteme in einen gemeinsamen Glaskolben ein, um Raum und Energie zu sparen.

Ein Verstärker stellt sich vor

Genaugenommen dürfen wir nur dann von „Verstärkung“ sprechen, wenn eine kleine Spannungsänderung am Gitter im Anodenkreis eine größere Spannungsänderung hervorruft. Bis jetzt war das nicht der Fall. Die Spannungsschwankungen am Gitter lösten nur ein Schwanken der Stromstärke im Anodenkreis



aus. Doch es ist nicht schwer, zu einer „echten“ Spannungsverstärkung zu gelangen. Wir brauchen nur einen Widerstand in den Anodenkreis zu schalten. Sobald Strom im Anodenkreis fließt, können wir zwischen den Enden dieses Widerstandes eine Spannung messen. Es ist die Spannung, die notwendig ist, den Anodenstrom durch den Widerstand zu treiben. Je stärker dieser Strom sein soll, desto höher ist die erforderliche Spannung. Die

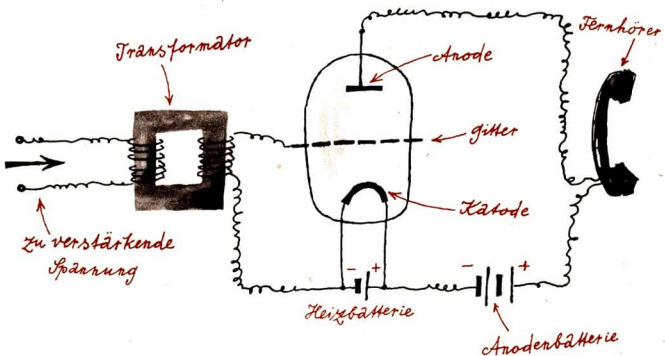
Spannung am Widerstand kann nach dem Ohmschen Gesetz berechnet werden und folgt getreulich jeder Stromänderung.

Nehmen wir an, wir hätten es mit einer Röhre zu tun, die auf eine Änderung der Spannung zwischen Gitter und Katode um 1 V mit einer Anodenstromänderung von 2 mA reagiert. Der Widerstand besitze einen Wert von 10 k Ω , das heißt von 10 000 Ω .

Legen wir zwischen Gitter und Katode eine Spannung, die wir um 0,01 V ändern, so schwankt der Anodenstrom um 0,02 mA. Diese Stromstärkeänderung ruft nach dem Ohmschen Gesetz am Widerstand ein Schwanken der Spannung um 0,2 V hervor. Aus der Spannungsänderung von 0,01 V im Gitterkreis ist im Anodenkreis eine Spannungsänderung von 0,2 V geworden. Die Gitterspannungsänderung wurde zwanzigfach verstärkt. Hätten wir keine einmalige Spannungsänderung vorgenommen, sondern legten wir statt dessen eine Wechselspannung von 0,01 V an das Gitter, so könnten wir am Widerstand im Anodenkreis eine Wechselspannung von 0,2 V messen.

Vergrößern wir den Wert des Anodenwiderstandes auf 50 k Ω , erhöht sich die Verstärkung weiter. Jede Spannungsänderung, jede Wechselspannung zwischen Gitter und Katode tritt hundertfach verstärkt am Anodenwiderstand auf. Allerdings lassen sich die Erhöhung des Widerstandes und damit die Spannungsverstärkung nicht beliebig weit treiben; immerhin erreicht man bereits mit einer Röhre eine mehrhundertfache Verstärkung. Wenn das nicht genügt, kann man mit der verstärkten Spannung weitere Röhren steuern.

Ein einfacher Verstärker, mit dem man etwa die auf einer langen Fernleitung geschwächten Ströme eines Telefongesprächs verstärken könnte, ließe sich nach folgendem Schema aufbauen: Die Sprechströme werden einem Transformator zugeleitet und



durchfließen seine Primärseite. Die an der Primärspule liegende Spannung wird durch den Transformator erhöht und wirkt, da die Sekundärspule entsprechend geschaltet ist, zwischen Gitter und Katode der Verstärkerröhre.

Im Anodenkreis der Röhre ersetzt man den Widerstand durch einen Fernhörer. Seine Spulen besitzen einen verhältnismäßig großen Wechselstromwiderstand. Infolge des kräftigen, schwankenden Anodenstromes entsteht am Fernhörer eine weit höhere Wechselspannung als an der Primärwicklung des Transformators. Der Hörer spricht laut an.

Hier ist eine Ergänzung nötig: Wir wissen, daß Elektronen auch über das Gitter abfließen, wenn dieses positiv ist. Dadurch würden beim Verstärken unangenehme Verzerrungen auftreten. Will man sie vermeiden, muß man verhindern, daß das Gitter positiv wird. Man legt deshalb neben der Wechselspannung eine „negative Vorspannung“ an das Gitter. Sie wird so bemessen, daß das Gitter auch bei den positiven Wechselspannungshalbwellen noch negativ gegenüber der Katode bleibt. Das Gitter zieht dann keine Elektronen mehr an, die Verzerrungen bleiben aus.

Müßte es nicht überhaupt genügen, einen Transformator zwischen Fernleitung und Hörer zu schalten, wenn nur die Spannung erhöht werden soll?

Es ist zwar richtig, daß ein Transformator die Spannung erhöht, aber gleichzeitig setzt er die ohnehin geringe Stärke des Sprechstromes weiter herab. Um einen Hörer lauter klingen zu lassen, ist nicht nur eine höhere Spannung, sondern eine höhere Leistung erforderlich, und Leistungen kann der Transformator nicht verändern. Im Verstärker dagegen steigt wegen des kräftigen Anodenstromes auch die Leistung am Hörer. Die dazu nötige Energie muß nicht von den Sprechströmen aufgebracht werden, sondern wird der Anodenbatterie entnommen.

Es gibt eine fast unübersehbare Zahl von Schaltungsmöglichkeiten für Verstärker. Sie interessieren vor allem den Fachmann. Von technischen Einzelheiten wollen wir nur noch erwähnen, daß man den Transformator durch einfachere und billigere Bauelemente ersetzen kann, die außerdem viel kleiner und leichter sind. Auch werden die meisten Röhrenverstärker nicht aus Batterien gespeist, sondern aus dem Lichtnetz über besondere Stromversorgungsteile zwischen Netz und Verstärker.

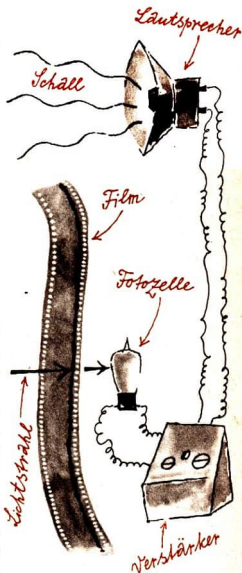
Dieser Stromversorgungsteil muß zwischen Netz und Verstärker geschaltet werden, weil das Netz Wechselstrom führt, die Röhre aber als Anodenspannung Gleichspannung benötigt. Das Stromversorgungsgerät enthält unter anderem einen Gleichrichter. Meistens wird es in das Verstärkergehäuse mit eingebaut. Man teilt die Verstärker nach den Frequenzen ein, die sie zu verarbeiten haben. Der Fernsprechverstärker ist ein Tonfrequenzverstärker, weil er Frequenzen verstärkt, die sich unmittelbar in hörbaren Schall umwandeln lassen. Tonfrequenzverstärker werden an vielen

Stellen benötigt. Über ihre Rolle bei Rundfunk und Fernsehen werden wir erst später sprechen. Erwähnen wir hier einige wichtige andere Anwendungen.

Beim Tonfilm besteht die „Tonspur“ auf dem Rande des Filmstreifens aus mehr oder weniger geschwärzten Stellen. Sie entsprechen den wiederzugebenden Schallschwingungen. Vor der Tonspur sitzt eine Lampe, hinter der Tonspur eine Fotozelle. Je nach der Schwärzung der Tonspur fängt die Fotozelle mehr oder weniger Licht auf. Sie verwandelt so die Helligkeitsänderungen in Stromschwankungen. Sie entsprechen den vom Mikrophon aufgenommenen Schallschwingungen, sind aber viel zu schwach, um die Lautsprecher des Lichtspieltheaters ansprechen zu lassen. Daher werden die Ströme zunächst einem leistungsfähigen Verstärker zugeleitet, der sie dann an die Lautsprecher weitergibt. Beim „Magnettonverfahren“ ist ein Teil des Filmstreifens mit einer Spezi­alschicht belegt, die im Rhythmus der Schallwellen magnetisiert wird. Bei der Wiedergabe läuft der Streifen dicht vor dem „Wiedergabekopf“ vorbei. Das ist ein besonders konstruierter kleiner Elektromagnet, in dessen Spule das vorbeilaufende magnetisierte Filmstück winzige, den Schallwellen entsprechende Spannungen induziert. Auch diese Spannungen müssen verstärkt werden, ehe sie Lautsprecher „aussteuern“ können.

Genauso arbeitet der „Wiedergabekopf“ von Tonbandgeräten. In ihnen wird der Verstärker nicht nur zur Wiedergabe, sondern auch für Tonbandaufnahmen benutzt. Zur Aufnahme läuft das Tonband an einem „Aufnahme­kopf“ vorbei (oft ist es der gleiche, der für die Wiedergabe benutzt wird) und wird, den Schall­schwingungen entsprechend, magnetisiert. Dazu müssen die vom Mikrophon oder vom Rundfunkempfänger kommenden Tonfrequenzspannungen so weit verstärkt werden, daß sie einen kräftigen Magnetisierungsstrom durch die Spule des Aufnahme­kopfes treiben. Für Plattenspieler, für Ruf- und Lautsprecheranlagen werden ebenfalls Tonfrequenzverstärker benötigt.

Verstärker für Frequenzen über 20 000 Hz nennt man Hochfrequenzverstärker. Ihr Hauptanwendungsgebiet ist die Nachrichtentechnik. In der Trägerfrequenztechnik zum Beispiel finden wir vorwiegend Hochfrequenzverstärker. Noch höhere Frequenzen werden in der Funktechnik, beim Rundfunk, beim Fernsehen und in der Radartechnik benutzt. Auch diese hochfrequenten Spannungen und Ströme aber müssen oftmals millionenfach verstärkt werden, ehe sie nutzbar gemacht werden können.



Halbleiter können das auch

So nützlich die Elektronenröhre auch ist, mit einigen ihrer Eigenschaften sind die Techniker nicht zufrieden. Da ist zunächst die Stromversorgung: Elektronenröhren benötigen zwei Spannungs-

quellen, eine für die Heizung und eine für die Anodenstromversorgung. Die Heizspannungsquelle hat keine andere Aufgabe, als Elektronen aus der Katode zu „verdampfen“. Am Verstärkungsvorgang selbst ist sie nicht beteiligt.

Die Katode, die Elektronenquelle, erschöpft sich nach einigen tausend Betriebsstunden; damit wird die Röhre „taub“. Auch Gasreste, die in die Elektroden eingeschlossen sind und im Laufe der Zeit in das Vakuum des Röhrenkolbens übertreten, können die Funktionsfähigkeit einer Röhre empfindlich stören. Das Vakuum ist nicht nur schwer herzustellen, sondern es macht auch einen verhältnismäßig großen Röhrenkolben notwendig, der, sofern er aus Glas hergestellt wird, zerbrechlich ist. Auch sonst nimmt eine Röhre Stöße oder Schwingungen unter Umständen übel. Wenn die Elektroden ihre Lage nur geringfügig verändern, zeigen die elektrischen Röhrendaten schon erhebliche Abweichungen.

Für viele technische Aufgaben brauchte man energiesparsamere, kleinere und leichtere Verstärkerelemente, zum Beispiel für die elektronische Rechentechnik, für die elektrische Ausrüstung von Raketen und Satelliten, aber auch für so wichtige Kleingeräte wie Hörhilfen oder Strahlungsmeßgeräte.

Dieses Verstärkerelement wurde im Transistor gefunden. Er erblickte im Jahre 1948 das Licht der Welt.

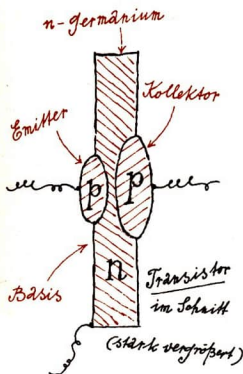
Der Transistor ist ein Halbleiterbauelement. Er unterscheidet sich von der Diode zunächst dadurch, daß er aus drei Schichten verschiedener Leitfähigkeitsart besteht und demzufolge drei Anschlüsse aufweist. Je nach der Reihenfolge, in der die Schichten wechseln, unterscheidet man pnp- und npn-Transistoren.

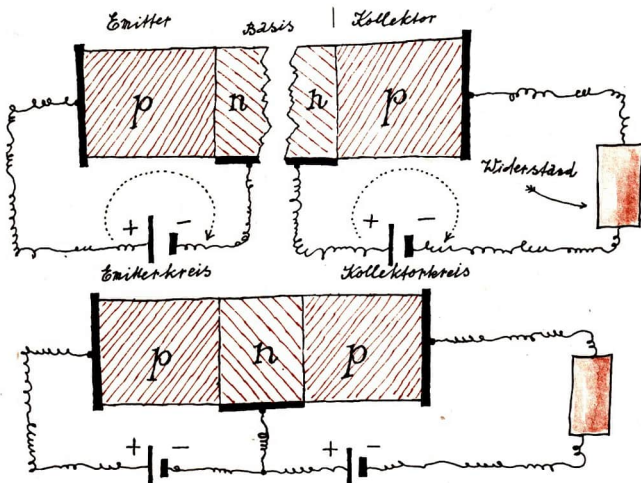
Die Skizze zeigt einen pnp-Transistor. Um zu erklären, was in ihm vorgeht, denken wir ihn uns vorläufig im Mittelteil, der n-leitenden „Basis“, geteilt. Dann haben wir zwei völlig getrennte Stromkreise mit je einem pn-Übergang vor uns, eine Anordnung, die an die Halbleiterdioden erinnert.

Im linken Stromkreis ist die Batterie so angeschlossen, daß der „Emitter“ Löcher in das n-leitende Basisstück drückt. Im „Emitterkreis“, der aus der Emitter-Basis-Strecke des Transistors und der linken Batterie gebildet wird, fließt Strom.

Der rechte Stromkreis, der „Kollektorkreis“, läßt dagegen keinen nennenswerten Strom über die pn-Grenze fließen; denn die zugehörige Batterie ist so angeschlossen, daß der pn-Übergang sperrt (s. S. 196). Im Sperrgebiet Basis-Kollektor tritt ein sehr hoher Widerstand auf.

Vereinigen wir das Mittelstück wieder, bleiben die beiden Stromkreise nicht mehr unabhängig voneinander. Die vom Emitter in die Basis gedrückten Löcher fließen nicht sämtlich zum Batterieanschluß, um Elektronen aufzunehmen. Die meisten Löcher driften vielmehr durch die Basis nach rechts, und weil das Basisgebiet sehr dünn gehalten wird, erreichen sie die rechte

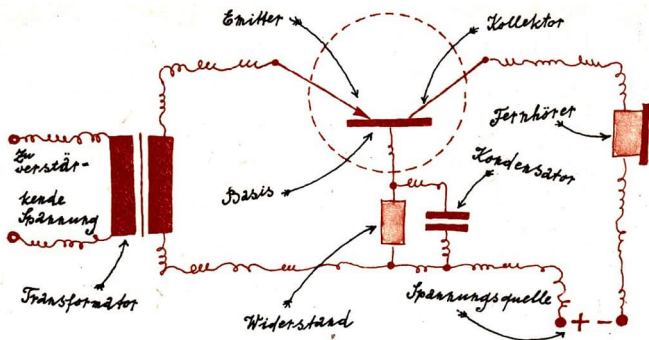




Grenze der Basis. Dort gelangen sie unter den Einfluß der am Kollektor angelegten Spannung. Sie werden vom Kollektor „aufgesammelt“ und vereinigen sich mit Elektronen aus der rechten Batterie. Daher fließt nun auch im Kollektorkreis ein meßbarer Strom. Er ist allerdings schwächer als der Strom im Emittierkreis, weil einige Löcher in der Basis gefüllt werden.

Der Strom im Kollektorkreis folgt jeder Änderung des Stromes im Emittierkreis. Das erinnert bereits an eine Verstärkerröhre; denn auch bei ihr rufen Änderungen in einem Stromkreis Veränderungen in einem zweiten hervor. Aber wie könnte hier eine Verstärkerwirkung zustande kommen?

Der Widerstand des Emittierkreises ist gering, weil der Übergang Emitter-Basis den Strom nur sehr wenig behindert. Infolgedessen läßt bereits eine kleine Spannungsänderung im Emittierkreis den Emittierstrom kräftig schwanken. Der Kollektorstrom macht diese Schwankungen mit. An einem Widerstand, den wir in den Kollektorkreis einfügen, entstehen, wie bei der Röhre, Spannungsschwankungen, die bei entsprechender Größe des Widerstandes erhebliche Werte erreichen. Das ist aber die gewünschte Spannungsverstärkung. Wenn wir eine kleine Wechselspannung in den Emittierkreis einführen, tritt sie verstärkt am Widerstand im Kollektorkreis auf.



Mit Transistoren lassen sich gleichfalls die verschiedenartigsten Verstärkerschaltungen aufbauen. Ein einfacher Verstärker für Sprechströme auf einer Fernsprechleitung könnte etwa nach der nebenstehenden Schaltskizze aufgebaut werden. Die zu verstärkende Spannung wird wieder an einem Transformator abgenommen, als Widerstand im Kollektorkreis wird der Fernhörer benutzt. Wir sehen, daß außerdem in die Basisleitung des Transistors ein Widerstand und ein Kondensator geschaltet wurden. Sie sorgen für stabiles Arbeiten des Transistors.

Einen Vorzug des Transistors gegenüber der Elektronenröhre erkennen wir bereits in der Skizze. Im Gegensatz zur Röhre benötigt der Transistor nur noch eine Spannungsquelle. Ihre Spannung braucht in den meisten Fällen nur einige Volt zu betragen; außerdem wird der Spannungsquelle nur eine geringe Stromstärke entnommen. Daher können Transistorgeräte oft aus Batterien gespeist werden, ohne daß der Betrieb zu teuer würde; sie werden damit unabhängig vom Lichtnetz. Schon der Besitzer eines Kofferempfängers weiß das zu schätzen. Es gibt aber auch eine große Zahl anderer Anwendungsmöglichkeiten, für die diese Unabhängigkeit viel wichtiger ist, sei es in Kleinstfunkgeräten für Baustellen, sei es in transportablen Meß- und Prüfvorrichtungen, sei es in der Elektromedizin, der Weltraumfahrt oder der Fernsteuertechnik.

Eine Elektronenröhre ist nicht unmittelbar nach dem Einschalten betriebsbereit. Ihre Katode braucht eine gewisse Zeit, bis sie die Betriebstemperatur erreicht. Das ist ein Nachteil, weil Geräte, die ständig betriebsbereit sein müssen, beispielsweise Fernsprechverstärker, deshalb dauernd „durchzuheizen“ sind. Ein Transistorverstärker dagegen ist sofort betriebsbereit und verbraucht im Ruhezustand nur sehr wenig Strom.

Transistoren beanspruchen nur einen Bruchteil des Raumes, den eine Verstärkerröhre einnimmt. Sie sind außerdem mechanisch weit widerstandsfähiger und können unter rauhesten Bedingungen eingesetzt werden. Weil ihre Lebensdauer die der Röhren um ein Vielfaches übertrifft, brauchen Transistoren in elektronischen Geräten kaum ausgewechselt zu werden. Sie können „fest“, ohne die für Röhren übliche Steckfassung, eingebaut werden. Verblüffend ist immer wieder, wie elektronische Geräte durch konsequenten Einsatz von Halbleiterbauelementen verkleinert werden können. Am bekanntesten wurden Rundfunk-Taschenempfänger, die inzwischen bis auf die Größe einer Zigarettenpackung, in extremen Fällen bis auf Streichholzschachtelformat geschrumpft sind.

Hörhilfen, die in einem Brillenbügel untergebracht sind, Funkgeräte von der Größe einer Brieftasche, Sender, die von Magenkranken verschluckt werden und Meßwerte aus dem Inneren des menschlichen Körpers funken, Klein-Elektronenrechner, die viele menschliche Arbeitskräfte ersetzen, sind weitere Beispiele für die Erfolge der Halbleitertechnik und der durch sie ermöglichten „Miniaturisierung“.

Weil der Transistor aber auch noch einige Mängel aufweist, haben Elektronenröhren nach wie vor große Bedeutung. Ein Transistor kann zum Beispiel noch längst nicht so große Leistungen verarbeiten wie manche Elektronenröhren. Das gilt besonders für sehr hohe Frequenzen. Da die Halbleitertechnik aber ständig verbessert und weiterentwickelt wird und mit großer Geschwindigkeit voranschreitet, werden auch diese Mängel eines Tages beseitigt sein.

Geradezu großartige Möglichkeiten birgt die aus Halbleitertechnik und Atomphysik hervorgehende „Molekularelektronik“. Sie ersetzt die bisherigen Gerätegruppen, in denen die Halbleiter nur Bauelement unter Bauelementen sind, durch „Funktionsblöcke“. Das sind Stückchen, oft nur „Splitter“, aus Halbleitermaterial, die durch Dotieren mit Fremdstoffen, durch „Beschuß“ mit Elektronen oder radioaktiver Strahlung, durch Aufdampfen dünnster Schichten und durch andere technologische Verfahren so behandelt werden, daß sie nicht nur die Funktion eines Bauelementes, sondern einer ganzen Baugruppe übernehmen können. Es gibt in einem Funktionsblock keine einzelnen Bauelemente mehr – er ist „als Ganzes“ Verstärker, Empfänger, Rechenbaustein usw. Die Abmessungen der Geräte verringern sich dadurch auf ein kaum noch glaubhaftes Format. Verstärker von der Größe eines Reißnagels, Rundfunkempfänger von der Größe eines Zuckerstückchens wurden als Versuchsmodelle bereits gebaut. Vielleicht ist die Molekularelektronik eines Tages berufen, die Elektronik, die Rechen- und die Nachrichtentechnik in einem Maße zu verändern, von dem wir uns gegenwärtig noch keinerlei Vorstellungen machen können.



ELEKTRONEN HELFEN DER VOLKSWIRTSCHAFT

Vorsicht! Gefahr!

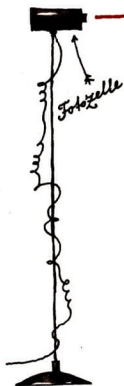
Elektromotor, Glühlampe, die elektrische Nachrichtentechnik sind aus unserer Welt nicht mehr wegzudenken. Doch ebenso wichtig sind die vielen bescheidenen, oft unscheinbaren Helfer, die wir der Elektrotechnik verdanken. Immer wieder sind sie uns in diesem Buche begegnet.

Der Bimetallschalter, der die Temperatur von Bügeleisen oder Heizkissen in den richtigen Grenzen hält, der Schalter, der eine Maschine selbsttätig außer Betrieb setzt, der Elektromagnet, der Fremdkörper vom Transportband zieht, Weichen und Signale stellt, Türen öffnet, Ventile schließt oder Getriebe kuppelt.

Die Schar dieser Helfer wurde noch viel größer, als zu den tausendfach bewährten elektrischen Bauelementen Elektronenröhren und Transistoren kamen. Eine neue technische Disziplin entstand, die „industrielle Elektronik“. Dank der Möglichkeit, auch schwächste Spannungen fast beliebig zu verstärken, wurden die Schalt-, Kontroll- und Steuergeräte viel „feinfühligere“; die mannigfaltigen Schaltungskombinationen mit Röhren und Halbleiterbauelementen gestatten es, eine große Zahl verschiedener Vorgänge nicht nur zu beobachten und zu steuern, sondern auch so miteinander zu verknüpfen, daß ganze Betriebsanlagen völlig selbsttätig arbeiten. Die industrielle Elektronik leitet ihren Namen davon her, daß in ihren wichtigsten Bauelementen Elektronen frei durch den Kolben einer Röhre fliegen oder aber zwischen den Atomen eines Halbleiters wandern.

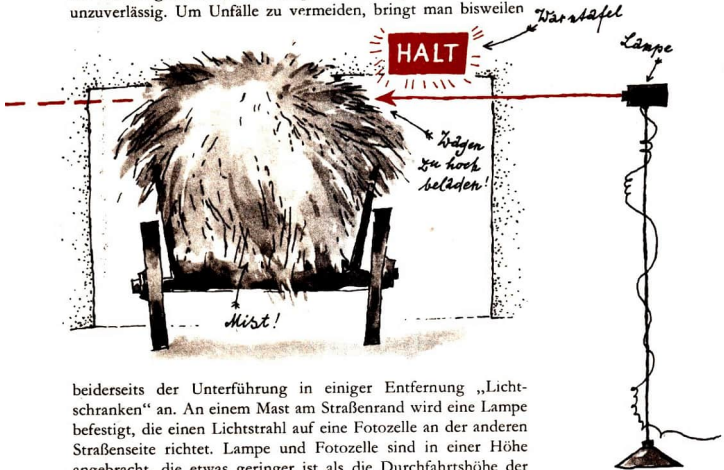
Vielleicht haben Sie schon einmal während einer Bahnreise in einen anderen Wagen umsteigen müssen, weil sich ein Achslager Ihres Waggons heißgelaufen hatte. Das Umsteigen ist unangenehm, doch viel größer ist der Schaden, wenn der „Heißläufer“ nicht rechtzeitig entdeckt wird und das Lager ausbrennt. Elektronische Heißläufersuchanlagen stellen überhitzte Lager eines vorbeifahrenden Zuges fest. Ein Achslager sendet eine seiner Temperatur entsprechende Wärmestrahlung aus. Sie trifft eine neben dem Gleis angebrachte infrarotempfindliche Fotozelle. Jedes Lager löst einen Stromimpuls im Fotozellenkreis aus, doch ist dieser Impuls dann besonders kräftig, wenn die Strahlung eines heißgelaufenen Lagers die Fotozelle trifft. Der Impuls wird mit Elektronenröhren oder Transistoren verstärkt und löst im Stellwerk ein Alarmsignal aus. Das Gerät wird vom Zug selbst eingeschaltet. Er überfährt, wenn er sich der Meßstelle nähert, einen Schienenkontakt oder induziert in einer Magnetspule einen Spannungsimpuls, der das Gerät in Betrieb setzt. Hat der letzte Wagen die Fotozelle passiert, schaltet sich die Anlage wieder aus.

Heißläufersuchanlagen können sogar angeben, die wievielte



Achse ein heißgelaufenes Lager aufweist. Man verstärkt zu diesem Zweck den „Normalimpuls“, den jedes Lager hervorruft, und steuert damit ein elektrisches Zählwerk. Es bleibt bei dem einer Übertemperatur entsprechenden stärkeren Impuls stehen und zeigt damit das überhitzte Lager an.

Die lichte Höhe von Bahnunterführungen oder Straßenbrücken ist begrenzt und wird durch Hinweisschilder angezeigt. Das ist allerdings keine völlige Sicherung gegen eine zu hohe Ladung auf Fahrzeugen; denn Schätzungen nach Augenmaß sind sehr unzuverlässig. Um Unfälle zu vermeiden, bringt man bisweilen



beiderseits der Unterführung in einiger Entfernung „Lichtschranken“ an. An einem Mast am Straßenrand wird eine Lampe befestigt, die einen Lichtstrahl auf eine Fotozelle an der anderen Straßenseite richtet. Lampe und Fotozelle sind in einer Höhe angebracht, die etwas geringer ist als die Durchfahrthöhe der Unterführung.

Nähert sich ein zu hoch beladenes Fahrzeug, wird der Lichtstrahl unterbrochen. Die Fotozelle löst einen Stromimpuls aus. Er wird verstärkt und schaltet eine Warntafel ein. Um Störungen durch Tageslicht auszuschalten, benutzt man gefiltertes, einfarbiges Licht. In ähnlicher Weise schützt man durch Lichtschranken, die mit einer Alarmanlage gekoppelt sind, Räume, besonders wertvolle Ausstellungsstücke oder Bankschalter.

Sehr oft kommt es nicht darauf an, Materialschäden zu verhüten, sondern Menschen vor Gefahren zu schützen. Auch dabei hat die Lichtschranke ein weites Anwendungsfeld gefunden. Man bringt sie vor Scheren und Pressen an, vor Stanzen, Walzen, an Papier- und Textilmaschinen. Die Arbeitsweise bleibt immer gleich. Solange der Mensch oder seine Hände sich in gefährlicher Nähe der Werkzeuge befinden, wird ein Lichtstrahl unter-

brochen. Über eine Fotozelle und einen Verstärker wird der Werkzeugantrieb blockiert und erst freigegeben, wenn die Fotozelle vom Lichtstrahl getroffen wird; denn das bedeutet, daß sich niemand mehr in der Nähe des gefährlichen Werkzeuges befindet.

Durch die Erschließung der Kräfte des Atomkerns haben zahlreiche neue Geräte und Verfahren in die Technik Einzug gehalten. Gleichzeitig damit aber rückte eine Gefahr näher, der bis 1945 nur wenige Wissenschaftler, Ärzte und Röntgenpersonal ausgesetzt waren, deren furchtbare Auswirkungen aber durch die Verbrechen von Hiroshima und Nagasaki der ganzen Welt offenbar wurden: die Gefahr der radioaktiven Strahlung. Sie kann in Laboratorien, Atomkraftwerken und Produktionsbetrieben nur gebannt werden, wenn es gelingt, sie auch in schwächster Intensität nachzuweisen und exakt zu messen. Da der menschliche Körper die Wirkungen radioaktiver Strahlen erst dann empfindet, wenn nicht wieder rückgängig zu machende Schädigungen eingetreten sind, verläßt man sich auf elektronische Warn- und Meßgeräte. In ihnen löst die radioaktive Strahlung Stromimpulse aus. Die Geschwindigkeit, mit der diese einander folgen, ist ein Maß für die Intensität der Strahlung. Die Impulse sind zu schwach, um Signalgeräte unmittelbar zu betätigen. Deswegen verstärkt man sie und führt sie dann einem Kopfhörer oder einem Lautsprecher zu, wo sie in einer Folge von Knackgeräuschen hörbar werden. Man kann sie jedoch auch einem Meßinstrument zuleiten, das die Strahlungsintensität direkt anzeigt.

Wären diese Geräte unhandlich und schwer, so würde das dazu verleiten, sie nicht überall und immer mitzunehmen und einzusetzen. Es ist ein besonderes Verdienst der Halbleitertechnik, die Konstruktion von Strahlendosismessern ermöglicht zu haben, die wirklich jedermann in die Tasche stecken kann und die unabhängig von äußeren Spannungsquellen funktionieren.

Zählen, kontrollieren, messen

Immer wieder müssen in der Industrie fertige Produkte, Halbfabrikate oder Rohstoffe gezählt werden, die von Fließbändern oder anderen Transporteinrichtungen befördert werden. Oft wird sogar mehr verlangt als bloßes Zählen. So soll etwa ein Fließband nach einer gewissen, wählbaren Stückzahl stillgesetzt werden, oder es sind bestimmte Mengen von Nägeln, Nieten, Büroklammern, Zigaretten oder anderen Massenerzeugnissen abzuzählen und anschließend zu verpacken.

Fast immer sind heute solche Zählvorgänge mechanisiert. Einmal wäre das Abzählen von Büroklammern, Ampullen oder Unterlegscheiben eine äußerst eintönige und unproduktive Tätigkeit, zum anderen könnte kein Mensch so schnell zählen, wie viele



moderne Maschinen arbeiten. Zählgeräte gehören daher heute zu den am meisten verwendeten elektronischen Hilfsmitteln der Produktionstechnik.

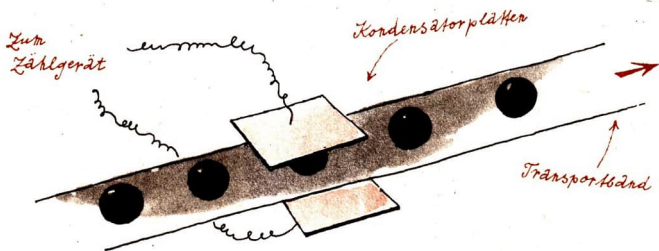
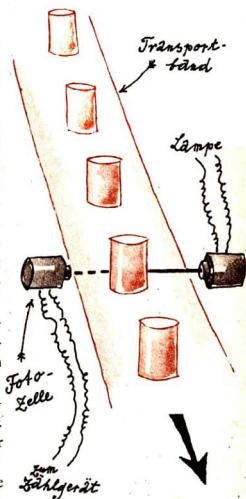
Alle elektronischen Zählgeräte arbeiten nach dem gleichen Prinzip: Die zu zählenden Gegenstände lösen Spannungs- oder Stromimpulse aus. Diese werden verstärkt und steuern das Zählgerät.

Für die Gewinnung der Zählimpulse gibt es eine Fülle von Möglichkeiten. Das einfachste, allerdings nur bei schweren Teilen anwendbare Verfahren läßt von den zu zählenden Objekten an einer geeigneten Stelle der Transporteinrichtung kurzzeitig einen Kontakt schließen. Der über den Kontakt fließende Strom kann das Zählgerät unmittelbar betätigen.

Bei kleineren Gegenständen wird allgemein die „berührungs-freie“ Gewinnung der Zählimpulse angewandt. Man läßt die Gegenstände eine Lichtschranke passieren, wobei jedes Unterbrechen des Lichtstrahls einen Zählimpuls hervorruft. Heiße Gegenstände werden nach dem Prinzip der Heißläufer-suchanlage von infrarotempfindlichen Fotozellen oder Fotoelementen erfaßt. Eine besondere Strahlungsquelle ist in diesem Falle überflüssig.

Kleine Eisen- oder Stahlteilchen können den quer zur Transportrichtung liegenden Spalt einer Eisenkernspule passieren. Die momentane Änderung des Wechselstromwiderstandes dieser Spule liefert die Zählimpulse.

Teile aus nichtleitenden Werkstoffen lassen sich häufig mit Hilfe eines Kondensators zählen. Seine Kapazität (s. S. 51) hängt auch von dem Stoff ab, der sich zwischen den Kondensatorplatten befindet. Gleiten zum Beispiel kleine Plasteteile zwischen den Platten hindurch, wächst die Kapazität für einen Augenblick.

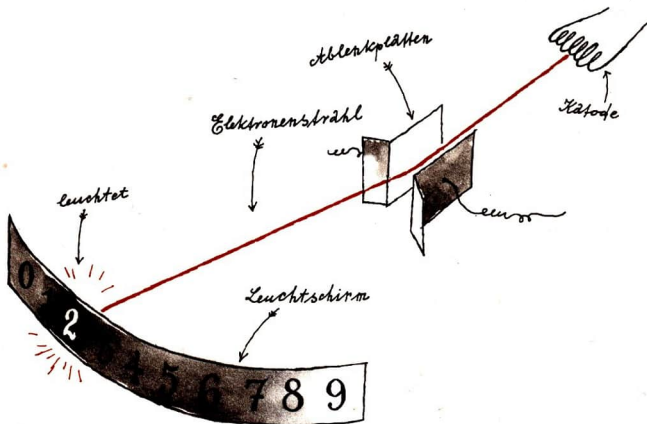


Diese Kapazitätsänderung kann man benutzen, um Zählimpulse zu gewinnen. Dabei können an die Stelle der Platten häufig zwei parallel verlaufende Drähte treten.

Zur Anzeige genügen oft elektromagnetische Zählwerke. Sie ähneln Drehwählern. Jedesmal, wenn ein Zählimpuls eine Spule durchfließt, wird ein Anker angezogen und dreht ein Rad um einen Zahn weiter. Das Rad wird mit einer Zählvorrichtung verbunden, wie wir sie von Kilometerzählern her kennen. Sollen bestimmte Mengen abgezählt werden, kann an der Zählvorrichtung ein zusätzlicher Kontaktarm vorgesehen werden, der nach einer bestimmten Impulszahl einen weiteren Stromkreis schließt. Dieser läßt eine Lampe aufleuchten oder betätigt einen Greifer, eine Verpackungseinrichtung usw.

Die Arbeitsgeschwindigkeit elektromagnetischer Zählwerke reicht nicht immer aus. In „Zählröhren“ stehen elektronische Bauelemente zur Verfügung, die, wenn nötig, viele Tausende Impulse in jeder Sekunde sicher registrieren.

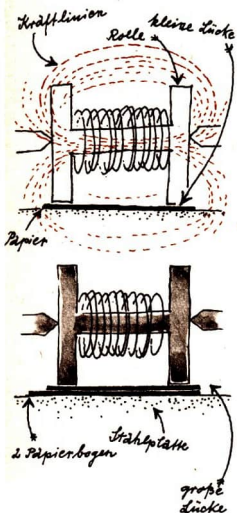
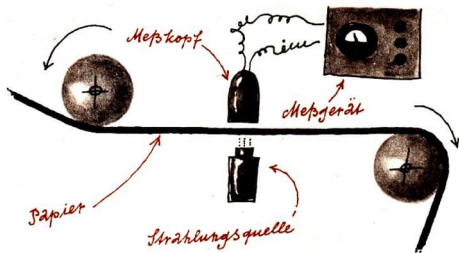
„Dekadenzählröhren“ verwenden einen Elektronenstrahl als „Zeiger“. Er wird so über einen kleinen Leuchtschirm geführt, daß die den Ziffern von 0 bis 9 zugeordneten Stellen des Schirms aufleuchten. Das wird vor allem durch Ablenkplatten erreicht,



deren Spannung den Strahl zur Seite lenkt. Der erste Zählimpuls zieht den Strahl vor die Ziffer 1, der zweite zieht ihn weiter vor die 2. Beim zehnten Impuls gelangt der Strahl vor eine „Rückstellanode“. Durch eine sinnreiche Schaltung wird erreicht, daß der Strahl sofort auf die 0 zurückspringt. Gleichzeitig wird mit Hilfe der Rückstellanode ein Impuls gewonnen, der die nächste Zählröhre auf 1 stellt. Diese Röhre zählt nunmehr die Zehner, da ihr Strahl nur nach jeweils 10 Impulsen um eine Ziffer weiter-

Für Dickenmessungen hat sich besonders die Kombination von elektronischem Meßgerät und radioaktiven Isotopen bewährt. Um zum Beispiel die Stärke von Papierbahnen, Textilien oder Kunststofffolien fortlaufend zu kontrollieren, bringt man unter dem Prüfling eine Strahlenquelle an. Sie wird so ausgewählt, daß die radioaktive Strahlung den Prüfling zwar durchdringt, aber merklich geschwächt wird. Über dem Prüfling und der Strahlenquelle sitzt der „Meßkopf“ eines Strahlungsmeßgerätes.

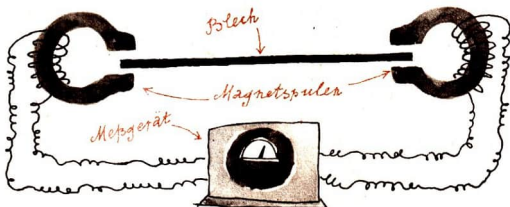




Es zeigt eine der Materialdicke und -dicke entsprechende Strahlungsintensität an. Abweichungen in der Dicke oder in der Zusammensetzung des Materials werden sofort signalisiert.

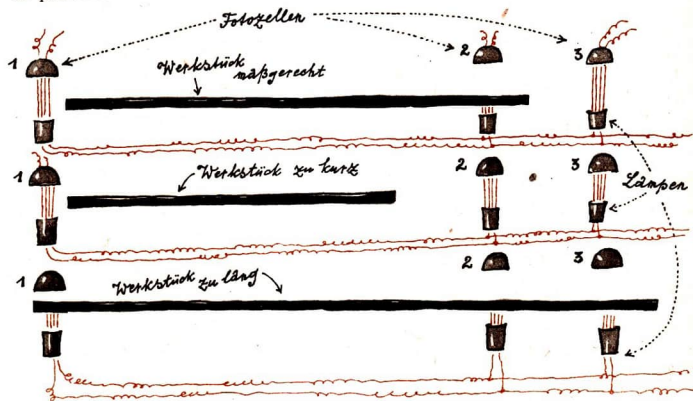
In Druckmaschinen, die einzelne Bogen verarbeiten, muß verhindert werden, daß der Maschine gleichzeitig zwei aneinanderhaftende Bogen zugeführt werden. Die Kontrolle kann ein magnetischer Fühler übernehmen. Das Papier gleitet über eine Stahlplatte. Dabei wird es von einer eisernen Rolle abgetastet, die eine Wicklung aus feinem Draht trägt. Der Spule wird Wechselspannung zugeführt. Ihr Wechselstromwiderstand hängt auch vom Abstand Stahlplatte-Spulenflansche ab. Werden versehentlich zwei Bogen eingelegt, sinkt der Wechselstromwiderstand wegen des sich vergrößernden Abstandes etwas. Diese Stromschwankung steuert einen Verstärker, der seinerseits eine Signalleitung oder einen Greifer in Tätigkeit setzt.

Die Breitenabmessungen von Eisen- oder Stahlblechen können mit zwei Spulen überwacht werden, die rechts oder links über die Blechkanten greifen. Der Wechselstromwiderstand der Spulen hängt davon ab, wie weit die Spalte vom Blech ausgefüllt werden. Die Widerstandsabweichungen bei Breitenänderungen liefern die nötigen Meßwerte. Bei anderen Materialien sieht man rechts und links Fotozellen vor, die je nach der Materialbreite mehr oder weniger beleuchtet werden.



Sehen wir uns zum Schluß an, wie man die Längenabmessungen von Brettern, Platten oder anderen Materialien überwachen kann. Das Werkstück, dessen Länge zu kontrollieren ist, passiert nacheinander drei Lichtschranken. Der Abstand von der Fotozelle 1 zur Fotozelle 2 entspricht der kürzesten zulässigen Werkstücklänge, der Abstand von der Fotozelle 1 zur Fotozelle 3 der größten gestatteten Länge.

Bewegt sich die Länge eines Werkstückes innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen, so ist der Lichtstrahl zur Fotozelle 2 schon unterbrochen, der zur Fotozelle 3 noch nicht, wenn das Ende des Werkstückes die Lichtschranke bei der Fotozelle 1 passiert. Ist diese Bedingung erfüllt, kann das Werkstück anstandslos passieren.



Ist das Werkstück zu kurz, erhält die Fotozelle 1 bereits Licht, während Fotozelle 2 noch beleuchtet wird. Bei zu großer Länge des Werkstückes werden in einem bestimmten Augenblick alle drei Lichtschranken unterbrochen.

Die drei Fotozellen arbeiten so in einer elektronischen Schaltung zusammen, daß bei unzulässigen Längenabweichungen eine Greifvorrichtung in Tätigkeit tritt, die das beanstandete Werkstück vom Transportband entfernt.

Motoren werden geregelt

Die Kontroll- und Meßeinrichtungen, die wir kennenlernten, können nicht nur Signalanlagen betätigen, sondern selbst Steuerungsvorgänge einleiten. So kann der Strahlungsmesser, der die Papier-

dicke kontrolliert, einen Mechanismus steuern, der die Walzen der Papiermaschine verstellt; die Seitenabweichungen von Blechbahnen können selbsttätig korrigiert werden.

Immer wieder sind an solchen Steuervorgängen Elektromotoren beteiligt. Überhaupt verlangt man längst mehr von Motoren, als daß sie nur laufen und Maschinen treiben. Sie sollen sich unabhängig von der Belastung gleichmäßig schnell drehen, rasch anlaufen, ebenso schnell gebremst werden können oder ihre Laufrichtung umkehren. Ohne Zwischenschalten von Getrieben muß ihre Drehzahl in weiten Grenzen stetig veränderlich sein, wenn möglich nach einem vorgegebenen Programm und ohne menschliches Zutun.

Diese Bedingungen sind am besten mit Gleichstromnebenschlußmotoren zu erfüllen. Schwächt oder erhöht man nämlich den Strom, der das Magnetfeld des Motors erzeugt, oder die am Läufer liegende Spannung, läßt sich die Drehzahl im Verhältnis von 1 : 150 und darüber ändern. Selbstverständlich könnte man Spannung und Stromstärke für die Motoren mit veränderlichen Widerständen einstellen. Doch dieses Verfahren wäre unwirtschaftlich, weil die den Motoren nicht zugeführte Elektroenergie an den Widerständen in Wärme verwandelt werden müßte.

Viel günstiger ist ein Regelverfahren, bei dem die nicht benötigte Energie gespart wird. Da die Energieverteilungsnetze Wechselbeziehungsweise Drehstrom führen, ist außerdem ein Gleichrichter erforderlich, der den von den Nebenschlußmotoren benötigten Strom bereitstellt.

Der Gedanke liegt nahe, einen Gleichrichter und eine Elektronenröhre zusammenarbeiten zu lassen. Der Gleichrichter könnte die Elektronenröhre speisen; in ihren Anodenkreis würde der Motor eingeschaltet. Da bereits geringe Gitterspannungsänderungen genügen, den Anodenstrom in weiten Grenzen zu verändern, müßte es möglich sein, den Motor zu steuern. In der Praxis ist dieser Weg nicht gangbar. Der Anodenstrom normaler Elektronenröhren ist für die Speisung eines Motors zu schwach. Manche Röhren, die in leistungsstarken Funksendern benutzt werden, verarbeiten zwar Anodenströme von vielen Ampere, ihr Betrieb erfordert aber einen so hohen technischen Aufwand, daß sie für die Motorregelung ausscheiden.

Es ist jedoch gelungen, Spezialröhren zu entwickeln, die die Möglichkeit des Gleichrichtens mit der des Regels vereinen. Eine von ihnen, das „Thyratron“ oder „Stromtor“, wollen wir näher kennenlernen.

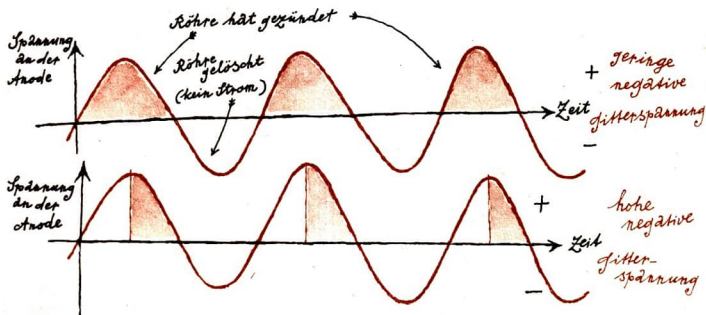
Ein Thyratron enthält wie die Triode drei Elektroden: eine Katode, die einen sehr kräftigen Elektronenstrom liefern kann, ein Gitter, das die Gestalt eines Siebes oder einer Lochblende hat, und eine Anode. Im Gegensatz zur Elektronenröhre ist jedoch der Röhrenkolben nicht evakuiert, sondern mit einem Edelgas unter niedrigem Druck gefüllt.

Lassen wir das Gitter zunächst unbeachtet und legen wir eine Spannung von wenigen Volt zwischen Katode und Anode, so fließt kein Strom. Den aus der Katode tretenden Elektronen wird durch das Füllgas der Weg verlegt; nur einige erreichen die Anode. Steigern wir die Spannung, setzt bei einer bestimmten „Zündspannung“ plötzlich Anodenstrom ein, der weit stärker ist als der Anodenstrom in Elektronenröhren. Wir haben es hier mit den gleichen Vorgängen wie in der Gasdiode zu tun (s. S. 185). Die „Zündspannung“ läßt sich mit dem Gitter beeinflussen und liegt um so höher, je negativer oder je weniger positiv gegenüber der Katode die Spannung am Gitter ist.

Hat ein Thyatron gezündet, bleibt das Gitter wirkungslos. Man kann im gezündeten Thyatron den Anodenstrom durch Spannungsänderungen am Gitter weder steuern noch unterbrechen. Um das Thyatron zu „löschen“, muß die Anodenspannung kurzzeitig abgeschaltet oder unter den Wert der „Löschspannung“ (sie beträgt wenige Volt) gesenkt werden.

Ganz anders laufen diese Erscheinungen ab, wenn zwischen Katode und Anode des Thyatrons eine Wechselspannung liegt. Am Beginn der „positiven“ Halbwelle (Anode positiv, Katode negativ) hat die Spannung den Wert Null, die Röhre zündet nicht. Der Wechselspannungskurve entsprechend steigt die Spannung an und erreicht dabei auch die Zündspannung. Das Thyatron zündet, brennt für den Rest der positiven Halbwelle und erlischt, wenn gegen Ende der Halbwelle die Löschspannung unterschritten wird.

Während der anschließenden negativen Halbwelle (Anode negativ, Katode positiv) bleibt das Thyatron gesperrt. Erst in der folgenden positiven Halbwelle setzt der Stromfluß wieder ein. Mit Hilfe der Spannung zwischen Gitter und Katode können wir bestimmen, an welcher Stelle der positiven Halbwellen Anodenstrom zu fließen beginnt. Wenn wir eine hohe negative



Gitterspannung wählen, zündet das Thyatron erst, wenn die Wechsellspannung sehr weit angestiegen ist, also kurz vor dem Gipfel der Halbwelle. Ist das Gitter gegenüber der Katode nur wenig negativ, zündet das Thyatron bereits am Anfang der Halbwelle, es wird ein weit kleinerer Teil davon abgeschnitten. Dieses Abschneiden der positiven Halbwellen bedeutet letztlich nichts anderes als eine Verminderung der mittleren Stromstärke im Anodenkreis. Das heißt: Mit Hilfe der Gitterspannung können wir die Stärke des im Anodenkreis fließenden, gleichgerichteten Stromes regeln.

Allerdings lassen sich auf diese Weise nur die vorderen Hälften der Wechsellspannungshalbwellen unterdrücken. Eine weitere Erhöhung der Gitterspannung wäre sinnlos. Das Thyatron, dessen Anodenspannung nach Überschreiten des Höchstwertes wieder sinkt, würde erlöschen. Es gibt jedoch Möglichkeiten, den Steuervorgang auf die ganzen Halbwellen auszudehnen.

Das Thyatron ist nur eine von mehreren Ionenröhren für Steuerzwecke. Man kennt beispielsweise noch das Ignitron und das Excitron, die Ströme von mehr als 100 A gleichrichten und steuern können. In jüngster Zeit hat man auch Halbleiterbauelemente entwickelt, die die Funktion des Thyatrons übernehmen können. Sie werden wahrscheinlich eines Tages die Ionenröhren ablösen.

Feld- und Läuferwicklungen eines Motors, der geregelt werden soll, werden in den Anodenkreis von Thyatronen geschaltet und folgen allen Kommandos, die dem Anodenkreis vom Gitter aus erteilt werden.

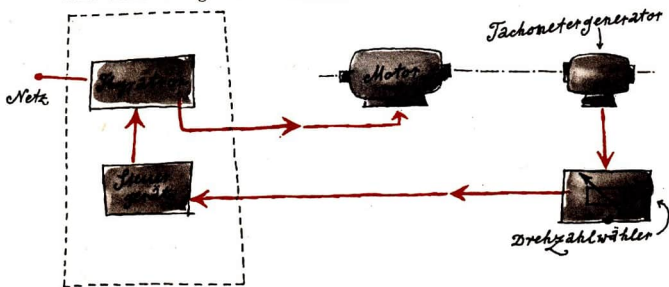
Bereits die Drehzahlregelung von Hand über ein Thyatron bietet Vorteile. Im Steuerkreis haben wir es nur mit den schwachen Strömen und niedrigen Spannungen zu tun, die zum Verändern der Gitterspannung nötig sind. Infolgedessen kann man die Drehzahl eines Motors über große Entfernungen steuern, ohne daß dazu kostspielige Starkstrom-Verbindungsleitungen zwischen Motor und Bedienungspult notwendig wären.

Durch den Läufer eines anlaufenden Motors fließt anfänglich ein sehr starker Strom. Er könnte dem Motor gefährlich werden, wenn man ihn nicht durch besondere, oft von Hand zu bedienende Anlaßwiderstände begrenzte, die erst allmählich ausgeschaltet werden.

Mit einem Thyatron läßt sich leicht eine automatische „Läuferstrombegrenzung“ erzielen. Man zweigt einen Bruchteil des Läuferstromes ab und gewinnt aus ihm eine Steuerspannung für das Thyatron, in dessen Anodenkreis der Motor liegt. Die Steuerspannung wird so bemessen, daß das Thyatron während des Anlaufens den Strom abdrosselt. Mit steigender Drehzahl sinkt die Steuerspannung. Das Thyatron läßt einen stärkeren Strom fließen, der jedoch nicht mehr unzulässig anwachsen kann, da er inzwischen durch eine im Motor selbst entstehende Gegen-

spannung begrenzt wird. Man kann Motoren, die mit derartigen Strombegrenzern ausgestattet sind, völlig selbsttätig anlaufen lassen.

Soll ein Motor seine Drehzahl unabhängig von seiner Belastung einhalten, kann man gleichfalls ein Thyatronsteuergerät einsetzen. Mit der Motorwelle wird ein Tachometergenerator gekuppelt (s. S. 92). Im Drehzahlwähler wird die Spannung des Tachometergenerators gleichgerichtet. Außerdem wird ihr eine zweite Spannung entgegengeschaltet, die einstellbar ist und die Soll-drehzahl bestimmt. Die Differenz beider Spannungen erscheint am Ausgang des Drehzahlwählers und steuert das Thyatron. Stimmt die gewählte Soll-drehzahl mit der tatsächlichen



Drehzahl überein, heben sich die Spannungen auf; das Thyatronsteuergerät braucht nicht einzugreifen. Sinkt die Motordrehzahl, nimmt auch die Spannung des Tachometergenerators ab. Es bleibt hinter dem Drehzahlwähler eine Restspannung übrig. Sie wirkt so auf das Gitter des Thyatrons, daß sich die Drehzahl des Motors erhöht. Sobald Istwert und Sollwert erneut übereinstimmen, verschwindet die Restspannung wieder. Bei einer Zunahme der Drehzahl verläuft der Vorgang entsprechend. Verbindet man das Thyatron-Steuergerät mit Programmgebern, zum Beispiel mit einem Tonbandgerät, auf dessen Bändern bestimmte Steuerbefehle gespeichert sind, kann der Motor selbsttätig verschiedene Arbeitsprogramme abwickeln. Durch Ausbau der Steuergeräte ist es auch möglich, mehrere Motoren gleichzeitig oder in Abhängigkeit voneinander zu steuern.

So stimmen die einzelnen Motoren von Papier- oder Textilmaschinen, von Baggern und Transporteinrichtungen ihre Arbeitsweise automatisch aufeinander ab. Sogar das Anfahren und Abbremsen von Eisenbahnzügen auf elektrifizierten Strecken läßt sich selbsttätig abwickeln, wobei obendrein die einzelnen Schaltvorgänge so aufeinander abgestimmt werden, daß sie mit einem Mindestmaß an Energieaufwand ablaufen.

DIE WELLEN DES HEINRICH HERTZ

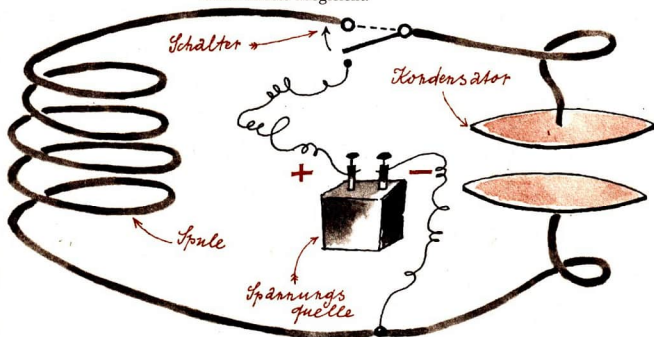
Elektronen schaukeln

Um Wechselspannungen und Wechselströme zu erzeugen, brauchten wir Generatoren und eine mechanische Energiequelle, die diese Aggregate in Bewegung zu setzen vermag und ständig mit Energie speist.

Doch man kann einen Wechselstrom auch auf verblüffend einfache Weise hervorrufen, ohne rotierende Magneten, ohne eine Turbine, die den Generator treibt. Mit einem Handgriff läßt sich die Frequenz dieses Wechselstromes sogar innerhalb weiter Grenzen verändern.

Eigentlich benötigen wir nichts weiter als eine Spule und einen Kondensator. Der Schalter und die Gleichspannungsquelle üben lediglich eine Hilfsfunktion aus.

Stellen wir den Schalthebel nach unten. Dann ist der Kondensator mit der Spannungsquelle verbunden und lädt sich auf. Schieben wir den Hebel in eine Stellung zwischen den beiden Kontakten, steht der Kondensator weder mit der Spannungsquelle noch mit der Spule in Verbindung. Er bewahrt die gespeicherte Elektrizitätsmenge; erst nach Stunden oder Tagen „verschwindet“ sie, weil sich die Kondensatorladung durch unvermeidliche Isolationsverluste ausgleicht.



Was geschieht, wenn wir den Hebel auf den oberen Kontakt weiterrücken? Natürlich beginnt der Kondensator sofort, sich über die Spule zu entladen. Diese Entladung erfolgt aber nicht durch einen kurzen Stromstoß. Mit geeigneten Instrumenten und einer Zeitlupenkamera könnten wir vielmehr registrieren, daß der Strom stetig von Null auf einen Höchstwert wächst, um dann ebenso stetig wieder auf Null abzufallen.

Unterbrechen wir in diesem Augenblick die Beobachtung.

Warum der Strom stetig wächst, sollten wir eigentlich noch wissen: In der Spule treten wieder Selbstinduktionserscheinungen auf. Sobald Strom durch die Spulenwindungen zu fließen beginnt, entsteht ein Magnetfeld. Es ist nach der Lenzschen Regel so gerichtet, daß es seiner Ursache entgegenwirkt. In der Spule wird eine Gegenspannung induziert. Sie behindert das Anwachsen der Stromstärke. Infolgedessen kann der Strom nicht auf seinen Höchstwert springen, sondern nur allmählich anwachsen. Der Maximalwert wird erst erreicht, wenn der Kondensator gerade entladen ist.

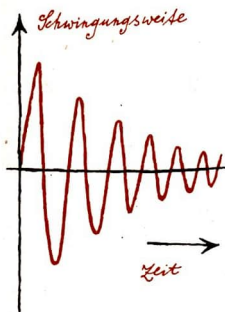
In diesem Augenblick verschwindet die Spannung, die die Elektronen in Bewegung setzte. Trotzdem reißt der Strom nicht ab, sondern sinkt stetig. Auch daran ist die Selbstinduktion schuld. Das Magnetfeld der Spule wird wieder abgebaut; „nach Lenz“ sucht es der Ursache seines Verschwindens, dem Aufhören des Stromflusses, entgegenzuwirken. In der Spule wird jetzt eine Spannung induziert, die so gerichtet ist, daß sie den Stromfluß aufrechterhält.

Fließt aber in einen entladenen Kondensator Strom, so lädt er sich erneut auf. Herrschte vorher auf der unteren Platte Elektronenüberschuß, so sammeln sich jetzt überschüssige Elektronen auf der oberen Platte. Die bisher positive Kondensatorplatte wird zur negativen und umgekehrt. Ist der Stromfluß beendet, hat der Kondensator, wenn wir im Augenblick einmal von Verlusten absehen, seine ursprüngliche Ladung wieder erreicht.

Sofort beginnt das Spiel von neuem: Über die Spule fließt – jetzt in umgekehrter Richtung – ein anwachsender und dann wieder schwächer werdender Strom, der Kondensator entlädt sich, lädt sich wieder auf, entlädt sich erneut usw. Dauernd „schwingen“ Elektronen hin und her, es fließt Wechselstrom. Deshalb nennt man die aus Spule und Kondensator bestehende Anordnung einen Schwingungskreis.

Man kann die Vorgänge auch anders beschreiben: Beim Aufladen des Kondensators wird Energie in dem zwischen den Platten entstehenden elektrischen Feld gespeichert. Diese Energie geht beim Entladen in das Magnetfeld der Spule über. Das verschwindende elektrische Feld baut also ein magnetisches Feld auf. Der Kondensator wird daraufhin erneut geladen. Jetzt ruft das verschwindende magnetische Feld ein elektrisches Feld hervor. Diese Wechselwirkungen zwischen magnetischen und elektrischen Feldern sind, wie wir bald erfahren werden, äußerst wichtig.

Wie schnell laufen die Schwingungen ab, welche Frequenz hat der Wechselstrom im Schwingungskreis? Das hängt ausschließlich von den elektrischen Daten des Kondensators und der Spule ab. Ein Kondensator großer Kapazität kann eine entsprechend große Elektrizitätsmenge speichern. Sein Entladen dauert – bei gleicher Spule – länger als das Entladen eines Kondensators



kleiner Kapazität. In einer Spule mit vielen Tausenden Windungen und einem Eisenkern sind die Induktionswirkungen ausgeprägter als in einer Spule aus wenigen Drahtwindungen. Vergrößern wir – bei gleichem Kondensator – die Spule, sinkt die Frequenz des entstehenden Wechselstromes; verringern wir die Windungszahl, wächst die Frequenz.

Durch eine entsprechende Konstruktion von Kondensator und Spule kann man in einem Schwingungskreis Wechselströme mit einer Frequenz von Bruchteilen eines Hertz bis zu Strömen von vielen Millionen Hertz hervorrufen.

Würden wir den Ablauf des Wechselstromes im Schwingungskreis mit einem Oszillographen betrachten, sähen wir allerdings eine Kurve, die nicht mit der bekannten Wechselstromkurve übereinstimmt. Die Amplitude nimmt von Schwingung zu Schwingung ab, und schon nach kurzer Zeit ist der Strom ganz abgeklungen.

Ursache dieser „gedämpften“ Schwingungen ist, daß der Wechselstrom nicht verlustfrei zwischen Spule und Kondensator hin- und herfließen kann. Stets wird zum Beispiel ein kleiner Teil der elektrischen Energie in Wärme umgesetzt. Noch rascher klingen die Schwingungen ab, wenn wir der Spule ein Stück Metall nähern. Das wechselnde Magnetfeld der Spule induziert im Metall Wirbelströme. Sie erwärmen das Metall und entziehen die dazu nötige Energie dem Schwingungskreis.

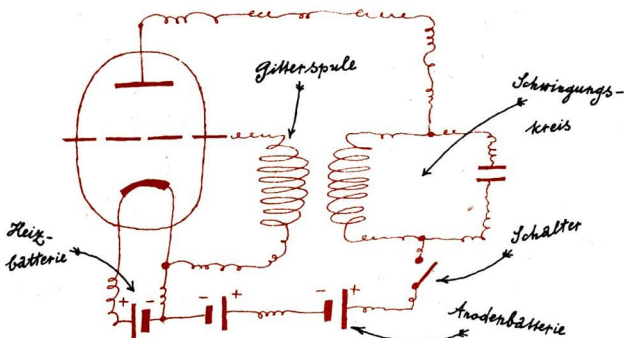
Die Röhre kommt hinzu

Ehe wir uns überlegen, ob und wie wir den Schwingungskreis technisch nutzen können, müssen wir versuchen, im Schwingungskreis Wechsellspannungen und -ströme gleichbleibender Amplitude zu erhalten. Mit Strömen, die nach einigen Perioden schon abgeklungen sind, ist nicht allzuviel anzufangen.

Man brauchte nur die bei jeder Schwingung auftretenden Verluste durch eine geringe zusätzliche Energiezufuhr auszugleichen, dann würden die Schwingungen unverändert und beliebig lange andauern, ähnlich wie eine Schaukel ständig weiterschwingt, wenn wir ihr bei jedem Pendeln einen kleinen Stoß versetzen.

Diese Aufgabe können wir einer Röhre übertragen, die mit dem Schwingungskreis und einer zweiten Spule zusammengeschaltet wird.

Die Röhre wird „angeheizt“. Sobald ihre Katode die Betriebstemperatur erreicht hat, schalten wir die Anodenbatterie ein. Es beginnt Anodenstrom zu fließen. Die Selbstinduktion der Spule setzt seinem raschen Anwachsen einen Widerstand entgegen. An der Spule entsteht eine Gegenspannung und lädt den Kondensator auf. Er beginnt sich anschließend sofort wieder zu entladen und stößt den Schwingungskreis zu Schwingungen an, deren Frequenz durch die Daten von Kondensator und Spule



bestimmt wird. Ohne die Mitwirkung der Röhre und der zweiten Spule würden sie bald abklingen.

So aber geschieht etwas anderes: Durch die Spule des Schwingungskreises fließt Wechselstrom. Er induziert eine Wechselspannung in der „Gitterspule“, die wir als Sekundärspule eines Transformators ansehen können. Diese Spannung liegt, wie aus der Skizze hervorgeht, aber auch zwischen Gitter und Katode der Röhre. Sie steuert infolgedessen den Anodenstrom. Er pendelt im Takte der steuernden Wechselspannung. Wir können uns wieder vorstellen, daß er aus einem Gleichstrom und einem überlagerten Wechselstrom zusammengesetzt ist. Dieser Wechselstrom durchfließt auch die Spule des Schwingungskreises.

Nun hat ein Schwingungskreis eine weitere sehr bemerkenswerte Eigenschaft: Er setzt in der von uns dargestellten Schaltung den Wechselströmen einen besonders großen Widerstand entgegen, deren Frequenz mit seiner „Eigenfrequenz“ übereinstimmt, das heißt mit der Frequenz, in der der sich selbst überlassene Kreis schwingt, nachdem sein Kondensator geladen wurde. Wechselströme anderer Frequenz läßt er verhältnismäßig ungehindert passieren. In unserem Fall stimmen die Frequenz des Anodenstromes und die Eigenfrequenz des Schwingungskreises überein. Infolgedessen ruft der schwankende Anodenstrom am Schwingungskreis eine relativ hohe Wechselspannung hervor.

Diese Wechselspannung wirkt den Verlusten des Schwingungskreises entgegen, sie „entdämpft“ ihn. Ist die Wechselspannung gerade so groß, daß die Verluste ausgeglichen werden, verlaufen die Schwingungen „ungedämpft“, mit gleichbleibender Amplitude. Die Anordnung ist zum „Röhrengenerator“ geworden, der Wechselspannungen und -ströme fast beliebiger Frequenz erzeugen kann.

Erhöhen wir in unserer „Rückkopplungsschaltung“ die Windungszahl der Gitterspule oder bringen wir diese der Schwingungskreissspule sehr nahe, so werden nicht nur die Verluste ersetzt, sondern es bleibt darüber hinaus „Energie übrig“. Die Amplitude der Schwingungen nimmt zu, bis ihr durch die Eigenschaften der Röhre und die Leistungsfähigkeit der Anodenbatterie, die der ursprüngliche Energielieferant ist, eine Grenze gesetzt wird. Wir können in diesem Fall dem Schwingungskreis Energie entnehmen, ohne daß die Schwingungen erlöschen. Der Röhrengenerator kann Wechselstromenergie nach außen abgeben.

Allerdings bedeutet das nicht, daß wir mit seiner Hilfe die Generatoren in Kraftwerken ersetzen können. Mit Spezialröhren und besonderen Schaltungen lassen sich zwar bei entsprechendem technischen Aufwand Leistungen bis zu 1000 kW und darüber gewinnen. Gemessen an den Leistungen von Kraftwerksgeneratoren ist das aber sehr wenig. Außerdem muß dem Röhrengenerator eine entsprechende Gleichstromleistung zugeführt werden, und wo sollte man diese hernehmen, wenn nicht aus Gleichrichtern, die ihren Strom vom Kraftwerk beziehen?

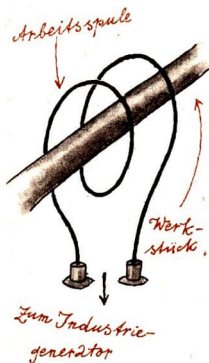
Wärme – induktiv und dielektrisch

Es bleiben trotzdem sehr große Anwendungsgebiete für Röhrengeneratoren übrig, zum Beispiel die „induktive“ und „dielektrische“ Wärmebehandlung. Wenn Werkstoffe oder Werkstücke erwärmt, gegläht, geschmolzen, gehärtet, gelötet oder geschweißt werden sollen, so mußte früher die Wärme von außen zugeführt werden. Dabei gab es große Wärmeverluste, es war schwierig, die Wärmezufuhr zu regeln oder auf bestimmte Stellen des Werkstücks zu konzentrieren.

Bei der induktiven Wärmebehandlung, der wir uns zuerst zuwenden wollen, treten diese Mängel nicht auf. Die Wärme entsteht im Werkstück selbst, ist auf einfache Weise zu regulieren und auf engen Raum zu begrenzen.

Grundlage der induktiven Wärmebehandlung sind Wirbelströme. Sie erwärmen ein Werkstück, das wir in das Magnetfeld der Schwingkreissspule eines Röhrengenerators bringen. Das ist das Arbeitsprinzip eines „Industriegenerators“ für induktive Erwärmung. Bei seiner technischen Ausführung wird die Schwingkreissspule meistens geteilt. Einige Windungen sorgen zusammen mit der Gitterspule dafür, daß die Schwingungen aufrechterhalten werden, die übrigen bilden die „Arbeitsspule“, in die das Werkstück eingelegt wird. Man kann die Arbeitsspule so formen, daß nur bestimmte Partien des Werkstücks dem Spulenfeld ausgesetzt sind und erwärmt werden.

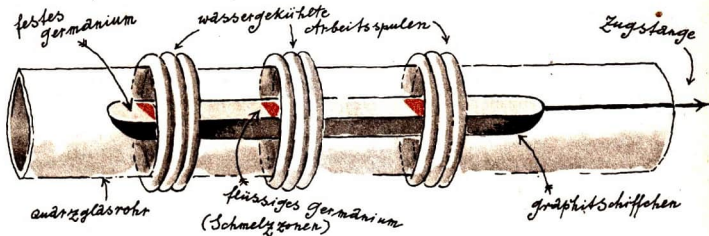
Dabei hilft noch ein anderer Effekt: Wechselströme füllen den Querschnitt eines Leiters nicht gleichmäßig aus, sondern werden



durch den sogenannten Haut- oder Skineffekt an die Oberfläche gedrängt. Das ist um so mehr der Fall, je höher die Frequenz des Wechselstromes ist. Wechselströme mit Frequenzen von vielen Hunderten oder Tausenden Kilohertz fließen fast nur noch an der Leiteroberfläche, ohne tiefer in das Leitermaterial einzudringen. Durch Verändern der Frequenz eines Industriegenerators kann man die „Eindringtiefe“ der induzierten Ströme und damit der Wärme der jeweiligen technischen Aufgabenstellung gut anpassen.

Die Skala der Anwendungsmöglichkeiten der induktiven Erwärmung ist sehr lang. Das Weichglühen von Rohren, Drähten oder Blechen war früher umständlich. Es ließ sich kaum verhindern, daß die geglühten Teile an der Oberfläche „verzunderten“. Da der Röhrengenerator mit seiner Arbeitsspule die Möglichkeit bietet, große Wärmemengen auf engem Raum wirken zu lassen, kann der Glühprozeß sehr beschleunigt werden. Damit sinken die Verluste durch Verzundern teilweise um 90% und mehr.

Setzt man ein evakuiertes Gefäß mit Schmelzgut in das Innere einer Arbeitsspule, lassen sich kleine Metallmengen ohne Gefahr einer Oberflächenverschmutzung schmelzen. Dieses Verfahren hat beispielsweise bei der Gewinnung von Reinstoffen, wie die Halbleitertechnik sie benötigt, allergrößte Bedeutung erlangt.



Beim „Zonenschmelzen“ wird auf induktivem Wege Halbleitermaterial teilweise geschmolzen. Die örtlich begrenzten „Schmelzzonen“ wandern langsam durch das Material, nehmen dabei die meisten Verunreinigungen mit und lassen sehr reines Halbleitermaterial zurück.

Die Lötnahte an Konservenbüchsen, Blechschachteln und anderen Massenerzeugnissen lassen sich durch induktive Erwärmung schnell, sauber und fortlaufend ziehen. Für die Herstellung einer Lötnaht von 1 m Länge werden nur wenige Sekunden benötigt. Trotzdem ist die Naht viel sauberer und regelmäßiger als bei den bisher gebräuchlichen Verfahren. Beim Hartlöten hat sich die „Hochfrequenzerwärmung“ ebenfalls ausgezeichnet bewährt und die Arbeitsproduktivität vervielfacht.



Eine in der Technik immer wiederkehrende Aufgabe ist es, Werkstücke an der Oberfläche zu härten, während das Innere von der Wärmebehandlung möglichst wenig berührt werden soll. Gerade das Oberflächenhärten aber war eine Tätigkeit, die nur von Fachkräften mit langjähriger Erfahrung gut ausgeführt werden konnte.

Röhrengeneratoren und Hauteffekt haben es ermöglicht, für die Oberflächenhärtung verschiedenster Werkstücke automatisch arbeitende Maschinen zu konstruieren, die Produkte von ständig gleicher Qualität liefern und für das Härten nur einen Bruchteil der früher benötigten Zeit brauchen.

Kurbelwellen, Sägeblätter, Zahnräder, Spindeln, Schneidwerkzeuge und viele andere Dinge können auf diese Weise gehärtet werden. Das geht oft so schnell, daß man die Werkstücke in ständiger Bewegung halten kann. Sie durchlaufen die Arbeitspule, werden dabei gehärtet und anschließend sofort durch eine Kühlbrause abgeschreckt. Man kann daher solche Maschinen gut in Fertigungsstraßen eingliedern.

In nichtleitenden Stoffen entstehen keine Wirbelströme, Trotzdem sind sie einer Behandlung mit dem Röhrengenerator zugänglich. Bringt man sie zwischen die Platten des Schwingkreis-kondensators, werden sie erwärmt. Weil der Stoff zwischen den Platten eines Kondensators auch Dielektrikum genannt wird, spricht man von dielektrischer Erwärmung. Sie ist nicht minder wichtig als die induktive Erwärmung.

Zwischen den Platten eines geladenen Kondensators besteht ein elektrisches Feld. Es hat eine bestimmte Richtung, die sich umkehrt, wenn die Ladungsvorzeichen an den Kondensatorplatten vertauscht werden. Im Röhrengenerator wechseln die Vorzeichen dauernd. Zwischen den Kondensatorplatten existiert infolgedessen ein elektrisches Wechselfeld, dessen Stärke und Richtung sich mit der Frequenz des Wechselstromes im Schwingungskreis verändern.

Bringen wir einen nichtleitenden oder schlecht leitenden Stoff in dieses Wechselfeld, so werden seine Moleküle gezwungen, sich unter dem Einfluß elektrischer Kräfte fortwährend hin- und herzdrehen. Es kommt dabei zwischen den Molekülen zu „Reibungsvorgängen“, die das Dielektrikum erwärmen.

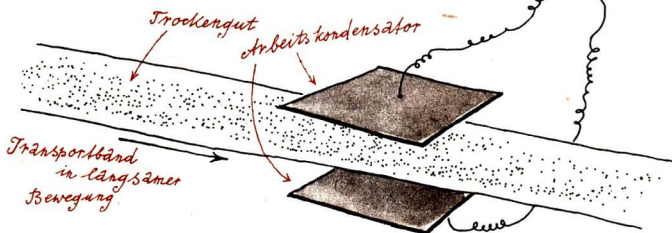
Einen Hauteffekt gibt es diesmal nicht. Das Dielektrikum wird gleichmäßig durchwärmt. Darin liegt der größte Vorteil dielektrischer Erwärmung. Nichtleitende Stoffe sind nämlich schlechte Wärmeleiter. Es ist kaum möglich, sie von außen her gleichmäßig zu durchwarmen, ohne sehr lange Bearbeitungszeiten in Kauf nehmen zu müssen. Gerade solche Stoffe sind besonders für dielektrische Erwärmung geeignet. Es gibt kein anderes Verfahren, mit dem sich Plastikmaterial, Holz, Textilien, Papier, aber auch Lebensmittel so schnell und gleichmäßig erwärmen ließen.

Die entstehende Wärmemenge hängt unter anderem von der Frequenz ab, mit der das Wechselfeld seine Richtung ändert. Verdopplung der Frequenz bedeutet doppelte Wärmemenge in der gleichen Zeit. Man benutzt daher bei dielektrischer Erwärmung gern sehr hohe Frequenzen und ist bereits bei vielen Millionen Hertz angelangt.

Meistens wird nicht der Schwingkreiskondensator selbst als Arbeitskondensator benutzt. Man entnimmt die hochfrequente Energie dem Schwingungskreis mit einem Transformator und führt sie einem besonderen Arbeitskondensator zu, der in seiner Größe und Form den zu bearbeitenden Objekten gut angepaßt wird.

Viele nichtleitende Stoffe müssen vor ihrer weiteren Verarbeitung getrocknet werden. Mit dielektrischer Erwärmung läßt sich das sehr schnell und wirtschaftlich erledigen. Salz, Mehl, Zucker und andere körnige oder pulverförmige Trockengüter gleiten auf einem Transportband langsam zwischen den Platten des Arbeitskondensators hindurch und werden so fortlaufend getrocknet. Auf gleiche Weise kann man Obst und Gemüse trocknen, Fleisch oder Fische dörren. Durch entsprechende Leistung des Generators können im Wechselfeld große Wärmemengen frei werden. Man bäckt auf diese Weise bereits auf dem laufenden Transportband Keks und andere Dauerbackwaren. Auch ein

*Zum
Industriegerator*



dielektrisches Sterilisieren von Lebensmitteln ist möglich. Erwähnt sei schließlich auch die hier und da erprobte „Hochfrequenzküche“, in der Speisen im Wechselfeld eines Kondensators in Sekunden zubereitet werden können. Für Betriebsküchen und Schnellgaststätten könnten solche „Hochfrequenzherde“ sehr nützlich sein.

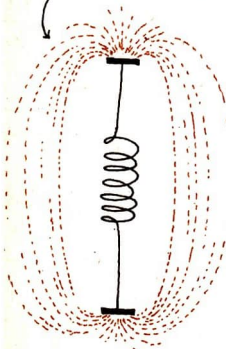
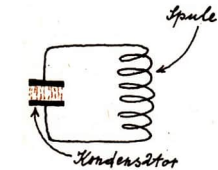
Papier und Textilien werden ebenfalls getrocknet, indem man sie einen Arbeitskondensator durchlaufen läßt. Holz kann im elektrischen Wechselfeld überraschend schnell von innen heraus getrocknet werden. In wenigen Stunden wird ein Feuchtegehalt erreicht, als hätte das Holz Monate auf einem Trockenplatz zugebracht.

Beim Verleimen von Holzteilen, bei der Herstellung von Sperrholz- oder Faserplatten konnte die Arbeitsproduktivität dadurch vervielfacht werden, daß man die Werkstoffe gleichzeitig mit dem Pressen dielektrisch erhitze.

Viele Plastikmaterialien werden durch Erwärmen weich, nehmen aber nach dem Abkühlen den festen Zustand wieder an. An zahlreichen Kunststoffteilen können wir die technische Ausnutzung dieser Eigenschaft feststellen: Sie sind „mit Hochfrequenz verschweißt“. Teile, die verbunden werden sollen, werden an den entsprechenden Stellen in einem Arbeitskondensator erhitzt und sind anschließend fest miteinander verbunden.

Briefaschen, Tuben und Plastikbehälter, Schuhe, Arbeitsbekleidung, Kollegmappen und Hunderte anderer Dinge werden dielektrisch verschweißt. Die dielektrisch arbeitende „Nähmaschine“ schickt sich an, die Welt zu erobern.

Zum Pressen und Vorwärmen von Plastikmassen wird die dielektrische Erwärmung ebenfalls im weitesten Umfang angewendet.



Wirkung in die Ferne

Wie weit reicht das magnetische Feld eines stromdurchflossenen Leiters? Mit dieser Frage haben sich Wissenschaftler und Techniker schon recht früh beschäftigt. Das Ergebnis ihrer Bemühungen war: Das Kraftfeld, das ein stromdurchflossener Draht oder eine stromdurchflossene Spule aufbaut, breitet sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 300 000 km/s, also mit Lichtgeschwindigkeit aus. Es hat theoretisch kein Ende, seine Stärke nimmt aber mit wachsender Entfernung vom Leiter rasch ab. Da in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts noch keine Instrumente zur Verfügung standen, mit denen man sehr schwache Felder hätte nachweisen können, blieben die hier und da angestellten Versuche, magnetische Felder zur Nachrichtenfernübertragung zu benutzen, erfolglos.

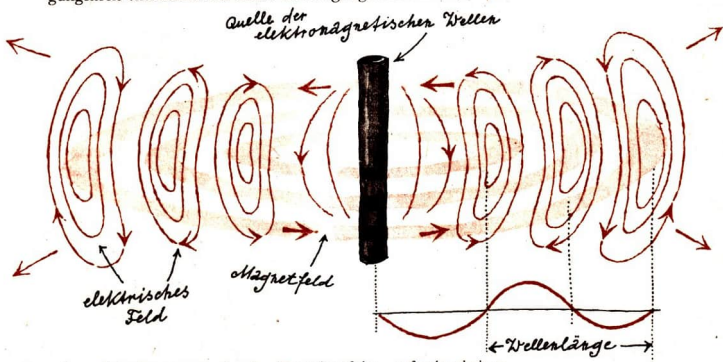
Wie verhält sich das elektrische Feld eines Kondensators? Unsere bisherige Annahme, daß sich seine Feldlinien auf kürzestem Wege von einer Platte zur anderen erstrecken, ist nicht ganz richtig. An den Rändern der Kondensatorplatten „quellen“ auch Feldlinien nach außen. Auf größere Entfernung ist das Kondensatorfeld trotzdem nicht festzustellen. Das gilt auch für das elektrische Wechselfeld des Kondensators im Schwingungskreis.

Sich ändernde magnetische und elektrische Felder sind jedoch auf große Entfernungen nachweisbar, wenn wir vom uns bekannten „geschlossenen“ zum „offenen“ Schwingungskreis übergehen. Wir entfernen dazu die Kondensatorplatten voneinander und vergrößern ihren Abstand auf einige Meter, indem wir die Anschlußdrähte zur Spule entsprechend verlängern.

Laden wir den Kondensator auf, so entsteht ein elektrisches Feld der skizzierten Form. Wenn der Kondensator entladen wird,

fließt, wie beim geschlossenen Schwingungskreis, Wechselstrom, dessen Frequenz von Spule und Kondensator bestimmt wird. Aus der Spule und aus den Leitungsdrähten treten magnetische Kraftlinien aus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit entfernen. Gleichzeitig wird das elektrische Feld abgebaut, um – nach Entladung des Kondensators – wieder in umgekehrter Richtung aufgebaut zu werden.

In einem aber unterscheidet sich der offene Schwingungskreis grundsätzlich vom geschlossenen. Die im elektrischen beziehungsweise magnetischen Feld gespeicherte Energie kehrt nicht vollständig in den Schwingungskreis zurück. Es „schnüren“ sich elektrische Feldlinien ab, die in sich geschlossen sind und sich gemeinsam mit magnetischen Kraftlinien vom offenen Schwingungskreis entfernen. Der offene Schwingungskreis strahlt, wenn



seine Schwingungen durch Energiezufuhr aufrechterhalten werden, in Form sich verändernder elektrischer und magnetischer Felder Energie aus. Diese mit Lichtgeschwindigkeit wandernden Felder nennt man „elektromagnetische Wellen“. Sie sind die Grundlage der gesamten „drahtlosen“ Nachrichtentechnik und können noch auf Entfernungen von vielen Millionen Kilometern nachgewiesen werden.

Die elektromagnetischen Wellen wurden in den Jahren von 1886 bis 1889 von dem großen deutschen Physiker Heinrich Hertz gefunden und erforscht. Es war keine zufällige Entdeckung. Schon Jahrzehnte vorher war der Engländer James Clerk Maxwell (1831–1879) auf Grund theoretischer Erwägungen zu dem Schluß gekommen, daß es elektromagnetische Wellen geben müsse, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimme. Hertz glückte ihr Nachweis, und in einer Reihe glänzender experimenteller Untersuchungen

konnte er überdies die wichtigsten Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen aufdecken. Zur Erinnerung an Heinrich Hertz trägt die Einheit der Frequenz in vielen Ländern seinen Namen.

Mit Anwendungen der elektromagnetischen Wellen, der „Radiowellen“; für die Nachrichtentechnik beschäftigte sich Hertz, der sehr jung starb, nicht. Von seinen Zeitgenossen wurden diese Möglichkeiten jedoch bald erkannt. In Rußland führte Alexander Stepanowitsch Popow (1859–1905) im Jahre 1895 seinen „Gewittermelder“ vor, mit dessen Hilfe die von Blitzen ausgehenden elektromagnetischen Wellen auf große Entfernung empfangen werden konnten. Einige Monate danach übermittelte Popow auf eine Distanz von 250 m das erste Funktelegramm der Weltgeschichte.

1900 gab es auf einigen Leuchttürmen und Schiffen bereits Funkstationen, am 12. Dezember 1901 überquerte als erstes Funkzeichen der Morsebuchstabe „s“ zwischen England und Neufundland den Atlantik. Seitdem hat das Funkwesen den Aufschwung genommen, dessen Nutznießer wir heute alle sind.

Kehren wir, ehe wir uns der Nachrichtenübermittlung zuwenden, noch einmal zum offenen Schwingungskreis zurück. Einen vollständigen Schwingungsablauf und die von ihm hervorgerufenen magnetischen und elektrischen Kraftlinien können wir als einen „Wellenzug“ ansehen. Die einzelnen Wellenzüge folgen einander, solange Wechselstrom im offenen Schwingungskreis fließt, und sie folgen einander um so schneller, je höher die Frequenz dieses Wechselstromes ist.

In jeder Sekunde verlassen also mehr oder weniger Wellenzüge den offenen Schwingungskreis. Am Ende der ersten Sekunde hat sich der erste Wellenzug 300 000 km vom Schwingungskreis entfernt, alle folgenden verteilen sich auf diese Strecke. Wir können demnach jedem Wellenzug eine bestimmte Länge zusprechen, die „Wellenlänge“. Sie ist um so größer, je niedriger die Frequenz der elektromagnetischen Wellen ist und umgekehrt. Da Wellenlänge und Frequenz mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit in engem Zusammenhang stehen, gilt:

$$\text{Wellenlänge (m)} = \frac{300\ 000}{\text{Frequenz } f \text{ (kHz)}}$$

Man kann demnach die Wellenlänge eines Senders sofort ausrechnen, wenn seine Frequenz bekannt ist; und man erhält aus der Wellenlänge durch Umstellen der Formel ebenso einfach die Frequenz.

Der Deutschlandsender arbeitet auf der Frequenz von 185 kHz. Daraus bekommen wir:

$$\text{Wellenlänge} = \frac{300\,000}{185} = 1\,621,6 \text{ m}$$

Der Ultrakurzwellensender Brocken des Deutschlandsenders benutzt eine Wellenlänge von 3,080 m. Das ergibt:

$$\begin{aligned} \text{Frequenz} &= \frac{300\,000}{3,080} \\ &= 97\,400 \text{ kHz} = 97,4 \text{ MHz} \end{aligned}$$

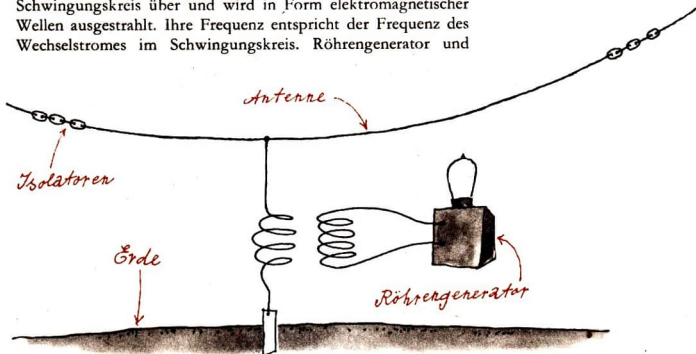
Die Bezeichnung „Ultrakurzwellensender“ erinnert daran, daß man den Bereich der für die Funktechnik wichtigen elektromagnetischen Wellen mehrfach unterteilt hat. Das war nötig, weil Wellen verschiedener Länge teilweise ganz verschiedene Eigenschaften aufweisen. Jedem Rundfunkhörer ist diese Unterteilung wenigstens in groben Zügen bekannt.

Ein Sender meldet sich

Wir müssen endlich erfahren, wie man den offenen Schwingungskreis dazu bringt, fortwährend elektromagnetische Energie ausstrahlen, und wie man ihm die dazu nötige Energie zuführt.

Vorher sei noch verraten, daß man in der Funktechnik auf die beiden Kondensatorplatten meistens verzichtet. Statt der unteren Platte können wir den leitenden Erdboden nehmen, statt der oberen spannen wir einen Draht aus, eine „Antenne“.

Nähe an die Spule bringen wir die Schwingkreisspule eines Röhrengenerators. Von ihm geht Energie auf den offenen Schwingungskreis über und wird in Form elektromagnetischer Wellen ausgestrahlt. Ihre Frequenz entspricht der Frequenz des Wechselstromes im Schwingungskreis. Röhrengenerator und





offener Schwingungskreis sind zum „Sender“ geworden. Er arbeitet mit besonders gutem Wirkungsgrad, wenn die Eigenfrequenz des Antennenkreises mit der des Generatorschwingungskreises übereinstimmt.

Mit einem Sender, der nur eine Röhre enthält, lassen sich nur bescheidene Hochfrequenzleistungen gewinnen. Deshalb findet man fast in allen Sendern für die Nachrichtentechnik mehrere Röhren, die verschiedene Aufgaben zu erfüllen haben.

Ein Sender muß seine Frequenz genau einhalten, damit er keine anderen Funkdienste stört. Besonders von Rundfunksendern und von Sendern für den internationalen Funkverkehr wird ein Höchstmaß an Frequenzgenauigkeit gefordert. Diese Frequenz zu erzeugen und einzuhalten ist die Aufgabe des „Steuersenders“, eines Röhrengenerators, der nur eine geringe Hochfrequenzleistung zu erzeugen braucht. Dafür wird bei seiner Konstruktion das ganze Augenmerk auf „Frequenzkonstanz“ gelegt. Der Schwingungskreis und die übrigen Bauelemente werden so ausgewählt, daß Änderungen ihrer Daten während des Betriebes so gut wie ausgeschlossen sind. Um Temperaturschwankungen oder klimatische Veränderungen unwirksam zu machen, wird der Steuersender in einen hermetisch abgeschlossenen Behälter eingesetzt, der mit einer automatischen Temperaturregelanlage ausgestattet ist.

Steuersender, die nur auf einer oder auf einigen wenigen Frequenzen arbeiten sollen, halten ihre Frequenz mit „Steuerquarzen“ konstant. Scheiben, die in ganz bestimmter Weise aus einem Quarzkristall herausgeschnitten wurden, wirken nämlich wie ein sehr stabiler Schwingungskreis. Sie halten ihre Frequenz mit allergrößter Genauigkeit ein. Nicht nur in der Sendetechnik, sondern auch beim Bau äußerst präziser Uhren, der sogenannten Quarzuhren, macht man sich diese Erscheinung zunutze.

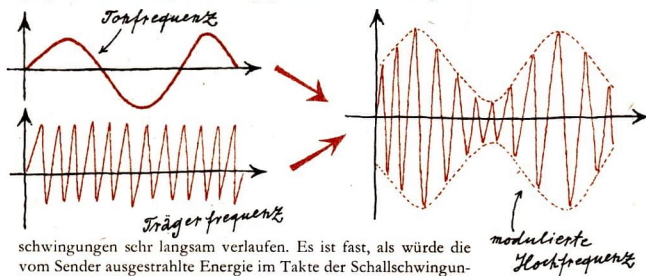
Die vom Steuersender abgegebene geringe Hochfrequenzenergie wird im „Senderverstärker“ erhöht. Er besteht aus mehreren Stufen, deren jede mit Senderröhren bestückt ist. Mitunter leistet – energetisch gesehen – eine davon soviel wie 100 000 Verstärkerröhren für Rundfunkempfänger. Die letzte Verstärkerstufe, der „Endverstärker“, speist den Antennenkreis. In Sendern geringer Leistung, bei tragbaren Funksprechgeräten oder in Satelliten treten Transistoren an die Stelle der Röhren.

Es genügt nicht, daß ein Sender elektromagnetische Wellen ausstrahlt; die Wellen sollen Telegrafiezeichen, Töne oder Bilder in die Ferne übertragen. Das Senden von Morsezeichen bereitet keinerlei Schwierigkeiten, weil man den Sender nur in ihrem Rhythmus ein- und auszuschalten braucht. Bei der Übertragung von Schallschwingungen geht das natürlich nicht; man muß einen umständlicheren Weg wählen.

Die Schallschwingungen werden zunächst vom Mikrophon in Strom- und Spannungsschwankungen verwandelt. Sie laufen über

leistungsfähige Verstärker und „modulieren“ anschließend den Sender, das heißt, sie werden den vom Sender erzeugten Hochfrequenzschwingungen aufgeprägt.

Bei der „Amplitudenmodulation“ steuert man die Amplituden der Hochfrequenzschwingungen im Rhythmus der Schallschwingungen, der Tonfrequenz, die gegenüber den Hochfrequenz-



schwingungen sehr langsam verlaufen. Es ist fast, als würde die vom Sender ausgestrahlte Energie im Takte der Schallschwingungen mehr oder weniger weit auf- und zugezogen.

Wir wollen uns nicht damit aufhalten, wie man die Modulation technisch verwirklicht. Wichtig zu wissen ist jedoch, daß der modulierte Sender nicht nur auf seiner konstanten Trägerfrequenz arbeitet, sondern einen Frequenzkanal benötigt, dessen Grenzen ein Stück links und rechts der eigentlichen Sendefrequenz liegen. Die Breite des Kanals hängt davon ab, welchen Tonumfang man übertragen möchte. Für eine Wiedergabe, bei der selbst die höchsten Töne der Orchesterinstrumente nicht „verlorengehen“, brauchte man Sendekanäle von mindestens 30 kHz Breite. Da aber ein Kanal, wenn Störungen vermieden werden sollen, immer nur von einem Sender benutzt werden darf, ließen sich im Mittelwellenbereich, der Rundfunksendern vorbehalten ist, nur sehr wenige Stationen unterbringen. Deshalb hat man für den Mittelwellenbereich international eine Kanalbreite von nur 9 kHz festgelegt. Eine naturgetreue Übertragung von musikalischen Darbietungen ist in derart schmalen Kanälen natürlich nicht möglich.

Kanäle für hochwertige Übertragungen kann man nur im Ultrakurzwellenbereich zur Verfügung stellen. Dabei verwendet man ein anderes Modulationsverfahren, die sogenannte Frequenzmodulation. Diesmal bleiben die Amplituden der Senderwellen unverändert, stattdessen wird die Sendefrequenz im Rhythmus der Schallschwingungen geringfügig verändert.

Neben der Möglichkeit, breite Frequenzkanäle zu übertragen, hat der Ultrakurzwellenbereich noch den Vorteil, daß sich die „atmosphärischen Störungen“, die wir im Lang- und Mittelwellenbereich besonders während der Sommermonate als Knat-

tern oder Prasseln hören können, kaum noch bemerkbar machen. Störungen durch elektrische Geräte lassen sich in Empfängern, die für frequenzmodulierte Sendungen eingerichtet sind, fast völlig ausschalten. Diese Vorteile erklären, warum sich der Ultrakurzwellenrundfunk so schnell durchsetzte.

Kürzer, immer kürzer

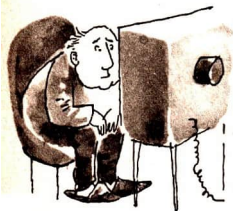
Nach 1920 wuchs die Zahl der Funklinien, der Rundfunksender, der Schiffs- und Flugfunkstationen in atemberaubendem Tempo. Sehr bald wurde die Zahl der verfügbaren Frequenzkanäle knapp, und von Jahr zu Jahr bereitete es größere Schwierigkeiten, neue Funkverbindungen „unterzubringen“.

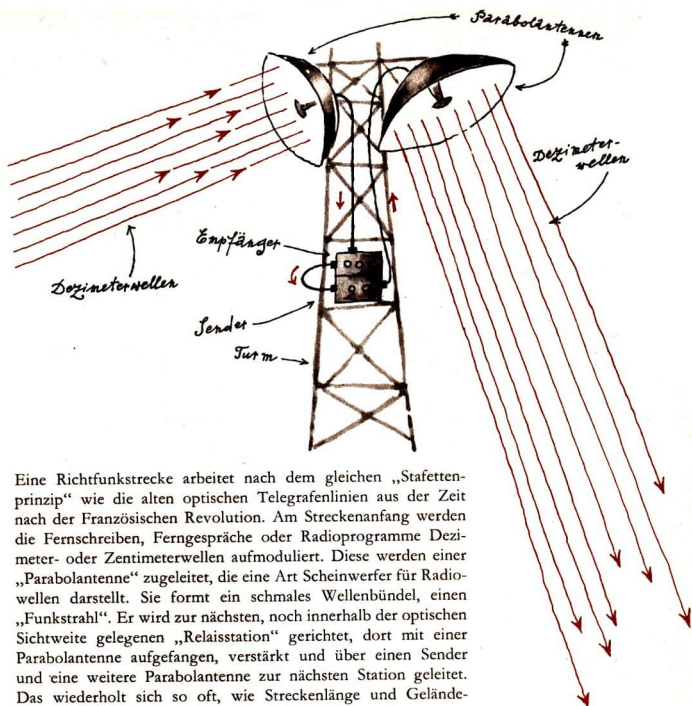
Man tat daher zunächst das, was sich beim Fernsprechen und beim Telegrafieren über Draht bewährt hatte: Man ersann Schaltungen und Geräte, die es gestatteten, über eine Funklinie gleichzeitig mehrere Telegramme, Fernschreiben oder Telefongespräche zu schicken. Die Leistungsfähigkeit der Funkverbindungen wurde dadurch vervielfacht. Fast alle wichtigen internationalen Funklinien sind heute für Mehrfachbetrieb eingerichtet.

Daneben suchte man neue Frequenzbereiche zu erschließen. Doch das war gar nicht so einfach. Der Langwellenbereich bietet nur für wenige Frequenzkanäle Raum. Sie waren schon in den ersten Jahren der Funktechnik besetzt worden. Der Mittelwellenbereich blieb bis auf schmale Reste dem Rundfunk vorbehalten, der Kurzwellenbereich hatte sich schnell gefüllt. Frei waren nur noch die Ultrakurzwellen (Wellen von 1 m bis 10 m Wellenlänge) und die Bereiche noch kürzerer Wellenlänge.

Allerdings hatte man sich von vornherein damit abzufinden, daß in diesen Frequenzbereichen ein direkter Weitverkehr über Tausende Kilometer nicht möglich ist. Sehr kurze Wellen, „Dezimeterwellen“ (unter 1 m Wellenlänge) und „Zentimeterwellen“ (unter 10 cm Wellenlänge), verhalten sich fast wie Licht. Sie breiten sich geradlinig aus und erstrecken sich daher nur bis zum Horizont. Dafür aber haben diese Wellen neben ihrer Störungsarmut den Vorteil, daß man mit sehr breiten Frequenzkanälen arbeiten kann. Ein Sender kann im Bereich kürzester Wellen gleichzeitig Hunderte von Ferngesprächen und Tausende von Fernschreiben ausstrahlen. Bei solchem „Fassungsvermögen“ lohnt es sich durchaus, weite Strecken dadurch zu überbrücken, daß man sie in Teilstrecken gliedert und zahlreiche Zwischenstationen einschibt.

„Richtfunkstrecken“, die Frequenzen im Dezimeter- oder Zentimeterwellenbereich benutzen, sind überall auf der Welt in Betrieb. Besonders zur Weiterleitung von Rundfunk- und Fernsehprogrammen, die stets einen breiten Frequenzkanal erfordern, haben sie sich bewährt.





Eine Richtfunkstrecke arbeitet nach dem gleichen „Stafettenprinzip“ wie die alten optischen Telegrafenzüge aus der Zeit nach der Französischen Revolution. Am Streckenanfang werden die Fernschreiben, Ferngespräche oder Radioprogramme Dezimeter- oder Zentimeterwellen aufmoduliert. Diese werden einer „Parabolantenne“ zugeleitet, die eine Art Scheinwerfer für Radiowellen darstellt. Sie formt ein schmales Wellenbündel, einen „Funkstrahl“. Er wird zur nächsten, noch innerhalb der optischen Sichtweite gelegenen „Relaisstation“ gerichtet, dort mit einer Parabolantenne aufgefangen, verstärkt und über einen Sender und eine weitere Parabolantenne zur nächsten Station geleitet. Das wiederholt sich so oft, wie Streckenlänge und Geländebeschaffenheit es erfordern.

Die meisten Relaisstationen sind unbemannt und arbeiten daher automatisch. Der technische Aufwand ist zwar groß, macht sich aber rasch durch die große Menge der gleichzeitig zu übermittelnden Gespräche, Fernschreiben und Radioprogramme bezahlt.

Den Technikern brachte der Weg zu höheren Frequenzen manche böse Überraschung. Es begann schon bei den Ultrakurzwellen. War man bisher gewohnt, daß die Eigenschaften der Schwingkreise fast ausschließlich von Spule und Kondensator bestimmt wurden, so zeigte sich jetzt, daß man den Einfluß der Zuleitungsdrähte zur Spule und zum Kondensator nicht mehr unberücksichtigt lassen durfte. Im Dezimeterwellenbereich und auf Zentimeterwellen war mit herkömmlichen Schwingkreisen überhaupt nichts mehr anzufangen. Ihre Stelle nahmen hohle Metall-



körper ein, „Topfkreise“ und „Hohlraumresonatoren“, in deren Innenräume die Hochfrequenzenergie eingeschlossen blieb.

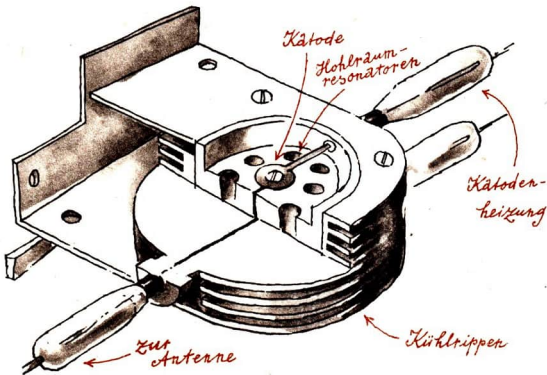
Für die Verbindung zwischen Sender und Antenne konnte man keine Drähte mehr wählen; denn diese hätten einen großen Teil der Energie noch vor der eigentlichen Antenne ausgestrahlt.

Zur Fortleitung von Dezimeterwellen benutzt man „Koaxialleitungen“. Sie bestehen aus einem Metallrohr, in dessen Mitte ein Draht verläuft. „Innenleiter“ und „Außenleiter“ sind sorgfältig gegeneinander isoliert. Der Innenleiter wird durch Isolierstücke in der Mitte des Rohres gehalten. Wir können uns vorstellen, daß die elektromagnetische Energie im Raum zwischen Innen- und Außenleiter wandert. Nach außen strahlt eine Koaxialleitung überhaupt nicht; denn wegen des Hauteffekts dringt die Hochfrequenzenergie überhaupt nicht in das Material des Außenleiters ein.

Im Zentimeterwellengebiet fällt auch noch der Innenleiter weg. Übrig bleibt ein Rohr runden oder auch rechteckigen Querschnitts, der „Hohlleiter“. In ihm „fließt“ die elektromagnetische Energie beinahe verlustfrei. Das eröffnet eine neue Möglichkeit für die Übertragung breiter Frequenzbänder zur gleichzeitigen Übermittlung vieler Nachrichten. Man moduliert Zentimeter- oder Millimeterwellen, die durch lange Hohlleiter geschickt werden. Auf diese Weise lassen sich mit verhältnismäßig wenigen Zwischenverstärkern große Entfernungen überbrücken. Viele Fachleute rechnen damit, daß in naher Zukunft in großem Umfange Hohlleiter an die Stelle von Fern- und Trägerfrequenzkabeln treten werden.

Besonderen Kummer hatte man mit den Röhren. Nicht einmal mehr im Ultrakurzwellenbereich arbeiteten die üblichen Senderöhren zufriedenstellend. Das lag vor allem daran, daß man bei sehr hohen Frequenzen die „Laufzeit“ der Elektronen durch die Röhre nicht mehr unberücksichtigt lassen kann. Wenn in einer Rückkopplungsschaltung der Schwingungskreis bereits zur nächsten Schwingung ansetzt, ehe der Energieverlust der vorhergehenden ausgeglichen ist, kann der Sender nicht mehr einwandfrei arbeiten. Gerade das tritt aber bei sehr hohen Frequenzen schon während der winzigen Zeitspanne ein, die die Elektronen benötigen, um die Strecke Gitter-Anode hinter sich zu bringen. Durch die Entwicklung von Spezialröhren mit sehr dicht beieinander liegenden Elektroden und demzufolge geringer Elektronenlaufzeit erweiterte sich der nutzbare Wellenbereich zwar zu höheren Frequenzen hin. Im Zentimeterwellengebiet ließen sich aber auch mit diesen Röhren nur noch sehr geringe Leistungen erzeugen.

Für Höchstfrequenzen wurde eine Senderöhre entwickelt, die nach ganz anderen Prinzipien als herkömmliche Elektronenröhren funktioniert. Es ist das „Magnetron“. Es besteht aus einem massiven Metallkörper, in den symmetrisch zu einer



großen Mittelbohrung Hohlraumresonatoren eingearbeitet sind. Im mittleren Hohlraum sitzt außerdem eine elektrisch zu heizende Katode; der Innenraum des Magnetrons wird evakuiert.

Im Betrieb wird an den Metallkörper der positive Pol, an die Katode der negative Pol einer Spannungsquelle gelegt. Gleichzeitig wird der Innenraum des Magnetrons einem kräftigen Magnetfeld ausgesetzt. Die aus der Katode tretenden Elektronen unterliegen gleichzeitig zwei Einflüssen: Das elektrische Feld zwischen dem Metallblock und der Katode reißt sie zum Metallkörper, die magnetischen Kräfte lenken sie während des Fluges zur Seite ab. Infolgedessen durchlaufen die Elektronen eine Spiralbahn, ehe sie das positive Metall erreichen. In der Mittelbohrung des Magnetrons entsteht so etwas wie ein mit rasender Geschwindigkeit umlaufendes „Elektronenkarussell“. Dadurch werden in den Hohlraumresonatoren kräftige elektromagnetische Schwingungen angeregt, deren Frequenz von den Abmessungen der Resonatoren abhängt. Sie können „ausgekoppelt“ und der Antenne des Senders zugeführt werden. Mit dem Magnetron lassen sich kurzzeitig Sendeleistungen von mehr als 1000 kW erreichen. Die Radartechnik, in der so große Sendeleistungen gebraucht werden, wäre ohne Magnetron kaum vorstellbar.

Es gibt noch andere Höchstfrequenzröhren. Im „Klystron“ zum Beispiel entstehen „Elektronenpakete“, das heißt auf dichtem Raum zusammengedrückte Elektronenwolken, die durch ihre Bewegung Höchstfrequenzschwingungen erzeugen. In den „Wanderfeldröhren“ wird die Wechselwirkung zwischen einem Elektronenstrahl und einem elektrischen und magnetischen Wechselfeld zur Anfachung hochfrequenter Schwingungen benutzt.

SIE HÖREN DEN DEUTSCHLANDSENDER

Vom Detektor . . .

Bestimmt hören Sie täglich den Deutschlandsender oder eine andere Station unseres demokratischen Rundfunks; denn selbst, wenn Sie zur Gemeinde jener gehören, die als Besitzer eines Fernsehgerätes den Rundfunkempfänger mit (völlig ungerechtfertigter) Verachtung strafen, werden Sie Frühnachrichten, Wetterbericht und Zeitansage nicht missen wollen.

Zwar haben wir schon einen Blick hinter die Kulissen der „Zauberei“ getan, die uns Stimmen, Musik oder Mitteilungen aus fernen Ländern oder aus dem Weltraum ins Haus schickt, doch das war nur die eine Seite. Was geht im Empfänger vor? Wie sucht er aus Tausenden Wellen verschiedener Stationen den Sender heraus, den wir hören möchten? Was muß geschehen, damit sich die aufgefangenen Wellen in Musik oder in Bilder zurückverwandeln?

Bleiben wir gleich beim Auffangen der elektromagnetischen Wellen. Es ist sehr einfach. Halten wir einen elektrischen Leiter so, daß er von elektromagnetischen Wellen getroffen wird, entstehen in ihm Wechsellspannungen und Wechselströme, deren Frequenz mit der Frequenz des Senders übereinstimmt. Der Leiter wurde zur „Antenne“. Sie ist wichtigste und unentbehrliche Voraussetzung für jeden Funkempfang. Einen Empfänger ohne Antenne gibt es nicht. Bei Geräten, die wir „ohne Antenne“ betreiben können, verbirgt sie sich im Inneren.

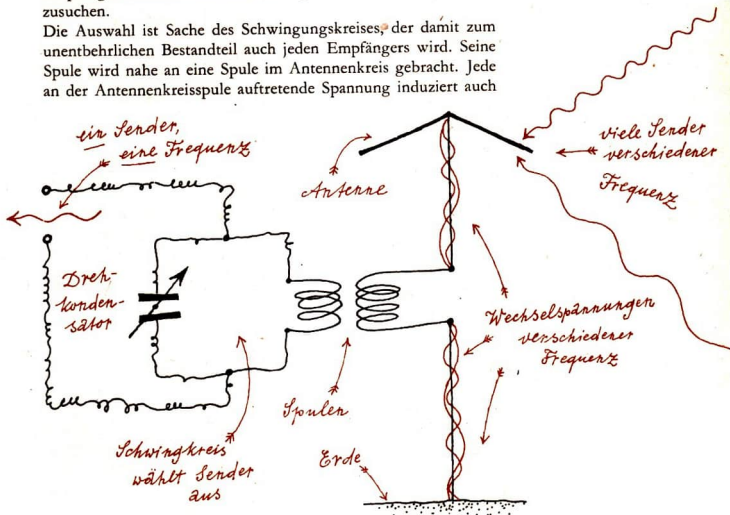
Auch jede Empfangsantenne stellt einen offenen Schwingungskreis dar, der selbstverständlich auch eine Eigenfrequenz besitzt. Am günstigsten wäre es, wenn man die Antenne so konstruierte, daß ihre Eigenfrequenz mit der Frequenz des zu empfangenden Senders übereinstimmt. Das ist jedoch nur selten möglich; denn mit einem Empfänger will man meistens nicht nur einen Sender, sondern Stationen auf verschiedensten Frequenzen auffehmen.

Nur manchmal können oder müssen wir uns den Aufwand einer auf eine bestimmte Frequenz abgestimmten Antenne leisten. Für den Fernsehempfang muß man die Energie der elektromagnetischen Wellen so gut wie nur möglich ausnutzen, um ein einwandfreies Bild zu erhalten. Jeder Fernsehteilnehmer weiß aber auch, daß seine Antenne tatsächlich nur in dem Kanal ihre beste Leistung zeigt, für den sie bemessen ist.

Nicht ganz so kritisch sind die Antennenabmessungen beim Ultrakurzwellenrundfunk. Auch zum UKW-Empfang benutzen wir abgestimmte Antennen. Sie sprechen aber nicht nur auf einen UKW-Sender gut an, sondern auf alle Stationen im Ultrakurzwellenrundfunkband. Das ist möglich, weil das UKW-Rundfunkband relativ schmal ist und das Verhältnis zwischen seiner niedrigsten zu seiner höchsten Frequenz nur etwa 1 : 1,145 beträgt.

Auf allen anderen Wellenbereichen bleibt die Antenne unabgestimmt. Sämtliche Sender rufen in ihr eine Wechselspannung hervor, die an den Empfänger weitergeleitet wird. Damit übernimmt die Antenne die Rolle des „Energiezubringers“, und dem Empfänger bleibt es überlassen, den gewünschten Sender herauszusuchen.

Die Auswahl ist Sache des Schwingungskreises, der damit zum unentbehrlichen Bestandteil auch jeden Empfängers wird. Seine Spule wird nahe an eine Spule im Antennenkreis gebracht. Jede an der Antennenkreisspule auftretende Spannung induziert auch



Spannungen an der Schwingkreisspule, doch erreichen nur Spannungen einer solchen Frequenz einen nennenswerten Betrag, die mit der Eigenfrequenz des Schwingungskreises übereinstimmen. Ist der Schwingungskreis auf 1000 kHz „abgestimmt“, ruft nur ein auf 1000 kHz arbeitender Sender eine merkliche Spannung am Schwingungskreis hervor (wenigstens wollen wir das vorerst annehmen), die Spannungen aller anderen Frequenzen bleiben unerheblich.

Damit wir verschiedene Stationen empfangen können, muß es möglich sein, die Eigenfrequenz des Schwingungskreises stetig einzustellen. In den meisten Empfängern verändert man zu diesem Zweck die Kapazität des Schwingkreiskondensators. Im „Drehkondensator“ gibt es zwei gegeneinander isolierte Plattenpakete. Das eine steht fest, das andere kann in das feststehende hineingeschwenkt werden, indem man am Abstimmknopf des Empfängers dreht. Durch das Schwenken ändern sich Platten-

abstand und damit die Kapazität. Man erreicht auf diese Weise Frequenzänderungen von etwa 1 : 3 bis 1 : 4. Wir können durch Verstellen des Drehkondensators zum Beispiel den Frequenzbereich von 500 bis 1500 kHz oder von 200 bis 600 kHz überstreichen. Welche Frequenz gerade eingestellt ist, kann man an der Empfängerskala ablesen.

Alle für den Rundfunkempfang interessanten Frequenzen sind mit einer Kondensatordrehung nicht zu erfassen. Das wäre auch ungünstig, weil dann die Sender sehr dicht zusammenrücken und das genaue Einstellen sehr schwierig würde.

Deshalb sind im Empfänger mehrere Wellenbereiche vorgesehen, die durch Drucktasten eingeschaltet werden. Beim Übergang auf einen anderen Wellenbereich wird eine Spule mit mehr oder weniger Windungen in den Schwingungskreis, den „Abstimmkreis“, geschaltet; der Drehkondensator bleibt unverändert.

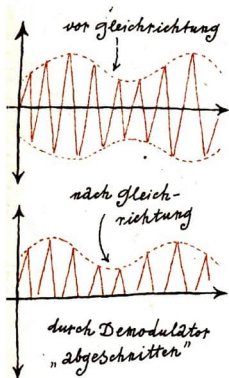
Ist der Schwingungskreis auf einen Sender abgestimmt, treten in ihm Spannungen und Ströme auf, die der Frequenz dieses Senders entsprechen. Ihre Amplituden ändern sich mit der Sendermodulation, beim Rundfunk also im Rhythmus der zu übertragenden Schallschwingungen.

Die Amplitudenschwankungen müssen in Schallschwingungen zurückverwandelt werden. Diese Umwandlung kann ein Fernhörer oder ein Lautsprecher übernehmen. Würden wir ihn an den Schwingungskreis anschließen, erlebten wir allerdings einen Mißerfolg; es wäre nichts zu hören.

Das Versagen ist leicht zu erklären. Eine Telefon- oder Lautsprechermembran ist zu träge, um den hochfrequenten Spannungs- und Stromschwankungen folgen zu können. Ehe die Membran auch nur begonnen hätte, sich nach der einen Seite zu bewegen, hätte schon die nächste, entgegengesetzt gerichtete Halbwelle begonnen. Stellen wir uns eine elastische Gummihaut vor, auf die von beiden Seiten ein ununterbrochener Hagel von Sandkörnern prasselt: Die Haut würde ihre Lage nicht verändern.

Der Vergleich gibt uns aber auch einen Hinweis, wie wir die Amplitudenänderungen zurückgewinnen können. Lassen wir die Sandkörner nur von einer Seite auftreffen, biegt sich die Membran nach der Gegenseite durch. Mehr noch: Geben wir den Sandkörnern einmal mehr, einmal weniger „Schwung“ mit auf den Weg, biegt sich die Membran schwächer oder stärker.

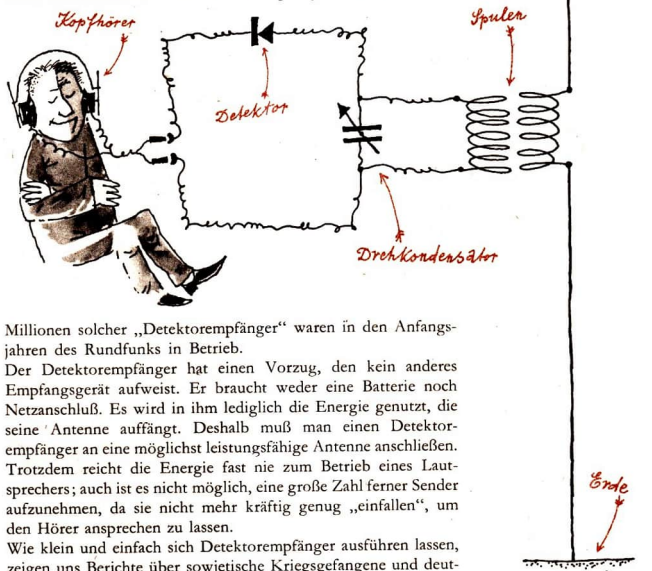
Übertragen wir dieses Bild auf den Schwingungskreis. Die Telefonmembran dürfte nur durch Stöße einer Richtung angeregt werden, dann würde sie sich durchbiegen, und die Durchbiegung müßte den Amplituden der Stromstöße folgen, die die Spulen des Telefonhörers durchfließen. Am einfachsten wäre es, den „unteren“ oder „oberen“ Teil der amplitudenmodulierten Schwingungen abzuschneiden oder vom Hörer abzusperrn. Von einer Wechselspannung die Halbwellen einer Richtung abzuschneiden



bedeutet aber nichts anderes als gleichrichten! Wir müssen zwischen Schwingungskreis und Telefonhörer einen „Empfangsgleichrichter“, einen „Demodulator“, einfügen.

Zur Empfangsgleichrichtung eignen sich Halbleiterspitzengleichrichter besonders gut. Ihr Aufbau unterscheidet sich etwas von dem des Halbleiterflächengleichrichters, den wir kennenlernten. Die Sperrschicht ist an die Oberfläche eines Germanium- oder Siliziumkristalls verlegt. Dort entsteht unter einer feinen, dem Kristall aufsitzenden Drahtspitze der gleichrichtende pn-Übergang. Der Gleichrichter läßt sich auf kleinstem Raum zusammendrängen und ist nicht größer als eine Kaffeebohne. Ein Vorläufer dieser heute weitverbreiteten „Spitzendiode“, der „Kristalldetektor“, war überhaupt der erste brauchbare Empfangsgleichrichter.

Mit einem Schwingungskreis, einem Empfangsgleichrichter und einem Telefonhörer – allgemein als „Kopfhörer“ ausgeführt – lassen sich tatsächlich einfache Funkempfänger zusammensetzen.



Millionen solcher „Detektorempfänger“ waren in den Anfangsjahren des Rundfunks in Betrieb.

Der Detektorempfänger hat einen Vorzug, den kein anderes Empfangsgerät aufweist. Er braucht weder eine Batterie noch Netzanschluß. Es wird in ihm lediglich die Energie genutzt, die seine Antenne auffängt. Deshalb muß man einen Detektorempfänger an eine möglichst leistungsfähige Antenne anschließen. Trotzdem reicht die Energie fast nie zum Betrieb eines Lautsprechers; auch ist es nicht möglich, eine große Zahl ferner Sender aufzunehmen, da sie nicht mehr kräftig genug „einfallen“, um den Hörer ansprechen zu lassen.

Wie klein und einfach sich Detektorempfänger ausführen lassen, zeigen uns Berichte über sowjetische Kriegsgefangene und deutsche Konzentrationslagerhäftlinge, denen es gelang, Detektorempfänger in den Sohlen von Holzschuhen zu verbergen und

so dem Zugriff der SS-Wachen zu entziehen. Oftmals bot hier der einfache Detektorempfänger die einzige Möglichkeit, Informationen über die Kriegslage und über das Vorrücken der Roten Armee zu erhalten.

... über das Rückkopplungsaudion

Bald genügte der Detektorempfänger den Ansprüchen der Rundfunkhörer nicht mehr. Sie wollten ihren Bewegungsradius nicht durch die Länge der Kopfhörschnüre begrenzt sehen und hatten den begreiflichen Wunsch, auch ferne Sender zu empfangen. Die Lautstärke konnte man erhöhen, indem man dem Detektorempfänger einen Tonfrequenzverstärker nachschaltete. Schon mit einer Röhre war guter Kopfhörerempfang zu erreichen. Entschied man sich aber für einen Verstärker mit zwei oder gar drei Röhren, konnte man die Kopfhörer weglassen und stattdessen einen der inzwischen erfundenen Lautsprecher anschließen. Mit dem „kostenlosen“ Rundfunkhören war es dann allerdings vorbei; denn die Verstärkerröhren benötigten eine Heizstrom- und eine Anodenspannungsquelle.

Die Einführung der Verstärkerröhre im Empfänger machte bald auch den Kristalldetektor überflüssig, mit dem es immer wieder Verdruß gegeben hatte. Besondere Berühmtheit erlangte das „Audion“, eine Schaltung, in der eine Röhre gleichzeitig als Empfangsgerichter und als Verstärker arbeitete. Der „Audionempfänger“, der zwei, drei oder auch vier Röhren enthielt, brachte bereits zahlreiche Sender in Zimmerlautstärke. Dabei zeigte sich allerdings bald, daß er des Guten ein wenig zuviel tat. Er „trennte“ die Sender nicht genügend scharf, und der Rundfunkhörer konnte neben dem Programm des gewünschten Senders im Hintergrund noch andere Stationen auf benachbarten Frequenzen mithören.

Ursache dieser unangenehmen Erscheinungen war, daß der Schwingungskreis in Wirklichkeit doch nicht nur auf den Kanal des eingestellten Senders anspricht und alle übrigen Kanäle restlos unterdrückt. Stets nimmt er noch etwas von dem mit auf, was sich auf den seiner Eigenfrequenz benachbarten Frequenzen abspielt. Bald bekam man heraus, daß die im Schwingungskreis auftretenden Verluste den Ärger mit der mangelnden „Trennschärfe“ verursachten.

Man fand eine Möglichkeit, die Schwingungskreisverluste zu kompensieren, indem man das gleiche Prinzip anwandte, das wir beim Sender kennenlernten. Die zugehörige Schaltung heißt „Rückkopplungsaudion“. Seine Erfindung war einer der entscheidendsten Meilensteine der Funktechnik. Sie wurde dem deutschen Physiker Alexander Meißner im Jahre 1913 patentiert. Wir können die Wirkungsweise des Rückkopplungsaudions nur andeuten. Um die Schwingungsverluste auszugleichen, wird ein



Teil der von der Röhre verstärkten Spannung noch einmal an den Schwingungskreis zurückgeführt. Dieser Teil wird so bemessen, daß die Verluste gerade kompensiert werden. Es kommt dabei auf genaue Dosierung an. Ist die rückgekoppelte Spannung nur um eine Kleinigkeit zu groß, wird das Rückkopplungsaudion zum Sender, der seinerseits Energie an die Antenne abgibt. Ihre Frequenz stimmt mit der Frequenz des Senders überein, auf den der Abstimmkreis gerade eingestellt ist. Dadurch wird nicht nur der eigene, sondern auch der Empfang im näheren Umkreis unerträglich gestört. Älteren Rundfunkhörern wird dieses „Rückkopplungspfeifen“ noch in unangenehmer Erinnerung sein.

Mit dem Rückkopplungsaudion gelang es, trennscharfe und hochempfindliche Empfänger zu bauen. Noch heute verdienen sich die meisten Radioamateure ihre ersten Sporen mit dem Bau eines Rückkopplungsaudions.

Noch bessere Empfangsergebnisse erzielt man, wenn dem Rückkopplungsaudion nicht nur ein Tonfrequenzverstärker nachgeschaltet wird, sondern wenn man ihm noch einen „Hochfrequenzverstärker“ vorsetzt. Es ist ein Verstärker, der die von der Antenne stammenden Hochfrequenzspannungen vor ihrer Gleichrichtung verstärkt. Er enthält gleichfalls Schwingungskreise, die auf den zu empfangenden Sender eingestellt werden. Das erschwert die Bedienung. Denn um einen Sender einzustellen, müssen drei oder vier Abstimmkreise verstellt werden. Anfänglich, besaß jeder Schwingungskreis einen eigenen Abstimmknopf, und das genaue Einstellen eines Senders auf das Maximum an Lautstärke und Wiedergabequalität war fast eine Wissenschaft für sich. Später lernte man, die Drehkondensatoren der Abstimmkreise auf *eine* Achse zu setzen und mit *einem* Knopf einzustellen. Dabei trat oft eine neue, unangenehme Erscheinung auf: Die Schwingungskreise beeinflussten sich gegenseitig in unerwünschter Weise; der Empfänger begann zu heulen und zu pfeifen und verseuchte die Nachbarschaft mit seinen „Störwellen“. Man hat viel Mühe darauf verwandt, diese „Selbsterregung“ auszuschließen, doch wirklich befriedigende Resultate erzielte man nicht.



... zum Super

In einem modernen Rundfunkempfänger gibt es keinen Bedienungsknopf für die Rückkopplung, kein Pfeifen und keine Schwierigkeiten beim Einstellen; denn alle gegenwärtig produzierten Geräte sind „Überlagerungsempfänger“, „Superheterodyneempfänger“ oder kurz „Super“.

So kompliziert wie der Name, scheint, wenigstens auf den ersten Blick, das Arbeitsprinzip des Supers zu sein. Die von der Antenne kommenden Hochfrequenzspannungen werden nicht sofort ver-

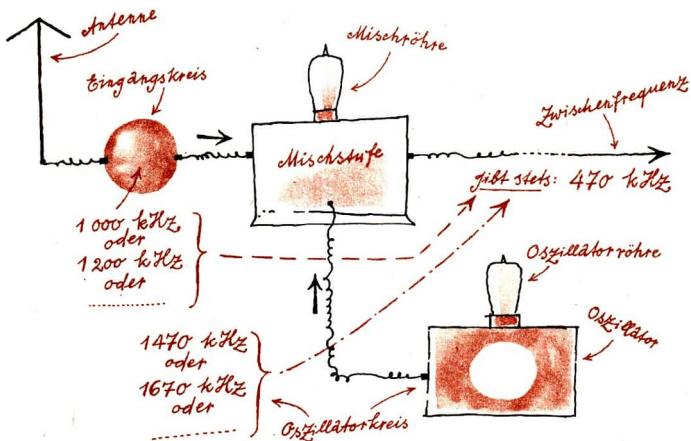
stärkt und dem Empfangsgleichrichter zugeleitet, sondern zunächst in Hochfrequenzspannungen niedrigerer Frequenz, in die sogenannte Zwischenfrequenz, verwandelt. Dabei wird immer die gleiche Zwischenfrequenz benutzt, unabhängig davon, auf welchen Sender man das Empfangsgerät abstimmt. Ist eine Zwischenfrequenz von 470 kHz vorgesehen, spielt es keine Rolle, ob wir einen auf 1500, 10 000 oder 15 000 kHz arbeitenden Sender empfangen. Immer wird seine Frequenz in die Zwischenfrequenz von 470 kHz umgewandelt, und allein diese Frequenz wird dann weiter „verarbeitet“. Beim UKW-Empfang werden in ähnlicher Weise alle Empfangsfrequenzen erst in eine Zwischenfrequenz von 10,7 MHz umgesetzt.

Dieser Umweg ist nötig. Man hatte erfahren müssen, daß eine Hochfrequenzverstärkung zwar viele Vorteile mit sich bringt, daß diese Vorteile aber wegen Schwierigkeiten beim Aufbau und bei der Bedienung der Empfänger nicht voll genutzt werden können. Im Super umgeht man diese Problematik dadurch, daß der Hochfrequenzverstärker – der hier allerdings Zwischenfrequenzverstärker heißt – nur auf *eine* Frequenz eingestellt wird und bleibt. Er läßt sich so konstruieren, daß er bei dieser Frequenz tatsächlich das Optimum an Leistung hergibt. Seine Schwingungskreise können, da man nicht mit Drehkondensatoren verschiedene Frequenzen einzustellen braucht, sehr eng zusammengebaut werden und lassen sich so „abschirmen“, daß Beeinflussungen anderer Schwingungskreise mit Sicherheit vermieden werden. Außerdem wird aus Gründen, die wir nicht untersuchen wollen, durch die Anwendung des Superhetprinzips die Trennschärfe erheblich gesteigert.

Wir können einen Super als Empfänger ansehen, der auf eine feste Frequenz abgestimmt ist und dem eine Stufe vorgesetzt wurde, in der alle anderen Frequenzen in diese feste Frequenz umgewandelt werden. Diese Stufe heißt „Mischstufe“. Um nämlich die Zwischenfrequenz zu erhalten, muß die Frequenz des zu empfangenden Senders – man nennt sie „Eingangsfrequenz“ – mit einer zweiten Hochfrequenzschwingung gemischt werden. Diese Hilfsfrequenz wird in einem kleinen Röhrengenerator erzeugt, dem „Oszillator“. Durch das Mischen von Eingangs- und Oszillatorfrequenz entsteht die gewünschte Zwischenfrequenz, die dann im Gerät weiterverarbeitet wird.

Wir finden daher in jeder Mischstufe zwei Abstimmkreise: den „Eingangskreis“, mit dem wir uns einen Sender herausuchen, und den „Oszillatorkreis“, der so eingestellt werden muß, daß die Oszillatorfrequenz sich mit der Eingangsfrequenz zur Zwischenfrequenz mischt. Die beiden Schwingungskreise der Mischstufe werden stets gemeinsam bedient. Deshalb sind im Super zwei Drehkondensatoren vorgesehen, die auf einer gemeinsamen Achse sitzen und beim Abstimmen verstellt werden.

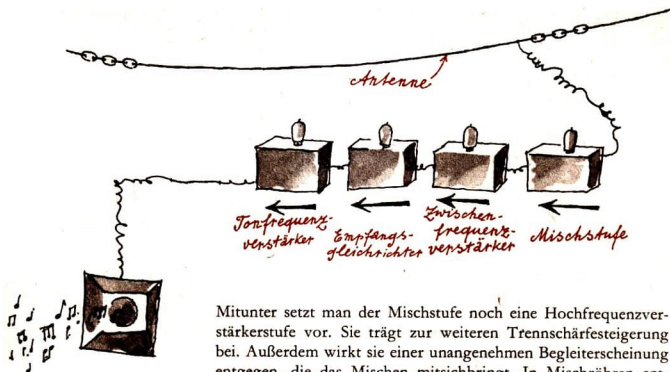
Eigentlich brauchte man in der Mischstufe eine Röhre, die das



Mischen übernimmt, und eine weitere, die die Oszillatorfrequenz erzeugt. Wegen der weiten Verbreitung des Supers hat man aber spezielle Mischröhren geschaffen, in deren Kolben zwei Röhrensysteme untergebracht sind; das eine mischt, das andere erzeugt die Oszillatorfrequenz.

Der Mischstufe folgt der Zwischenfrequenzverstärker. Seine Schwingungskreise werden vom Herstellerbetrieb auf die Zwischenfrequenz eingestellt und können vom Rundfunkhörer nicht abgestimmt werden. Bereits in kleinen Supern gibt es im Zwischenfrequenzverstärker vier Schwingungskreise, in großen Geräten finden wir fünf, sechs oder gar sieben. Auch die Anzahl der Röhren des Zwischenfrequenzverstärkers schwankt. In vielen Fällen begnügt man sich mit einer Röhre, doch oft stattet man den Zwischenfrequenzverstärker auch mit zwei Röhren aus.

Im Zwischenfrequenzverstärker wird ein hoher Verstärkungsgrad erreicht, die Schwingungskreise sichern eine große Trennschärfe. Deshalb kann man im anschließenden Empfangsgleichrichter auf eine Rückkopplung verzichten. Zur Empfangsgerichtung werden Röhrendioden oder Halbleiter-Spitzendioden verwendet. Sie „demodulieren“ die Zwischenfrequenz und liefern damit die Tonfrequenz, die anschließend nochmals verstärkt und dann den Lautsprechern zugeführt wird. Auch der Empfangsgleichrichter enthält keine Bauelemente, die beim Abstimmen auf einen Sender bedient werden müssen.



Mitunter setzt man der Mischstufe noch eine Hochfrequenzverstärkerstufe vor. Sie trägt zur weiteren Trennschärfesteigerung bei. Außerdem wirkt sie einer unangenehmen Begleiterscheinung entgegen, die das Mischen mit sich bringt. In Mischröhren entsteht ein gewisses „Rauschen“. Es macht sich beim Empfang kräftig einfallender Sender nicht bemerkbar, kann aber beim Empfang leiser Stationen, besonders im Kurzwellenbereich, stören oder dazu führen, daß leise Stationen im Rauschen „versinken“. Eine Hochfrequenzverstärkerstufe vor der Mischröhre dagegen hebt auch leise Stationen so weit an, daß sie aus dem Rauschen genügend weit herausragen.

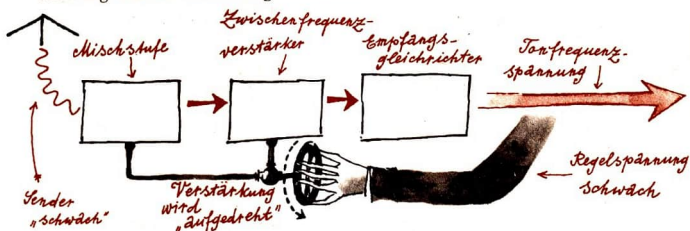
Aus vielerlei technischen Gründen ist Ultrakurzwellenempfang mit der normalen Mischstufe nur schlecht möglich. Auch die für den Empfang auf den anderen Bereichen übliche Zwischenfrequenz und der Empfangsgleichrichter sind für Ultrakurzwellenempfang nicht geeignet. Wir schalten daher, wenn wir die UKW-Taste eines Supers drücken, fast einen zweiten Empfänger ein. Er enthält eine spezielle Ultrakurzwellenmischstufe, einen auf einer anderen Frequenz arbeitenden Zwischenfrequenzverstärker und einen Empfangsgleichrichter, der speziell für die Demodulation frequenzmodulierter Sendungen eingerichtet ist. Nur der Tonfrequenzverstärker wird mitbenutzt. Die großen Vorzüge des Ultrakurzwellenempfanges wiegen diesen höheren technischen Aufwand weit auf.

Der Empfänger bekommt Niveau

Selbst am kleinsten Taschenempfänger finden wir einen Knopf, mit dem wir die Lautstärke verändern können. Hinter diesem Knopf sitzt ein veränderlicher Widerstand, an dem wir beim Regulieren einen größeren oder kleineren Teil der Tonfrequenzspannung abgreifen, um sie anschließend weiter zu verstärken. Wir sind es gewohnt, die Lautstärke einmal einzustellen und den

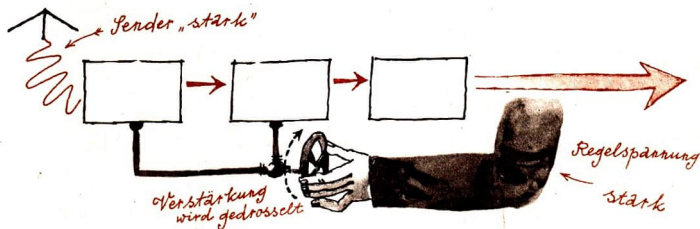
Lautstärkereger dann für die Dauer eines Programms unverändert zu lassen. Dabei müßten wir in der Zwischenzeit sicherlich oft den bequemen Sessel verlassen, wenn es im Empfänger nicht eine sinnreiche Automatik gäbe, die „automatische Lautstärkeregelung“ oder den „Schwundausgleich“.

Die Lautstärke, mit der wir ein Programm hören, hängt nicht allein vom Empfänger ab. Zwischen Sender und Empfänger liegt der Übertragungsweg, und durch vielerlei Einflüsse werden die elektromagnetischen Wellen fortwährend mehr oder weniger geschwächt. Die automatische Lautstärkeregelung gleicht den größten Teil der dadurch verursachten Lautstärkeschwankungen selbsttätig aus. Sie arbeitet folgendermaßen:



Die Spannung, die der Empfangsgleichrichter abgibt, die Tonfrequenzspannung, ist im Mittel um so größer, je kräftiger ein Sender einfällt. Von dieser Spannung wird ein Teil als „Regelspannung“ abgezweigt. Die der Tonfrequenz entsprechenden Schwankungen werden „eingeebnet“, so daß eine Regelspannung zur Verfügung steht, deren Größe der mittleren Spannung am Empfangsgleichrichter entspricht. Ein stark einfallender Sender ruft eine hohe, ein schwach einfallender eine niedrige Regelspannung hervor.

Die Regelspannung wird an die Röhren vor dem Empfangsgleichrichter, also zum Zwischenfrequenzverstärker und zur Mischstufe zurückgeführt und steuert deren Verstärkung. Bei



großer Regelspannung, also bei stark einfallenden Sendern, wird der Verstärkungsgrad der Röhren durch die Regelspannung vermindert, bei geringer Regelspannung, also bei schwach einfallenden Sendern, werden die Röhren voll ausgenutzt. Jede Lautstärkeänderung wird so durch eine entsprechende Änderung von Regelspannung und Verstärkungsgrad kompensiert.

Das genaue Abstimmen ist nicht jedermanns Sache. Besonders beim Ultrakurzwellenempfang kann es leicht vorkommen, daß man mit der Abstimmung ein wenig neben die Sendefrequenz gerät. In den meisten größeren Empfängern ist daher eine „Abstimmanzeigeröhre“, ein „magisches Auge“, eine „magische Waage“ oder ein „magischer Strich“ vorgesehen, die uns nicht im Zweifel darüber lassen, ob wir exakt abgestimmt haben oder nicht. Zur Abstimmmanzeige benutzen wir wiederum die Regelspannung, die Lautstärkeschwankungen ausgleicht. Diese Spannung ist naturgemäß dann am größten, wenn wir genau auf einen Sender eingestellt haben; sie sinkt, wenn die Einstellung der Empfänger-schwingungskreise von der Sendefrequenz abweicht. Mit dieser Regelspannung blenden wir in der Abstimmmanzeigeröhre einen Elektronenstrahl mehr oder weniger ab. Der Rest des Strahls bringt einen kleinen Bildschirm zum Aufleuchten. Bei genauer Abstimmung ist der leuchtende Teil am größten.

Schließlich gibt es noch die „automatische Scharfabstimmung“, bei der – ebenfalls mit Hilfe einer Regelspannung – ein Empfänger selbsttätig genau eingestellt wird. Sie ist besonders für den Ultrakurzwellen- und Fernsehempfang von Nutzen. Es kommt nämlich vor, daß sich der Empfänger im Betrieb durch seine Eigen-erwärmung oder auch durch Netzspannungsschwankungen von selbst geringfügig verstimmt. Diese Abstimmungsschwankungen fängt die automatische Scharfabstimmung auf.

Wir brauchen also nicht unbedingt Industriebetriebe aufzusuchen, um auf Regeleinrichtungen zu stoßen. Wir finden sie bereits im Rundfunkgerät, und dort waren sie teilweise sogar schon zu einer Zeit anzutreffen, als es sie in der Industrie erst selten gab.

Es zeigte sich, daß ein Tonfrequenzverstärker nicht alle Tonfrequenzen gleichmäßig überträgt. Am leichtesten kann er Töne mittlerer Höhe verstärken, während die Verstärkung der tiefen und besonders der sehr hohen Töne abfällt. Dadurch geht viel von der Tonfülle einer Musikübertragung verloren. Doch bald fanden die Techniker eine Abhilfe in der „Gegenkopplung“. Sie ist ein wahres Zaubermittel. Durch Einbau weniger, billiger Bauelemente lassen sich bestimmte Frequenzbereiche besonders gut verstärken oder auch bewußt benachteiligen. Man kann den Verstärkungsabfall nach tiefen oder hohen Tönen ausgleichen, man kann den „Frequenzgang“ des Verstärkers so beeinflussen, daß Sprache besonders deutlich wiedergegeben wird oder bei einem Orchesterkonzert die wichtigen Bässe bevorzugt werden,



man kann für Tanzmusik oder Jazz einen betont „hellen“ Klang hervorrufen.

Meistens läßt man dem Rundfunkhörer selbst die Möglichkeit, die Tonwiedergabe persönlichen Wünschen anzupassen. Wir finden einen „Tiefenregler“ für die Bässe, einen „Höhenregler“ für die Diskantlagen und oftmals „Klangregistertasten“, mit denen wir ein uns besonders zusagendes Klangbild einstellen können.

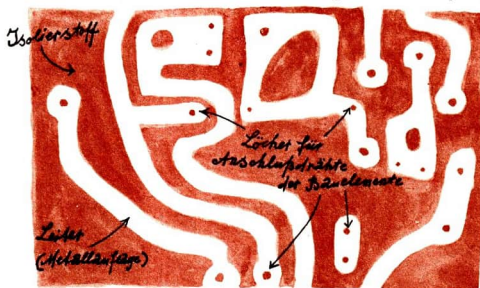
Der Verbesserung des Klangeindrucks dient auch, daß heute größere Empfänger mehrere Lautsprecher enthalten. Neben dem großen „Konzertlautsprecher“, der den Hauptteil der Schallabstrahlung übernimmt, finden wir den kleinen „Hochtonlautsprecher“ und oft noch Lautsprecher, die so angeordnet sind, daß ein „räumlicher“ Schalleindruck entsteht. Man verstärkt ihn dadurch, daß man in manchen Spitzengeräten einen künstlichen „Nachhall“ erzeugt, wie er für die Wiedergabe eines Orchesters in großen Räumen charakteristisch ist.

Alles das sind allerdings eigentlich „Mogeleien“, die uns vergessen machen möchten, daß der Schall von relativ kleinen Lautsprechern, nicht aber von den über eine große Fläche verteilten Instrumenten eines Orchesters ausgestrahlt wird. Um den räumlichen Charakter eines Konzerts wirklich wiederzugeben, ist höherer technischer Aufwand erforderlich. „Stereoübertragungen“, wie man diese Art der Wiedergabe nennt, sind daher für Rundfunksendungen noch nicht eingeführt worden, obwohl in fast allen Ländern entsprechende Versuche angestellt werden. Bei der Wiedergabe von Schallplatten mit dem Plattenspieler dagegen hat das Stereoverfahren bereits zahlreiche Freunde gefunden. Alle neuen Großgeräte aus der Produktion unserer Republik sind für Stereo-Schallplattenwiedergabe eingerichtet. So viele Schaltungsvarianten und Ausführungsformen im Laufe der Zeit auch entstanden, an der Fertigung der Rundfunkempfänger änderte sich lange Jahre hindurch herzlich wenig. Im Grunde entstanden die Empfänger in den Industriebetrieben nicht viel anders als in der Werkstatt des Amateurs: Stück für Stück wurden die Bauelemente auf das Chassis des zukünftigen Empfängers montiert, während kleinere Bauteile nur an ihren Anschlußdrähten hingen. Drahtverbindungen, manchmal Hunderte, verbanden die Bauelemente miteinander und mußten einzeln gelötet werden. Die Herstellung eines Empfängers dauerte lange und schloß zahlreiche Fehlerquellen ein, etwa durch nicht ganz einwandfreie Lötstellen.

Dabei ist gerade ein Rundfunkgerät wie dazu geschaffen, nicht Stückchen um Stückchen, sondern aus mehreren größeren Bausteinen zusammengesetzt zu werden. In einem Super kehren immer die gleichen Baugruppen mit den gleichen Funktionen wieder, und die inneren Unterschiede der Empfänger sind oftmals viel geringer als die äußerlich sichtbaren.

Erst seit wenigen Jahren setzt sich auch in der Rundfunkindustrie

die „Baukastenmethode“ durch. Es begann damit, daß man „UKW-Bausteine“ schuf, Mischstufen für den Ultrakurzwellenempfang, die in vielen Empfängertypen verwendet werden konnten. Andere standardisierte Bausteine, wie Zwischenfrequenzverstärker oder Empfangsgleichrichter, folgten. Die Fertigung von Rundfunkempfängern wird dadurch schon bedeutend rationeller. Die Bausteine können auf Taktstraßen gleichzeitig hergestellt und geprüft werden, die Endmontage, die endgültige Einstellung und Prüfung des Empfängers werden vereinfacht. Die Reparaturzeiten verkürzen sich, denn es genügt, bei einem Defekt zunächst den ausgefallenen Baustein zu wechseln und die Suche nach dem nicht mehr arbeitenden Bauelement auf einen späteren Zeitpunkt zu verschieben. Sogar für Bastler werden heute bereits solche Bausteine angeboten. Sie wurden von unserer volkseigenen Industrie entwickelt, und man kann aus ihnen die verschiedenartigsten Schaltungen für Rundfunkempfänger und elektronische Geräte zusammenstellen. Innerhalb des einzelnen Bausteins herrschte allerdings zunächst noch die übliche Bauweise vor, bei der jedes Bauelement für sich eingesetzt, jede Drahtverbindung für sich verlötet werden mußte. Eine automatische Fertigung war daher ausgeschlossen. Eine radikale Abkehr von dieser Bauweise ist die Technik der „gedruckten Schaltungen“. Bei ihr wird nicht mehr Leitungszug um Leitungszug hergestellt, sondern das Schaltschema des Bausteins wird – zunächst ohne Bauelemente – auf eine mit einer dünnen Schicht aus Leitermaterial belegten Isolierstoffplatte



gedruckt. Die Druckfarbe ist säurefest. In den anschließenden Arbeitsgängen wird die Leiterplatte Chemikalien ausgesetzt, die das Leitermaterial wieder wegätzen. Dabei bleiben nur die durch Farbe geschützten Leiterzüge stehen. Sie liegen frei, sobald auch die Druckfarbe wieder entfernt wurde.

In diese Leiterplatte setzen Bestückungsmaschinen die Bauelemente wie Widerstände, Kondensatoren usw. ein. Ihre An-

schlußdrähte werden zu diesem Zweck in vorgebohrte, in genormten Abständen liegende Löcher eingeführt. Die fertig bestückte Leiterplatte sieht so aus, daß wir auf ihrer unbedruckten Seite sämtliche Bauelemente, auf der bedruckten dagegen die Leitungszüge und die durch die Platte ragenden Anschlußdrähte der Bauelemente sehen. Die Drähte werden maschinell verkürzt und umgebogen. Durch Eintauchen in ein Lötbad wird die ganze Leiterplatte mit sämtlichen Verbindungen in einem Arbeitsgang gelötet.

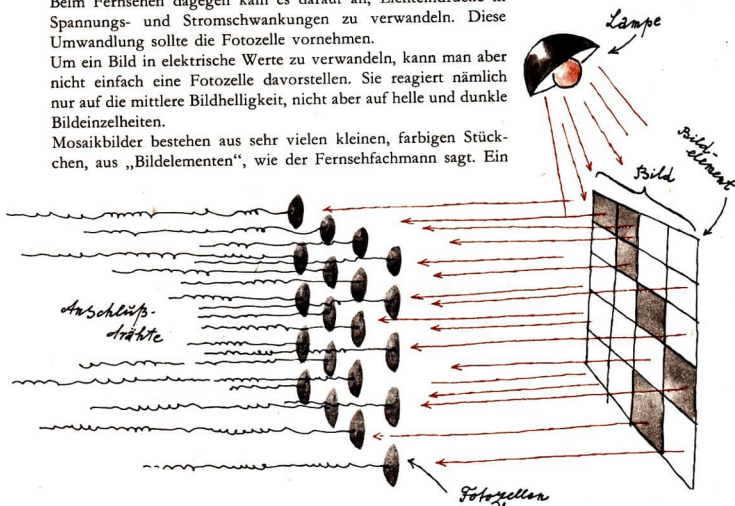
SEHEN WIR FERN!

Stückchen für Stückchen

Richtige Techniker sind niemals mit dem Erreichten zufrieden. Kaum gab es Fernsprecher, hieß es: Wir wollen in die Ferne sehen. Von vornherein stand fest, daß auch für die Fernübertragung von Bildern nur die Elektrizität als Transportmittel in Frage kam. Doch wie weiter? Beim Fernsprechen mußten Schalleindrücke in Spannungs- und Stromänderungen umgesetzt werden; technisches Hilfsmittel hierfür war das Mikrophon. Beim Fernsehen dagegen kam es darauf an, Lichteindrücke in Spannungs- und Stromschwankungen zu verwandeln. Diese Umwandlung sollte die Fotozelle vornehmen.

Um ein Bild in elektrische Werte zu verwandeln, kann man aber nicht einfach eine Fotozelle davorstellen. Sie reagiert nämlich nur auf die mittlere Bildhelligkeit, nicht aber auf helle und dunkle Bildeinzelheiten.

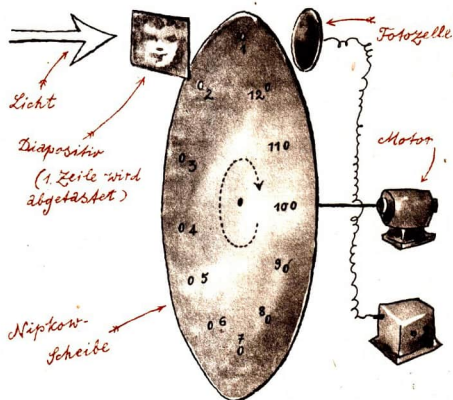
Mosaikbilder bestehen aus sehr vielen kleinen, farbigen Stückchen, aus „Bildelementen“, wie der Fernsehfachmann sagt. Ein



Zeitungsbild, ein Farbdruck und jede Fotografie lösen sich unter der Lupe in zahllose farbige, schwarze, weiße oder graue Fleckchen auf. Ersetzen wir die einzelne Fotozelle durch eine Vielzahl von Zellen, wobei vor jedem Bildelement eine Zelle angebracht sei, so ist tatsächlich eine Fernübertragung des Bildes möglich; denn jede Zelle meldet nur die Beleuchtungsstärke „ihres“ Bildelements. Praktisch ist dieses Verfahren leider nicht brauchbar. Selbst ein kleines Zeitungsbild besteht aus Tausenden einzelner Bildelemente. Wir brauchen dementsprechend viele Fotozellen und Verbindungsleitungen zum Empfänger, das heißt dorthin, wo die Strom- und Spannungswerte wieder in das Bild zurückverwandelt werden sollen. Die gleichzeitige Übertragung der Helligkeitswerte vieler einzelner Bildelemente ist demnach nicht möglich. Doch es geht auch anders. Ein Mosaikbild kann, wenn es seinen Platz verändern soll, stückchenweise, Bildelement für Bildelement, nacheinander zerlegt und in der gleichen Reihenfolge am neuen Ort wieder zusammengefügt werden. Ebenso verfährt man beim Fernsehen. Die Helligkeitswerte werden nacheinander „abgetastet“, übertragen, am Empfangsort in Bildelemente zurückverwandelt und wieder zusammengesetzt.

Unser Auge hat gegen diese Methode nichts einzuwenden. Es ist „träge“, jeder Lichteindruck wirkt rund eine Zehntelsekunde nach. Wird daher das Aufbauen des Bildes in weniger als einer Zehntelsekunde erledigt, sehen wir keine einzelnen Bildelemente nacheinander aufleuchten, sondern erblicken das ganze Bild auf einmal.

Eines der ersten technisch brauchbaren Mittel für die Bildzerlegung und den Bildaufbau war die „Nipkowscheibe“ (Paul



Nipkow, 1860–1940). Es ist eine runde, von einem Elektromotor gedrehte Platte, in die eine aus vielen Löchern bestehende Spiralwindung eingearbeitet ist. Die Löcher sind gerade so groß, daß das erste Loch die oberste „Bildzeile“, einen Streifen von der Breite eines Bildelements, abtastet, das zweite, das um Lochbreite zum Scheibenmittelpunkt versetzt ist, die zweite Bildzeile, das nächste die dritte usw. In Zeilenrichtung sind die Lochabstände so bemessen, daß das zweite Loch seine Zeile gerade beginnt, wenn das erste Loch die oberste Zeile beendet hat. Das dritte Loch fängt seine Zeile an, nachdem die zweite erledigt wurde. Bei einer vollständigen Umdrehung der Scheibe wird demnach das ganze Bild Zeile für Zeile abgetastet, wobei nacheinander jedes Bildelement der Fotozelle seine Helligkeit „mitteilt“. Übrigens haben Sie soeben gleichfalls abgetastet; denn Sie lesen jede Buchseite auch Wort für Wort und Zeile für Zeile.

Die von der Fotozelle gelieferten Spannungs- und Stromstärkeschwankungen können verstärkt werden und durch Kabel oder von einem Sender zum Empfänger übermittelt werden.

Im Empfänger könnte man gleichfalls eine Nipkowscheibe verwenden. An die Stelle der Fotozelle müßte eine Lichtquelle treten, die Strom- und Spannungsänderungen in Helligkeitsschwankungen umsetzt. Dieses Licht könnte, wenn es durch die Löcher der Nipkowscheibe fiel, auf einer Mattglasplatte eine Kopie des beim Sender abgetasteten Bildes erzeugen.

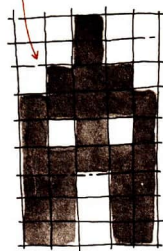
Die Bildübertragung mit Nipkowscheibe gab nur ein kurzes Gastspiel in der Fernsehtechnik. Beim Sender verschwand sie bereits nach wenigen Jahren wieder, beim Empfänger konnte sie sich überhaupt nicht durchsetzen. Einige der Ursachen dafür werden wir verstehen, sobald wir überlegen, welche Forderungen an die Qualität eines Fernsehbildes zu stellen sind.

Beginnen wir mit der Bildgröße. Sie ist nicht ganz so wichtig, wie einst viele Fernsehfreunde meinten; denn auch das größte Bild enthält nicht mehr Bildelemente, als beim Sender abgetastet wurden, und gibt, wie eine fotografische Vergrößerung, nur solche Einzelheiten wieder, die ursprünglich auch aufgenommen wurden. Immerhin muß man schon deswegen eine Mindestbildgröße einhalten, weil niemand das Fernsehbild durch die Lupe betrachten möchte und sich meistens mehrere Zuschauer vor dem Bildschirm einfinden. Bei unseren heutigen Fernsehempfängern ist die Bildgröße nicht mehr problematisch; bei Verwendung einer Nipkowscheibe aber wäre sie *das* Problem. Wenn Sie sich die Skizze noch einmal ansehen, können Sie selbst abschätzen, wie groß eine Nipkowscheibe sein müßte, um ein Bild des heute üblichen Formats zu erzeugen.

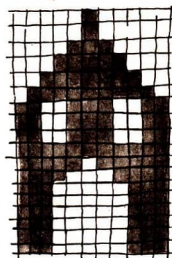
Ein Fernsehbild gibt um so mehr Einzelheiten wieder, in je mehr Bildelemente es zerlegt wird. Man muß also mit einer möglichst hohen Zeilenzahl arbeiten. Hierbei allerdings heißt es einen Kompromiß schließen: Für den Fernsehzuschauer ist es um so



Original



Zerlegung in 9 Zeilen



Zerlegung in 18 Zeilen

günstiger, je größer die Zeilenzahl ist; dem Techniker bereitet jede Erhöhung der Zeilenzahl vermehrte Schwierigkeiten. Man traf sich in der Mitte und legte eine Zeilenzahl fest, die eine gute Bildqualität trotz erträglichen technischen Aufwandes sichert: In den meisten europäischen Ländern wird das Fernsehbild in 625 Zeilen zerlegt.

Wir sind noch nicht am Ende! Beim Fernsehen will man wie beim Film „lebende Bilder“ sehen. Um das zu erreichen, greift man auf den gleichen Kniff wie beim Kino zurück. Dem Auge werden in schneller Folge Einzelbilder vorgeführt, beim Fernsehen 25 in jeder Sekunde, die sich voneinander jeweils durch geringe Stellungsänderungen aller bewegten Objekte unterscheiden. Das menschliche Auge macht daraus *ein* Bild, das sich zu bewegen scheint. Eine metergroße Nipkowscheibe, die in jeder Sekunde 25mal umläuft – die Erfüllung dieser Forderung würde zu ungestalten und unerschwinglichen Fernsehgeräten führen. Viele andere Fragen konnten mit Hilfe der Nipkowscheibe ebenfalls nicht gelöst werden, und so gab man die Versuche mit ihr bald wieder auf.

Doch seien wir nicht undankbar! Die Nipkowscheibe hat die ersten wirklichen Fernsehübertragungen ermöglicht. Ihr Arbeitsprinzip, die zeilenweise Bildzerlegung, der zeilenweise Bildaufbau beim Empfänger, bildet die Grundlage jeder Fernsehübertragung – auch wenn die mechanischen Methoden der Bildzerlegung und des Bildaufbaus durch elektronische Hilfsmittel ersetzt wurden.

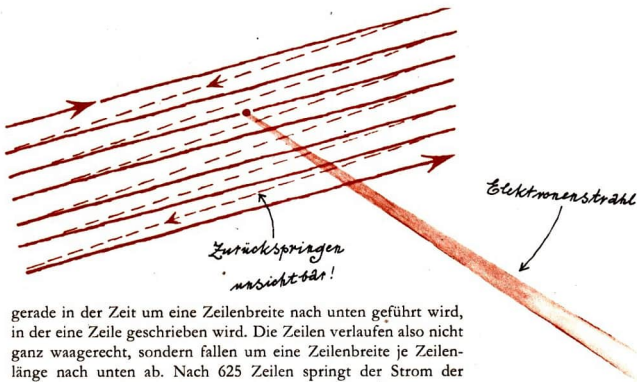
Wäre die Braunsche Röhre nicht . . .

Wäre die Katodenstrahlröhre nicht von Ferdinand Braun erfunden und seitdem von Wissenschaftlern und Technikern immer wieder verbessert worden – wer weiß, ob wir heute schon einen Fernschempfänger unser eigen nennen könnten.

Die Bildröhre ist den Aufgaben des Fernsehens besonders angepaßt. Ihr Schirm leuchtet nahezu weiß und wird so geformt, daß ein rechteckiges Bild auf ihm Platz findet. Der Elektronenstrahl wird magnetisch abgelenkt, das heißt durch Spulen, die von außen über den Röhrenhals greifen.

Auch beim Fernsehen verwendet man zur Ablenkung des Elektronenstrahls „Sägezahnströme“, die den Elektronenstrahl gleichmäßig schnell über den Schirm führen, vom Ende möglichst schnell an den Anfang zurückspringen lassen und so „Zeilen“ schreiben (s. S. 178).

Beim Fernsehen müssen 625 Zeilen *untereinander* geschrieben werden. Nach dem Zurückspringen muß der Elektronenstrahl eine Zeile tiefer zu schreiben beginnen. Wir erreichen das mit den Spulen, die den Elektronenstrahl in vertikaler Richtung ablenken. In diesen Spulen fließt ebenfalls ein Sägezahnstrom. Seine Frequenz wird so eingestellt, daß der Elektronenstrahl



gerade in der Zeit um eine Zeilenbreite nach unten geführt wird, in der eine Zeile geschrieben wird. Die Zeilen verlaufen also nicht ganz waagrecht, sondern fallen um eine Zeilenbreite je Zeilenlänge nach unten ab. Nach 625 Zeilen springt der Strom der „Vertikalablenkung“ auf seinen Anfangswert; der Leuchtfleck wird, da gleichzeitig auch die „Zeilenablenkung“ den Strahl nach links führt, in die linke obere Bildecke zurückgestellt und kann das nächste Bild beginnen. Das alles geht dermaßen schnell, daß unser Auge eine leuchtende Fläche sieht.

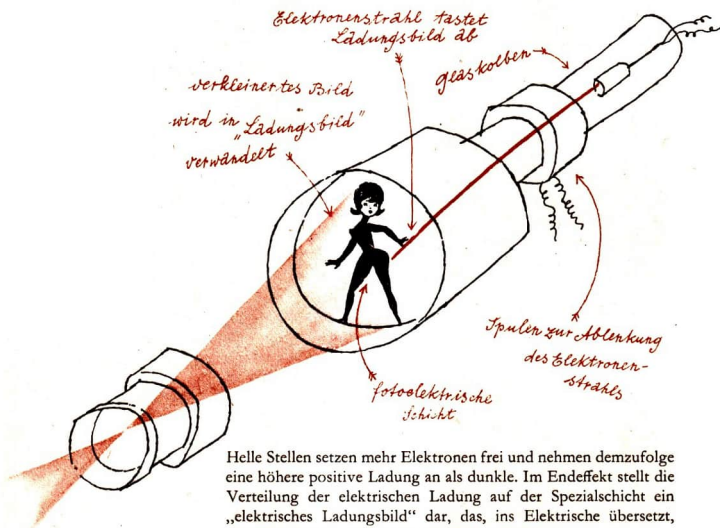
Freilich will man keine helle Fläche, sondern ein Bild sehen. Das heißt, Elektronenstrahl und Leuchtfleck müssen im Takte der Helligkeit der einzelnen Bildelemente gesteuert werden. Bei einem hellen Bildelement ist der Elektronenstrahl durchzulassen, bei einem dunklen dagegen „abzudrosseln“. Die entsprechenden „Bildsignale“ kommen vom Sender. Die Ausführung der Kommandos obliegt dem „Wehneltzylinder“ (Arthur Wehnelt, 1871–1944), einem kleinen „Töpfchen“ mit durchbohrtem Boden, das die Elektronen nach Verlassen der Katode passieren müssen.

Der Wehneltzylinder ist gegenüber der Katode negativ. Infolgedessen stößt er die Elektronen mehr oder weniger ab. Ist die (negative) Spannung genügend hoch, wird der Elektronenstrahl völlig unterbunden. Die Stelle des Bildschirms, die er gerade getroffen hätte, bleibt dunkel. Ist die negative Spannung dagegen gering, erreichen die Elektronen den Bildschirm nahezu ungehindert. Die entsprechenden Stellen werden hell. Wir können den Wehneltzylinder demnach mit dem Steuergitter einer Verstärkerröhre vergleichen. Arbeiten die zeilenweise Ablenkung des Strahls und die Helligkeitssteuerung pünktlich zusammen, entsteht das Fernsehbild.

Auch im Sender ist die Nipkowscheibe elektronischen Abtastmethoden gewichen. Die „Bildfängerröhren“, wichtigste Bestandteile jeder Fernsehkamera, sind sehr kompliziert und stellen

eine Meisterleistung an Präzision und Beherrschung verwickelter technologischer Prozesse dar. Es würde zu weit führen, diese Röhren im einzelnen zu beschreiben. Begnügen wir uns daher mit der Kenntnis des allen Bildfängerröhren gemeinsamen Arbeitsprinzips.

Von einem Linsensystem, das sich nicht von dem einer Filmkamera unterscheidet, wird auf einer Spezialschicht im Inneren der Bildfängerröhre ein verkleinertes optisches Bild der aufzunehmenden Szene entworfen. Die Schicht lädt sich unter der Lichteinwirkung elektrisch auf, indem sie Elektronen abgibt.



Helle Stellen setzen mehr Elektronen frei und nehmen demzufolge eine höhere positive Ladung an als dunkle. Im Endeffekt stellt die Verteilung der elektrischen Ladung auf der Spezialschicht ein „elektrisches Ladungsbild“ dar, das, ins Elektrische übersetzt, alle Einzelheiten des optischen Bildes speichert.

Die Spezialschicht wird zeilenweise von einem Elektronenstrahl abgetastet, der synchron mit den Elektronenstrahlen der Empfängerbildröhren läuft. Dieser Strahl löscht das Ladungsbild, indem er die durch Abwandern von Elektronen entstandenen „Lücken“ wieder auffüllt. An hellen Bildstellen, wo viele Elektronen fehlen, muß der Elektronenstrahl mehr zum Ergänzen beitragen als an dunklen. Daraus lassen sich winzige Strom- und Spannungsschwankungen herleiten, die der Helligkeit der abgetasteten Bildelemente entsprechen. Sie werden verstärkt und als Bildsignal über den Sender ausgestrahlt.

Bildfängerröhren sind viel lichtempfindlicher als die Nipkowsche Scheibe mit ihrer Fotozelle. Manche Ausführungen liefern bereits bei Dämmerlicht deutliche Bilder. Ein Grund für die hohe Lichtempfindlichkeit ist leicht einzusehen: Bei der Nipkowscheibe wirkt jedes Bildelement nur solange auf die Fotozelle, wie ein Loch vor ihm vorbeiläuft. In Bildfängerröhren dagegen ist die ganze Schicht dauernd dem Licht ausgesetzt. Zwischen zwei „Durchgängen“ des Elektronenstrahls haben die einzelnen Stellen Zeit, sich gehörig aufzuladen. Diese gespeicherte Ladung wird dann plötzlich durch den abtastenden Elektronenstrahl kompensiert.

Vom Drum und Dran

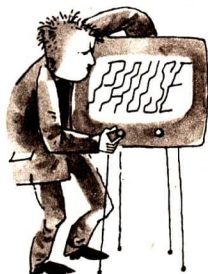
Warum gibt es in einem Fernsehgerät außer der Bildröhre noch so viele und komplizierte Bauelemente? Die Frage liegt nahe und ist beantwortet, sobald wir uns überlegen, was alles zu einer kompletten Fernsehübertragung gehört.

Zunächst muß das Bildsignal übertragen werden, das die Helligkeit der Bildelemente auf dem Fernsehschirm steuert.

Ein weiteres Problem, das wir mehrfach andeuteten, ohne jedoch näher darauf einzugehen, ist die „Synchronisierung“. Nur wenn der Elektronenstrahl der Bildfängerröhre und die Elektronenstrahlen in sämtlichen Empfängern, die das Programm aufnehmen, genauestens Gleichschritt halten, entsteht ein einwandfreies Bild. Geht der Elektronenstrahl im Empfänger je Zeile auch nur um ein Bildelement vor oder nach, beträgt die Verschiebung bis zur letzten Zeile bereits 625 Bildelemente; damit bleibt vom Bild nur noch ein Durcheinander übrig. Das Synchronisieren wird besonders dadurch erschwert, daß das Schreiben des Bildes so schnell gehen muß – für eine Zeile steht nur rund $\frac{1}{10000}$ s zur Verfügung.

Es gibt bis heute nur eine Möglichkeit, den Sender und alle Empfänger in den gleichen Arbeitstakt zu zwingen: Der Sender strahlt neben dem Bildsignal „Zeilenimpulse“ und „Bildimpulse“ aus, die die Elektronenstrahlen der Bildröhren jeweils im richtigen Augenblick an den Zeilen- beziehungsweise Bildanfang zurückstellen.

Schließlich gehört noch der Begleitton dazu, wenn das Gesehene auf dem Bildschirm nicht stumm bleiben soll. Insgesamt müssen also drei Signalarten übertragen werden – Bildsignal, Synchronisierimpulse und Begleitton; eigentlich wären dazu drei Empfänger und natürlich auch drei Sendekanäle notwendig. Zum Glück kann man sich die Sache etwas einfacher machen. Bildsignale und Synchronisierimpulse werden „ineinandergeschachtelt“, und der Begleitton wird, sozusagen auf einem zweiten Gleis, noch mit im Sendekanal untergebracht. Man kommt daher zwar mit einem Empfänger aus, benötigt in ihm

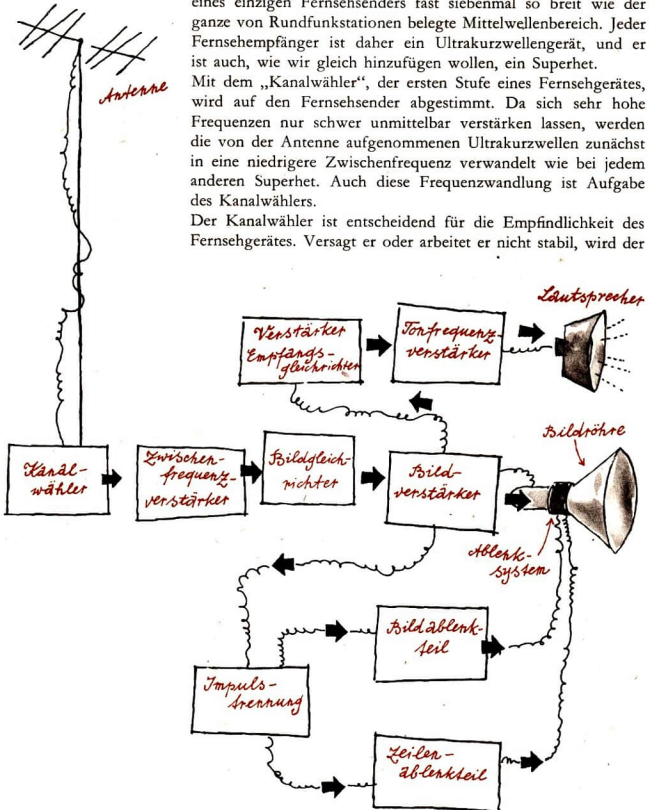


aber besondere Baustufen, um die verschiedenen Signale voneinander zu trennen.

Man muß einem Fernsehsender einen sehr breiten Sendekanal zubilligen, sonst ließen sich keine Bilder hoher Zeilenzahl übertragen. Für Mitteleuropa legte man eine Kanalbreite von 7 MHz, das heißt 7000 kHz je Fernsehsender, fest. Solche Kanäle sind nur auf Ultrakurzwellen unterzubringen, ist doch der Kanal eines einzigen Fernsehsenders fast siebenmal so breit wie der ganze von Rundfunkstationen belegte Mittelwellenbereich. Jeder Fernsehempfänger ist daher ein Ultrakurzwellengerät, und er ist auch, wie wir gleich hinzufügen wollen, ein Superhet.

Mit dem „Kanalwähler“, der ersten Stufe eines Fernsehgerätes, wird auf den Fernsehsender abgestimmt. Da sich sehr hohe Frequenzen nur schwer unmittelbar verstärken lassen, werden die von der Antenne aufgenommenen Ultrakurzwellen zunächst in eine niedrigere Zwischenfrequenz verwandelt wie bei jedem anderen Superhet. Auch diese Frequenzwandlung ist Aufgabe des Kanalwählers.

Der Kanalwähler ist entscheidend für die Empfindlichkeit des Fernsehgerätes. Versagt er oder arbeitet er nicht stabil, wird der



Empfang unmöglich. Kanalwähler, die alle an sie zu stellenden Forderungen erfüllen, stehen heute als Bausteine zur Verfügung. Die Zwischenfrequenz, die noch immer Bildsignal, Synchronisierimpulse und Begleitton enthält, wird in mehreren Stufen verstärkt. Dem Zwischenfrequenzverstärker folgt der „Bildgleichrichter“, dessen Aufgabe es ist, der Zwischenfrequenz das Signalgemisch „abzunehmen“. Der Bildgleichrichter entspricht also etwa dem Empfangsgleichrichter im Rundfunkgerät. Die gewonnenen Signale werden anschließend im „Bildverstärker“ nochmals verstärkt.

Jetzt trennen sich die Wege. Das Bildsignal wird zum Wehneltzylinder weitergeleitet, damit es Elektronenstrahl und Helligkeit des Leuchtflecks steuern kann. Die Synchronisierimpulse werden abgetrennt und anschließend nach Zeilen- und Bildimpulsen „sortiert“.

Hoffentlich haben Sie inzwischen nicht vergessen, daß wir Sägezahnströme brauchen, um den Elektronenstrahl zeilenweise und Bild für Bild über den Bildschirm zu führen. Diese Ströme werden in den „Ablenkstufen“ erzeugt, wobei selbstverständlich die Ströme für Zeilen- und Bildablenkung getrennt gewonnen werden müssen.

In den Ablenkstufen wirken die Synchronisierimpulse. Sie überwachen, dirigieren und korrigieren das Einsetzen, den Ablauf und die Frequenz der Ablenkströme. Früher ließ man jeden Zeilen- und jeden Bildsägezahn von dem zugehörigen Impuls anstoßen. Besonders bei der Zeilenablenkung kam es aber häufig vor, daß der Empfänger zwischen zwei Zeilenimpulsen einen kräftigen „Störimpuls“ aufnahm – und schon war es mit der Synchronisierung vorbei; der Zeilenablenkteil geriet „außer Tritt“. Regelschaltungen, die heute allgemein eingeführt sind, umgehen diese Gefahr. Man läßt die Zeilenablenkstufen zwar selbständig arbeiten, „vergleicht“ aber ständig die Sägezähne mit den Synchronisierimpulsen. Sobald sich die Sägezähne gegenüber den Impulsen zu verschieben beginnen, entsteht eine Steuerspannung, die die Sägezähne wieder „zurechtrückt“. Einzelne Störimpulse wirken sich nicht mehr aus.

Der Begleitton wird ebenfalls im Bildverstärker abgetrennt und in besonderen Stufen weiterverstärkt. Da er frequenzmoduliert ist, muß er einem weiteren Empfangsgleichrichter zugeführt werden. Nach nochmaliger Verstärkung gelangt er dann endlich zu den Lautsprechern.

Es „passiert“ also allerhand im Fernsehempfänger, und da alle Stufen Röhren und andere Bauelemente enthalten, brauchen wir uns über das viele „Drum und Dran“ nicht zu wundern. Dabei erhebt unsere Beschreibung längst keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zahlreiche „Feinheiten“ mußten wir weglassen: Die Einstellmöglichkeiten für Bildkontrast und Bildhelligkeit, die Vorrichtungen zur Fernbedienung, die Automatik, die das Gerät



immer haarscharf auf den Sender abgestimmt hält, und vieles mehr. Es ist eine großartige technische Leistung, daß alle diese Bauteile und Baustufen reibungslos zusammenarbeiten; und es gibt keinen Grund, sich darüber aufzuregen, wenn in unserem Fernsehempfänger einmal ein Defekt auftritt.

Fernsehen morgen

Nicht nur Techniker machen sich Gedanken, wie der Fernsehempfänger von morgen aussehen könnte; auch wir „Fernsehkonsumenten“ haben noch einige Wünsche. Dabei geht es – ein bemerkenswerter Erfolg technischer Aufklärung – nicht mehr zuerst und vor allem um das „große Bild“. Das Motto vieler Fernsehfreunde aus dem Jahre 1955, „Und sei das Zimmer noch so klein – ein großer Bildschirm muß hinein“, ist nicht mehr aktuell; denn allmählich hat sich herumgesprochen, daß nicht so sehr die Bildgröße, sondern vor allem die Bildqualität entscheidend ist. Aber es gibt noch anderes zu ändern und zu verbessern.

Sitzen wir nahe am Bildschirm, so ist zu erkennen, daß das Bild aus einzelnen Zeilen aufgebaut ist. Besonders in kleinen Räumen ist es nicht immer möglich, so weit vom Bildschirm abzurücken, daß die Zeilenstruktur nicht mehr wahrgenommen werden kann. In den neuesten Geräten stört sie nicht mehr. Durch einen technischen Kunstgriff wurde sie zum Verschwinden gebracht.

Man hat sich redliche Mühe gegeben, die Gehäuse der Fernsehgeräte ansprechend und gefällig zu gestalten. Trotz aller Erfolge in dieser Richtung ist festzustellen: Es sind noch immer „Kästen“, die uns die Welt im Bild vorführen. Schuld daran sind nicht die Techniker und Ingenieure, sondern letzten Endes – Alfred Braun. Das Gehäuseformat eines Fernsehempfängers wird vom langen Hals der Bildröhre bestimmt. Zwar kann man die Gehäusetiefe verringern, indem man die Bildröhre hinten herausragen läßt, auch sind bemerkenswerte Ergebnisse bei der Verkürzung der Bildröhren erzielt worden, aber „der Hals bleibt“. Solange er aber bleibt, wäre es wenig sinnvoll, alle anderen Teile eines Fernsehgerätes immer weiter zu verkleinern. Auch der Austausch der Röhren gegen Transistoren hätte unter diesem Gesichtspunkt keine Berechtigung. Er kann allerdings, wie einfache Berechnungen zeigen, eine erhebliche Energieersparnis zur Folge haben, und das wäre nicht nur für unseren Geldbeutel, sondern vor allem für die Volkswirtschaft von Nutzen.

Eins ist gewiß: Der lange Hals der Bildröhre wird uns nicht auf die Dauer ärgern. Die „flache Bildröhre“, die eigentlich nur noch ein etwas dick geratener Bildschirm ist, wird kommen. Es gibt bereits, wenn auch nur als Versuchsmuster, Röhren, deren Elektronenstrahl zunächst parallel zum Bildschirm läuft und anschließend so umgelenkt wird, daß er ein Bild schreibt. Wenn



diese Röhren eines Tages größere Verbreitung erlangen, steht dem Fernsehempfänger geringer Tiefe nichts mehr im Wege. Man wird ferner den Bildschirm vom Empfänger trennen können. Der Bildschirm steht oder hängt an einer günstigen Stelle im Zimmer, der eigentliche Empfänger dort, wo er am besten zu bedienen ist. Dann wird auch der Empfänger kleiner und immer kleiner werden können. Die Vorzüge der Halbleitertechnik werden, weil das Gerät nicht mehr „rund um die Bildröhre“ gebaut werden muß, voll zur Geltung kommen. Spätestens unsere Kinder werden Fernsehempfänger kaufen, die – vom Bildschirm abgesehen – nicht größer sind als ein Zigarettenetui und trotzdem klare, farbige Bilder liefern.

Damit wären wir bei einem weiteren Projekt, dem Fernsehen in natürlichen Farben, mit dem seit Jahren in vielen Ländern, auch in der DDR, experimentiert wird. Der Grundgedanke des Farbfernsehens hat viel Gemeinsames mit der Farbfotografie: Sämtliche Farben der zu übertragenden Szenerie werden in drei Grundfarben – beim Fernsehen Blau, Grün und Rot – zerlegt; diese Farbkomponenten werden übertragen und beim Empfänger wieder zu den ursprünglichen Farben zusammengesetzt. Beim Sender arbeitet man mit Filtern und drei Bildfängerröhren, beim Empfänger mit Spezialbildröhren, auf deren Bildschirm es in mikroskopischer Nachbarschaft rot-, grün- und blauleuchtende Fleckchen gibt, die von drei Elektronenstrahlen „angeregt“ werden.

Das klingt zwar einfach, die technische Verwirklichung dieses Prinzips ist aber äußerst kompliziert. Sind es beim Schwarz-Weiß-Gerät Bildsignal und Synchronisierimpulse, die genau ineinandergreifen müssen, so haben wir es beim Farbfernsehen außerdem mit den verschiedenen Farbsignalen zu tun. Dazu kommt, daß es möglich sein soll, einen Farbfernsehsender mit einem „alten“ Gerät als Schwarz-Weiß-Bild aufzunehmen und mit dem Farbfernsehempfänger „alte“ Sender der Schwarz-Weiß-Methode zu empfangen.

Prinzipiell sind, wie gesagt, diese Probleme gelöst. Aber von der prinzipiellen Lösung bis zur allgemeinen Einführung ist noch ein gutes Stück Weg zurückzulegen. Es bedarf keiner Erörterung, daß die Techniker in aller Welt es möglichst abkürzen werden.

Der elektronische Sherlock Holmes

Als Fernsehzuschauer denken wir sehr selten daran, daß das Fernsehen sich auch ganz andere, äußerst wichtige Anwendungsgebiete erschloß. Wir meinen jene Anwendungen, die man ein wenig ungenau unter dem Namen „Industrielles Fernsehen“ zusammenfaßt.

Mit dem Fernsehrundfunk hat das industrielle Fernsehen gemein, daß es Vorgänge auf größere Entfernungen sichtbar macht. Der



Zuschauerkreis jedoch bleibt beim industriellen Fernsehen begrenzt. Vor seinen Schirmen sitzen Techniker, Dispatcher, Ärzte, Ingenieure, Wissenschaftler oder Studenten und beobachten Produktionsvorgänge, den Verkehr auf einem Rangierbahnhof oder einem Flugfeld, eine Operation oder den Versuchslauf einer neuen Maschine.

Warum beobachtet man nicht unmittelbar, mit dem Auge, sondern mit einer Fernsehkamera, deren Aufnahmen auf dem Schirm einer industriellen Fernsehanlage erscheinen?

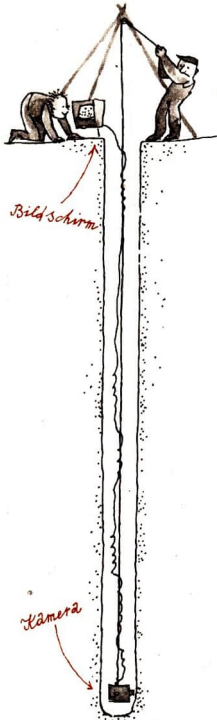
Es gibt viele Stellen, an denen eine optische Beobachtung erwünscht oder dringend nötig ist, in deren Nähe der Mensch als Beobachter aber noch nicht kommen konnte. Noch ist kein Astronaut um den Mond geflogen. Die Fernsehkamera eines unbemannten sowjetischen Raumschiffes aber richtete ihr Objektiv auf die stets der Erde abgekehrte Mondrückseite und funkte später die Aufnahmen zur Erde. Die ersten Nahaufnahmen von Planeten werden ebenfalls über eine Fernsehverbindung zu uns gelangen.

Ein Bohrloch wird in die Tiefe getrieben. Niemand kann hinabsteigen. Die zutage geförderten Bohrkerns liefern nur einen indirekten Beweis davon, „wie's drinnen aussieht“. Man kann aber als unbestechlichen Zeugen eine Fernsehkamera samt einer Beleuchtungseinrichtung hinabschicken und das Innere des Bohrlochs auf dem Bildschirm sichtbar werden lassen.

Tausende Kilometer fließt sowjetisches Erdöl, ehe es unsere Chemiewerke erreicht. Gibt es eine Möglichkeit, das Innere der Rohrleitungen schnell und genau zu prüfen? Fernseh-Bohrlochsonde kann – entsprechend abgeändert – durch die Rohrleitungen fahren und ihre Beobachtungen nach außen melden. Sie kann es ebenso aus Gas- und Wasserleitungen, und sie nimmt dem Menschen eine mühsame, unangenehme und gesundheits-schädliche Arbeit ab, wenn man sie in Kanalisationssystemen einsetzt.

Gesundheitsschädlich oder lebensgefährlich ist noch eine Reihe anderer Prozesse; im Zeitalter der Atomenergie und der Kerntechnik sind noch einige hinzugekommen. „Heiße“, radioaktive Stoffe müssen durch Schutzwände vom Menschen ferngehalten werden, auch dann, wenn mit ihnen gearbeitet wird. Sie zu handhaben, gibt es Manipulatoren, sinnreich konstruierte „künstliche Hände“, die fernbedient werden. Ist eine Beobachtung hinter den Schutzwänden ausgeschlossen, sieht man eine Fernsehkamera vor. Sie eignet sich für diesen Zweck besser als Spiegelsysteme; denn man kann sie leicht schwenken, durch eine geeignete Optik das Gesichtsfeld erweitern oder verkleinern und auch auf mehreren Bildschirmen gleichzeitig beobachten.

Im Führerstand von Großmaschinen – seien es Bagger, Förderbrücken oder Krane – haben die Bildschirme industrieller Fernseh-

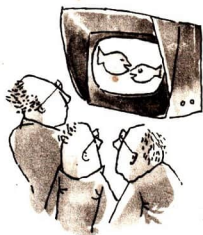


anlagen ebenfalls Einzug gehalten. Sie machen, in Zusammenarbeit mit geschickt verteilten Kameras, dem Bedienungspersonal auch jene Vorgänge sichtbar, die sonst vom Führerhaus aus nicht zu sehen sind. Für Unterwasserarbeiten hat sich die Fernsehkamera hervorragend bewährt. Bei Routineuntersuchungen an Unterwasserbauwerken – Hafenanlagen, Schleusen, Talsperren, Dämmen und Brücken – ersetzt sie den Taucher. Sie kann beliebig lange unter Wasser bleiben, schnell auf- und abgelassen werden, ihr Schirmbild können mehrere Fachleute zu gleicher Zeit betrachten. Dort, wo Taucher unentbehrlich sind, erleichtert und sichert die Fernsehkamera die Arbeit. Bereits vor Arbeitsbeginn verschafft sich der Taucher einen Überblick und entscheidet, welche Werkzeuge und Geräte er mit nach unten nehmen muß. Während seiner Tätigkeit beobachtet und schützt ihn eine Fernsehkamera.

Auch der Unterwasserforschung hat die Fernsehkamera neue Wege gewiesen. Man kann Beobachtungen nicht nur über einen beliebig langen Zeitraum ausdehnen, sondern auch an Deck eines fahrenden Schiffes sofort betrachten, was die unter dem Kiel hängende Kamera aufnimmt. Neben der Biologie und der Meereskunde erhält dadurch auch das Fischereiwesen wertvolle Aufschlüsse und Anregungen.

Automatische Produktionsanlagen, noch vor zwei Jahrzehnten ausschließlich Thema utopischer Erzählungen, sind heute nicht mehr selten. In einigen Jahren werden sie alltäglich geworden sein. In der Leitzentrale eines solchen Werkes laufen ständig zahlreiche Meßwerte und Kontrolldaten ein. Sie sind ein Spiegel für die Arbeit der Betriebseinrichtungen und lassen jede Abweichung vom ordnungsgemäßen Produktionsablauf sofort erkennen. Nicht in jedem Falle aber können die Angaben von Instrumenten den Beobachter ersetzen. Deshalb werden industrielle Fernsehkameras zur selbstverständlichen Ausrüstung solcher Betriebe gehören. Die Kameras sind an besonders wichtigen Stellen des Betriebes angebracht. Sie können wahlweise mit Bildschirmen in der Leitzentrale zusammengeschaltet werden; ihre Bedienung erfolgt gleichfalls von dort aus.

Man hat derartige Anlagen bereits häufig eingesetzt, und zwar nicht nur in Produktionsbetrieben, sondern auch im Verkehrswesen. Bei Messen und internationalen Sportveranstaltungen hat es sich beispielsweise gut bewährt, die Verkehrsregelung und die Belegung der Parkplätze zentral zu leiten. An wichtigen Zufahrtsstraßen, an Kreuzungen und Parkplätzen sind Fernsehkameras angebracht, deren Bild zur Zentrale übertragen wird. Auf diese Weise kann der Verkehr viel schneller und reibungsloser abgewickelt werden als bei der Regelung durch einzelne Verkehrsposten. In den Stellwerken großer Bahnhöfe gibt der Bildschirm unübersichtliche Gleisabschnitte wieder, in Flughäfen zeigt er den Verkehr an Flugsteigen und vor Hallen.





Nennen wir schließlich den Einsatz der Fernsehkamera für Lehrzwecke. Noch vor wenigen Jahren konnten Studenten schwierigen Operationen nur aus größerer Entfernung folgen, durch Glaswände vom eigentlichen Operationsraum getrennt; denn das Operationspersonal durfte nicht gestört werden. Wichtige Einzelheiten entgingen den Studenten. In vielen Universitätskliniken löste man diesen Widerspruch durch Fernsehanlagen – eine der modernsten besitzt die Berliner Charité. Die Kamera ist in die Operationsleuchte eingesetzt. Ihr Bild wird von mehreren Fernsehschirmen oder mit Hilfe eines Fernseh-Projektionsgerätes wiedergegeben. Die Studenten sehen das Operationsfeld aus unmittelbarer Nähe. Das Operationspersonal wird nicht gestört; die Sterilität des Operationsraumes ist nicht in Frage gestellt. Die Betrachtung mikroskopischer Präparate, die Wiedergabe von Röntgenbildern, die genaue Beobachtung einzelner Patienten wird ebenfalls durch Fernsehanlagen vereinfacht.

Niemand wird den Vorteil und den Nutzen des industriellen Fernsehens bezweifeln. Doch wie sieht es mit der Berücksichtigung technischer und ökonomischer Gesichtspunkte aus? Sind Fernsehanlagen nicht äußerst komplizierte und teure Einrichtungen, deren Einsatz nur an wenigen Stellen wirtschaftlich vertretbar ist?

Im allgemeinen sind industrielle Fernsehanlagen viel billiger als entsprechende Einrichtungen des Fernseh- und Rundfunks. Das ist vor allem eine Folge des begrenzten Betrachterkreises. Meistens soll die Fernsehkamera nur einen, allenfalls einige wenige Bildschirme versorgen. Sender und Ultrakurzwellenempfänger können deshalb weggelassen, zur Verbindung zwischen Fernsehkamera und Bildwiedergabegerät genügt ein Kabel. Auch eine Tonübertragung ist fast immer entbehrlich.

Häufig können wichtige Baugruppen für Kamera und Wiedergabegerät gemeinsam verwendet werden. So vereinfacht sich beispielsweise die Synchronisierung, da eine direkte Kabelverbindung zwischen Kamera und Wiedergabegerät besteht. Die Bildqualität braucht häufig nicht ganz so hoch zu sein wie beim Fernseh- und Rundfunk. Man kommt mit einer niedrigeren Zeilenzahl aus. Das bedeutet eine weitere Vereinfachung der Geräte.

Das ist nicht nur im Hinblick auf die Anschaffungskosten einer industriellen Fernsehanlage wichtig. Fernsehkameras, wie wir sie aus Fernsehstudios kennen, wären zu groß und zu unbeweglich für die meisten Aufgaben des industriellen Fernsehens. Gerade die vereinfachte Aufgabenstellung des industriellen Fernsehens hat den Bau kleiner, robuster und wendiger Kameras erlaubt. Sie sind heute kaum noch größer als ein Kofferempfänger. In Spezialfällen, zum Beispiel bei der Bohrlochsonde, können die Abmessungen weiter verringert werden. Solche Kameras lassen sich in die Hosentasche stecken und natürlich jederzeit auch an unzugänglichen Stellen montieren.

Die Wiedergabegeräte nehmen ebenfalls wenig Platz weg, auf keinen Fall mehr als ein normaler Fernsehempfänger. Dabei ist eine in der Sowjetunion verfolgte Tendenz besonders interessant: Man ist bemüht, als Wiedergabegeräte für industrielle Fernsehanlagen normale Fernsehempfänger entweder unmittelbar oder mit Hilfe eines billigen Zusatzgerätes zu verwenden. Warum dieses System in kapitalistischen Ländern unter den Herstellern elektronischer Geräte nur wenig Freunde findet, brauchen wir wohl nicht zu erörtern.

Durch die Beschreibung der technischen Besonderheiten industrieller Fernsehanlagen hat sich die Frage nach ihrer ökonomischen Vertretbarkeit bereits zum größten Teil beantwortet. Die Fernsehanlage, die einen entstehenden Schaden an einer Talssperre oder am Schaufelrad eines Baggers rechtzeitig entdeckt, hat sich in den meisten Fällen bereits „bezahlt“ gemacht. Die Kamera, deren Auge eine Arbeitskraft für andere Aufgaben freistellt, ist mehr als „billig“. Der Wert einer Kamera gar, die einen Menschen bei gesundheitsschädigender oder gefährlicher Tätigkeit ersetzt, ist gar nicht in Geld auszudrücken.



RADAR – WEGWEISER UND WÄCHTER

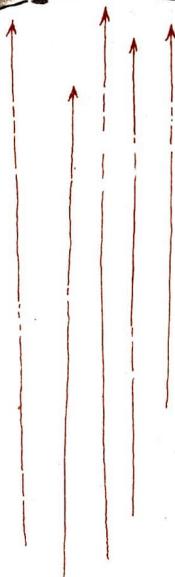
„Augen so groß wie ein Kirchturm“

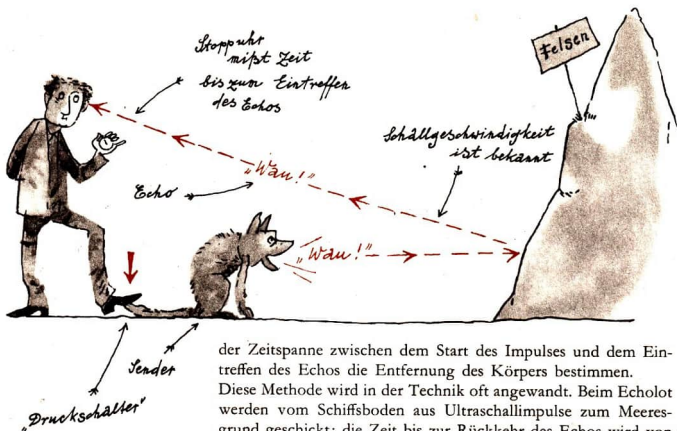
Der Fluggast, der sich im Sessel zurücklehnt und die Landschaft unter sich vorbeiziehen läßt, merkt nichts davon, daß seine Maschine einem ständigen Trommelfeuer ausgesetzt ist. Auch den Piloten stören die „Geschosse“ nicht, die in jeder Sekunde zu Hunderten auf das Flugzeug prallen; denn das Trommelfeuer ist harmlos. Die Geschosse bestehen aus kurzen Funkwellenzügen, aus Wellenimpulsen, die dem dahineilenden Luftfahrzeug nichts anhaben können.

Etwas allerdings geschieht: Jeder Impuls wird bis auf einen kleinen Teil vom Flugzeug nach den verschiedensten Richtungen zurückgeworfen. Ein Bruchteil der reflektierten Impulsenergie gelangt dabei als „Echo“ wieder zum Sender, also zum Ausgangspunkt, zurück. Dort dienen diese Echos dazu, Richtung, Entfernung und Höhe des Flugzeugs zu bestimmen.

Die Impulse werden von einem Radargerät ausgestrahlt. Bereits der Name RADAR, entstanden aus „radio detecting and ranging“, umreißt die Aufgabe solcher Anlagen. Mit Hilfe von Radiowellen entdecken sie Flugzeuge, Schiffe und andere reflektierende Gegenstände und bestimmen deren Standort.

Jedes Radargerät beruht auf dem sogenannten Echoverfahren: Schickt man einen Impuls (Schall, Licht, Radiowellen) zu einem Körper, von dem er reflektiert wird, kennt man ferner die Geschwindigkeit, mit der der Impuls sich bewegt, kann man aus





der Zeitspanne zwischen dem Start des Impulses und dem Eintreffen des Echos die Entfernung des Körpers bestimmen. Diese Methode wird in der Technik oft angewandt. Beim Echolot werden vom Schiffsboden aus Ultraschallimpulse zum Meeresgrund geschickt; die Zeit bis zur Rückkehr des Echos wird von einem elektronischen Gerät gemessen und sofort in „Meter Wassertiefe“ umgerechnet. Bruchstellen in Kabeln oder Rohrleitungen lassen sich durch elektrische Impulse lokalisieren, die von der beschädigten Stelle reflektiert werden. Einige Tierarten benutzen zur Orientierung gleichfalls das Echoverfahren, um Hindernisse oder Nahrung ausfindig zu machen. Am bekanntesten sind die Fledermäuse, die mit Ultraschallimpulsen jedes Hindernis ausmachen und ihre Beute erspüren.

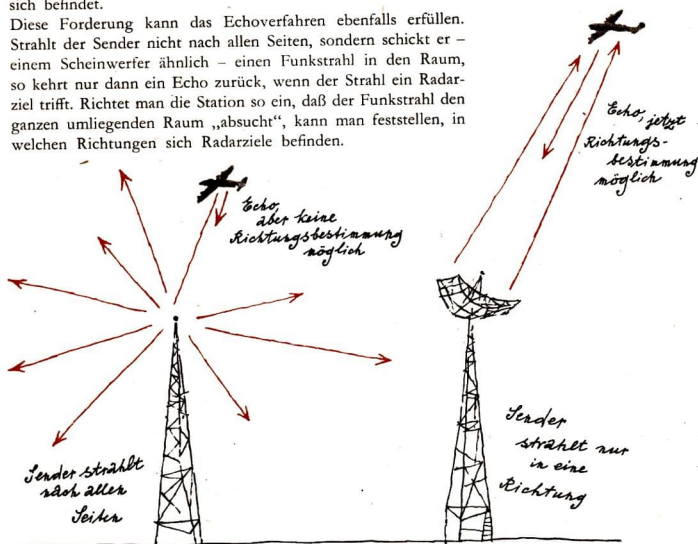
Neu am Radargerät ist daher nicht das Prinzip, sondern die Tatsache, daß es elektromagnetische Wellen statt Schallwellen benutzt. Dieser Unterschied gegenüber Geräten mit Schallechos hat weitreichende Folgen. Schallwellen breiten sich in Luft mit einer Geschwindigkeit von etwa 340 m/s aus. Das Echo von einem 1 km entfernten Gegenstand wäre also nach rund 6 s zu erwarten; die genaue Messung einer solchen Zeitspanne bereitet keinerlei Schwierigkeiten. Funkwellen legen in der Sekunde 300 000 km zurück und sind damit, ganz grob gerechnet, millionenfach schneller als Schall in Luft. Aus 1 km Entfernung wäre ein Funkecho bereits nach etwa 0,000 006 s zurück. Schon ein Meßfehler vom millionsten Teil einer Sekunde bedeutet hier einen Entfernungsfehler von 150 m, denn in dieser Mikrosekunde legen die elektromagnetischen Wellen bereits 300 m (verteilt auf Hin- und Rückweg) zurück. Voraussetzung dafür, Entfernungen mit Hilfe von Funkwellen zu messen, sind also Einrichtungen, mit denen sich auch aller kürzeste Zeiten noch mit hoher Genauigkeit messen lassen.

Leider ist die Zeitmessung nicht das einzige Problem, das es beim RADAR zu meistern gilt. Nur ein winziger Bruchteil der ausgesandten Energie gelangt zur Radarstation zurück. Da Radargeräte aber häufig Entfernungen von Hunderten oder Tausenden Kilometern bestimmen sollen, müssen Radarsender meistens viel leistungsfähiger als Rundfunk- und Fernsehstationen sein. Allerdings braucht diese Leistung nicht ständig abgegeben zu werden, sondern jeweils nur für die Dauer eines Impulses, so daß der Sender bis zum nächsten Impuls Gelegenheit zum Energiespeichern hat.

Ebenso wichtig wie ein leistungsstarker Sender ist ein möglichst empfindlicher Empfänger. Je empfindlicher er ist, desto leisere Echos kann er noch aufnehmen, desto größer ist auch die Reichweite des Radargerätes. Deshalb sind Radarempfänger weit empfindlicher als Rundfunk- oder Fernsehgeräte, ja selbst als die Großempfänger in Empfangszentralen für den internationalen Funkverkehr.

Neben der Entfernung des „Radarzieles“ interessiert auch seine Richtung. Man will nicht nur wissen, wie weit ein Flugzeug oder Schiff entfernt ist, sondern auch, in welcher Richtung zur Radarstation (häufig auch in welcher Höhe über dem Erdboden) es sich befindet.

Diese Forderung kann das Echoverfahren ebenfalls erfüllen. Strahlt der Sender nicht nach allen Seiten, sondern schickt er – einem Scheinwerfer ähnlich – einen Funkstrahl in den Raum, so kehrt nur dann ein Echo zurück, wenn der Strahl ein Radarziel trifft. Richtet man die Station so ein, daß der Funkstrahl den ganzen umliegenden Raum „absucht“, kann man feststellen, in welchen Richtungen sich Radarziele befinden.

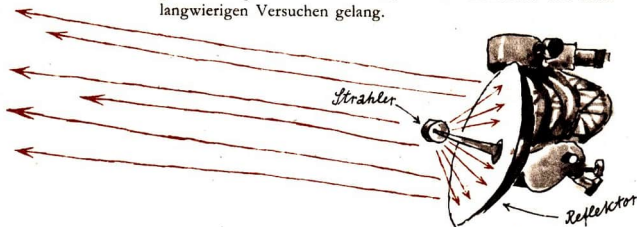


Licht ist durch Linsen und Spiegel leicht zu bündeln. Einen Funkstrahl erhält man, indem man Dezimeter-, Zentimeter- oder Millimeterwellen über eine Spezialantenne ausstrahlt.

Die Messung kürzester Zeitspannen bereitet, wenn wir elektronische Mittel zu Hilfe nehmen, keine allzu großen Schwierigkeiten. Als „Uhrzeiger“ dient im allgemeinen der Elektronenstrahl einer Braunschen Röhre, von dessen Schnelligkeit wir bereits beim Fernsehen gelesen haben.

Die Konstruktion leistungsfähiger Radarsender wird vor allem dadurch erschwert, daß Radargeräte auf sehr kurzen Wellen arbeiten. Mit Röhren, mit einer Schaltungstechnik, die sich auf niedrigeren Frequenzen immer wieder bewährt hatte, ist in der Radartechnik wenig oder gar nichts anzufangen. Hier ist die Domäne der Spezialröhren, des Magnetrons und des Klystrons.

Im Radarempfänger müssen die hohen Frequenzen, auf denen man Radarimpulse ausstrahlt und aufnimmt, erst in eine niedrigere Frequenz umgewandelt werden, ehe sie mit normalen Röhren weiterverarbeitet werden können. Diese Umwandlung erfordert gleichfalls spezielle Bauelemente, die zu entwickeln erst nach langwierigen Versuchen gelang.



Bei der Antennenkonstruktion ist vor allem eine Gesetzmäßigkeit zu berücksichtigen: Radiowellen lassen sich um so besser bündeln, je höher das Verhältnis Antennengröße zur Wellenlänge ist. Soll die Antenne, das „Auge“ der Radarstation, klein bleiben, muß man also auf möglichst kurze Wellen zurückgreifen. Da dies auch aus anderen Gründen vorteilhaft ist, beschreitet man meistens diesen Weg. Es bereitet dann auch keine großen Schwierigkeiten, die Antenne zu drehen und zu schwenken, damit das Radargerät den Raum absuchen kann.

Mitunter müssen aber Dezimeter- oder Meterwellen benutzt werden, unter anderem für Frühwarngeräte der Luftabwehr oder für Radaranlagen zur Verfolgung kosmischer Flugkörper. Solche Radarstationen haben, wie es in einem bekannten Märchen heißt, wirklich „Augen, so groß wie ein Kirchturm“: Antennenflächen von Hunderten, ja Tausenden Quadratmetern sind keine Seltenheit. Um die Antennen schwenken zu können, sind sie auf Fahrgestellen gelagert, die über einbetonierte Schienenkränze laufen.

Die meisten Radarantennen weisen paraboloidähnliche Form auf – sei es, daß sie ein vollständiges Paraboloid darstellen, sei es, daß nur ein Streifen aus einem Paraboloid herausgeschnitten wurde. Im „Brennpunkt“ des Paraboloids sitzt das Ende des zum Sender führenden Hohlleiters. Er wirft seine Energie zum reflektierenden Paraboloid, von wo aus sie als Strahlenbündel in den Raum dringt. Hier erkennen wir besonders deutlich die Verwandtschaft mit dem Scheinwerfer, dessen Lichtquelle gleichfalls im Brennpunkt angebracht werden muß, wenn ein paralleles Lichtbündel verlangt wird.

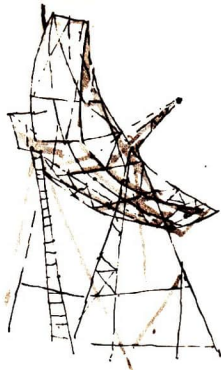
Eine besondere Empfangsantenne gibt es bei den meisten Radaranlagen nicht. In der Zeit zwischen zwei abgehenden Impulsen dient die Sendeantenne als Empfangsantenne. Das bedeutet allerdings, daß die Antenne fortwährend von Senden auf Empfang umgeschaltet werden muß, um das Echo jedes einzelnen Impulses auffangen zu können. Das Umschalten übernehmen sogenannte Sperröhren.

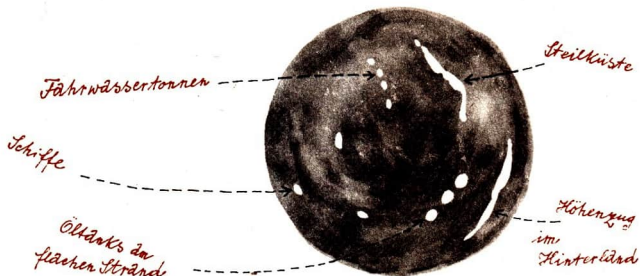
Empfänger, Sender und Sperröhre müssen bis auf Bruchteile einer Mikrosekunde pünktlich zusammenarbeiten. Das wäre nicht zu erreichen, wenn man jeden Anlagenteil sich selbst überließe. Eine weitere wichtige Baugruppe des Radargerätes ist daher die „Impulszentrale“. Sie steuert den Arbeitsrhythmus der ganzen Station und ist fast so etwas wie ein „Herz“, das den „Pulsschlag“ der Anlage bestimmt.

Der Radarempfänger ist mit dem „Sichtgerät“ verbunden, das die gewünschten Entfernungs- und Richtungsangaben liefert. Die Meßwerte lassen sich auf verschiedene Weise anzeigen. Man kann zum Beispiel auf dem Bildschirm einer Braunschen Röhre einen leuchtenden Strich schreiben lassen, an dem jedes Echo einen kleinen „Zacken“ hervorruft. Der Abstand des Zackens vom Anfang der Linie gibt ein Maß für die Entfernung des reflektierenden Radarziels. Die Richtung läßt sich ablesen, indem man die jeweilige Stellung der Antenne durch eine mechanische oder elektrische Übertragung anzeigt.

Bei den meisten Radargeräten werden jedoch Richtung *und* Entfernung auf einem Bildschirm sichtbar. Jedes Echo erscheint als Leuchtfleck auf dem Schirm. Sein Abstand vom Schirmmittelpunkt, der dem Standort der Radarstation entspricht, liefert den Entfernungswert. Die Verbindungslinie Leuchtfleck–Schirmmittelpunkt (die in Wirklichkeit unsichtbar ist) bildet einen bestimmten Winkel mit der am Bildschirmrand angebrachten Nordmarkierung. Dieser Winkel entspricht der Richtung des Radarziels.

Man sieht also auf dem Bildschirm ein Bild, wie man es erhielte, wenn man alle Radarziele nach Entfernung und Richtung in eine Karte einzeichnete. Doch nicht nur deswegen spricht man bei einem solchen Radargerät von einer „elektronischen Landkarte“. Auch andere reflektierende Körper als Schiffe, Flugzeuge oder





Raketen reflektieren die Radarimpulse und erscheinen infolgedessen als Leuchtflecke auf dem Bildschirm. Bestreicht der Suchstrahl der Radarstation eine Felswand oder ein hohes Gebäude, so zeichnet sich auf dem Bildschirm eine ununterbrochene Kette von Leuchtflecken ab, die die Konturen der Vorderseite des betreffenden Körpers erkennen läßt.

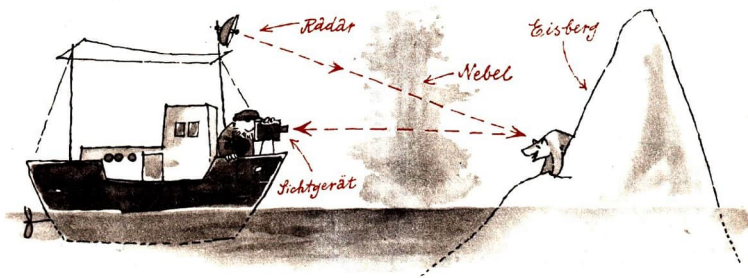
Über die technische Ausführung solcher „Rundsichtradargeräte“ wollen wir nur so viel sagen, daß die elektronische Landkarte durch eine sinnreiche Kopplung zwischen der ständig rotierenden Antenne und einem synchron damit umlaufenden „elektronischen Zeiger“ auf dem Bildschirm zustande kommt.

Auf der Erde . . .

Die ersten Berichte über die Radartechnik drangen während des zweiten Weltkrieges an die Öffentlichkeit. Es ist aber eine grobe und bewußte Verdrehung, wenn in westlichen Veröffentlichungen RADAR als „Beweis“ dafür genannt wird, wie sehr Kriegstechnik und Aufrüstung „dem Fortschritt nützten“. Den ersten Wegbereitern der Radartechnik, die vor mehr als 50 Jahren experimentierten, ging es zunächst um eine ausschließlich friedliche Anwendung. Sie wollten ein Gerät schaffen, das Schiffe unter schlechten Sichtverhältnissen vor Gefahren bewahrt. Daß die Radartechnik unter dem dichten Schleier der militärischen Geheimhaltung verschwand, sobald man sie ernst zu nehmen begann, zeigt nur einmal mehr, wie viele großartige technische Errungenschaften nicht sofort Allgemeingut werden, weil sie von imperialistischen Mächten zur Kriegsvorbereitung mißbraucht werden und weil demzufolge auch die friedliebenden Völker sich mit den modernsten technischen Mitteln gegen einen Überfall schützen müssen.

So hat RADAR auch heute überragende militärische Bedeutung. Im Zeitalter der Überschallbomber und der Fernraketen ist es mehr denn je wichtig, gegnerische Luftkampfmittel so frühzeitig wie möglich auszumachen und zu „orten“, damit Abwehrmaßnahmen eingeleitet werden können. Auch bei der Feuerleitung von Batterien, der Lenkung von Luftabwehrraketen und im Seekrieg ist die Radartechnik nicht zu entbehren. Ihre militärischen Aufgaben werden erst dann hinfällig sein, wenn die allgemeine und vollständige Abrüstung jeden imperialistischen Angriff ausschließt.

Schon seit Jahren aber wird RADAR auch im „zivilen Sektor“ von Tag zu Tag wichtiger. Fast alle größeren Schiffe sind heute



mit Radaranlagen ausgerüstet. Mit ihrer Hilfe lassen sich „Begegner“ bei Nacht und im dichtesten Nebel erkennen, so daß man einer Kollision rechtzeitig ausweichen kann. Eisberge, die Ursache zahlreicher großer Schiffskatastrophen, werden meistens vom Schiffsradargerät entdeckt. Allerdings darf man sich dabei dem Radargerät nicht blind anvertrauen; denn es kommt vor, daß glatte Eisbergwände die Radarstrahlung so ungünstig reflektieren, daß keine Echos zum Schiff zurückkehren.

Fahrwassertonnen zeichnen sich, besonders wenn sie mit einfachen „Radarreflektoren“ ausgestattet sind, auf dem Bildschirm ab. Da sich außerdem die Küstenlinie oder wenigstens hervorragende Gebäude, Berghänge usw. als Leuchtflecke auf dem Radarschirm wiederfinden, kann – insbesondere unter Hinzuziehung spezieller „Radarkarten“ – das Radargerät auch eine wertvolle Navigationshilfe sein.

Zahlreiche technische Hilfsmittel erleichtern die Auswertung der Radarbilder. Zum Abschätzen der Entfernung eines Radarzieles werden Entfernungsrings in das Schirmbild eingeblendet, die bestimmten Abständen vom Schiff entsprechen. Soll die Zielentfernung genau bestimmt werden, weitet man einen veränderlichen Meßring so lange auf, bis er durch den Leuchtfleck des

Ziels geht. An einer Skala, die mit dem Bedienungsknopf des Meßbringes gekoppelt ist, kann die Entfernung abgelesen werden. Zur Richtungsbestimmung ist nicht nur der Rand des Radarschirmes mit einer Gradeinteilung beschriftet, sondern man kann auch einen „Peilstrich“ so lange verstellen, bis er den von Echos hervorgerufenen Leuchtfleck schneidet, und die Richtungsangabe am Rand ablesen. Ein weiteres bewährtes Hilfsmittel ist die „Vorausanzeige“. Sie wird als Strich in das Schirmbild eingeblendet und zeigt die augenblickliche Fahrtrichtung des Schiffes an. Um das Radargerät besser für die Navigation einsetzen zu können gibt es außer Radarkarten „Kartenvergleichsgeräte“, in denen auf optischem Wege das Radarschirmbild und die entsprechende Seekarte zur Deckung gebracht werden.

In Küstengewässern und vor Hafeneinfahrten setzt man besondere „Radarbaken“ aus. Sie sind mit Sendern ausgerüstet, die den Wellenbereich der Schiffsradargeräte benutzen und entweder ständig in Betrieb sind oder nur dann strahlen, wenn sie von den Impulsen eines Schiffsradargerätes getroffen werden. Auf dem Radarschirm erscheinen leuchtende Striche in Bakenrichtung oder charakteristische kurze Bögen, aus denen Richtung und Entfernung der Bake abgelesen werden können.

An vielbefahrenen Wasserstraßen, besonders in Häfen, stellt man eine Kette von Radaranlagen an Land auf, deren Bilder in einer Zentrale ausgewertet werden. Dieses „Hafenradar“ gibt einen Überblick über den gesamten Schiffsverkehr im Hafen, während das Radargerät eines einlaufenden Schiffes nur eine begrenzte, wegen der vielen Bauten und anderen Radarziele verwirrend oft wechselnde Übersicht liefern würde. Die Lotsen auf den ein- und auslaufenden Schiffen sind über Sprechfunkgeräte in Kontakt mit der Hafenradarzentrale und können Hinweise, Warnungen und Empfehlungen entgegennehmen.

Ein anderes Verfahren sieht vor, das Schirmbild des Hafenradargerätes über einen Fernsender auszustrahlen und an Bord der Schiffe mit einem gewöhnlichen Fernsehempfänger aufzunehmen. Lotse und Kapitän wären dann nicht mehr auf mündliche Informationen angewiesen. Die Radaranlage an Land könnte mit allen technischen Feinheiten ausgerüstet werden, während auf den Schiffen – und das ist besonders für kleinere Fahrzeuge wichtig – keine Radargeräte, sondern nur die weit billigeren Fernsehempfänger installiert werden müßten.

Der ökonomische Nutzen von Hafenradaranlagen ist sehr groß. Denn jeder Nebeltag, der den Verkehr im Hafen behindert oder unmöglich macht, verzögert die Löscharbeiten und verursacht erhebliche volkswirtschaftliche Verluste. Berechnungen haben gezeigt, daß eine aus zahlreichen Einzelstationen bestehende Hafenradaranlage sich bereits während einer mehrtägigen Nebelperiode bezahlt machen kann.

Bei der Binnenschifffahrt drehen sich Radarantennen nicht nur



auf Seen, sondern auch auf Flüssen und Kanälen. Radargeräte für die Binnenschifffahrt brauchen keine großen Entfernungen zu überbrücken. Dafür müssen sie auch kleine Ziele, zum Beispiel Ruderboote oder Brückenpfeiler, noch deutlich anzeigen. Man verwendet daher in diesem Fall häufig Radargeräte, die im Millimeterwellenbereich senden und empfangen.

Eine ganz andere Aufgabe hat das „Verkehrsradargerät“. Es soll Fahrzeuggeschwindigkeiten messen. Es sendet keine Impulse, sondern strahlt ununterbrochen. Zur Geschwindigkeitsmessung wird der „Dopplereffekt“ herangezogen. Die Frequenz einer Strahlungsquelle nimmt zu, wenn diese sich uns nähert; die Frequenz sinkt, wenn sich die Strahlungsquelle entfernt. Wir kennen diese Erscheinung: Der Motor eines näherkommenden Fahrzeuges brummt zunächst „zu hoch“ und, wenn der Kraftwagen vorüber ist, „zu tief“. Wird ein Fahrzeug mit Funkwellen angestrahlt, ändern die reflektierten Wellen ihre Frequenz ebenfalls in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Diese Änderung wird vom Verkehrsradargerät gemessen und sofort in Kilometer je Stunde umgerechnet.



... in der Luft und im Weltraum

Die Luftfahrt verwendet Radargeräte am Boden und an Bord der Maschinen. Es gibt keinen größeren Flughafen, der nicht mit RADAR ausgerüstet ist. Die zunehmende Dichte des Luftverkehrs und die steigenden Fluggeschwindigkeiten haben diese Ausrüstung erzwungen. Man kann sich im Kontrollturm eines Flughafens, der täglich Hunderte von Starts und Landungen zu bewältigen hat, nicht damit begnügen, von Fall zu Fall Standort oder Kurs eines Flugzeugs durch eine drahtlose Anfrage oder durch eine Funkpeilung zu bestimmen. Eine sichere, reibungslose Abwicklung des Flugverkehrs setzt voraus, in jedem Zeitpunkt einen genauen Überblick über *sämtliche* in der Nähe des Flugplatzes befindlichen Maschinen zu haben.

Diesen Überblick verschafft man sich mit einem Rundsichtgerät. Es reicht weiter (bis zu 200 km und darüber) als ein Schiffsradargerät, ist mit einem stärkeren Sender ausgestattet und benutzt meistens Frequenzen im Dezimeterwellenbereich. Da der Standort des Radargerätes sich nicht ändert, kann man eine transparente Scheibe auf den Bildschirm legen, auf der besonders wichtige Geländepunkte, Hindernisse oder Luftstraßen markiert sind. Das erleichtert die Auswertung des Radarbildes.

Unangenehm sind häufig die „Festzielechos“. Sie entstehen durch Schornsteine, Gebäude, Berghänge, Bodenerhebungen oder Stahlkonstruktionen in Flugplatznähe, die ebenfalls Radiowellen zurückschlecken. Die Festzielechos liegen mitunter so dicht beieinander auf dem Bildschirm, daß Flugzeugechos von ihnen überdeckt werden. Man mußte daher dem Radargerät „bei-

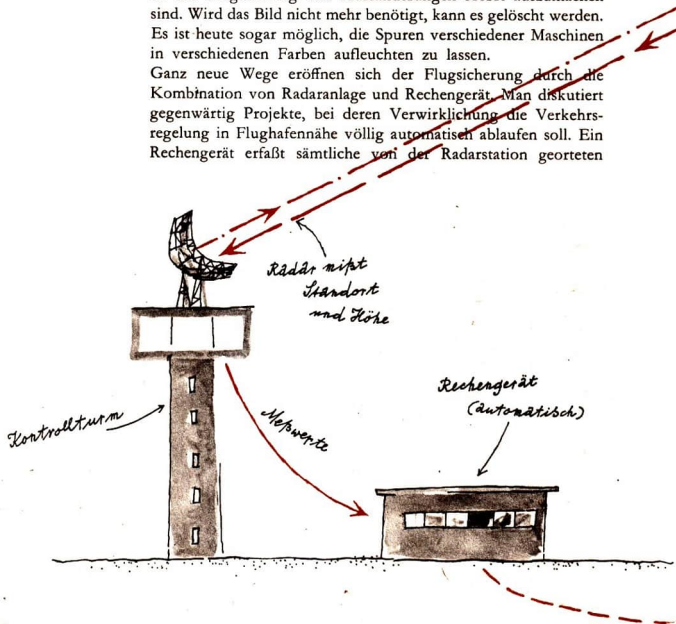
bringen“, zwischen festen und beweglichen Zielen zu unterscheiden. Das gelingt mit einem elektronischen Zusatzgerät, dessen Wirkung darauf beruht, daß bei beweglichen Zielen wieder der Dopplereffekt auftritt, während er bei Festzielen fehlt.

Die Flughöhen werden durch eine spezielle Antennenkonstruktion der Radargeräte bestimmt. Oft finden wir für diesen Zweck aber zusätzlich besondere Radaranlagen, die sogenannten Höhenfinder.

Trotzdem erfordert die Auswertung des Schirmbildes Übung, Erfahrung und Konzentrationsfähigkeit. Ständig ist man um technische Verbesserungen bemüht, die eine Fehldeutung des Radarbildes durch menschliches Versagen und die daraus entstehenden Gefahren verhindern helfen.

So existieren Radargeräte, bei denen das Schirmbild dreidimensional erscheint, damit anfliegende Maschinen auch unmittelbar in ihrer Flughöhe zu erkennen sind. Man setzt ferner „Speicherrohren“ ein, auf deren Schirm die Echozeichen für längere Zeit nachleuchten. Jedes Flugzeug zeichnet eine Spur seines Kurses, so daß Flugrichtung und Kursänderungen sofort auszumachen sind. Wird das Bild nicht mehr benötigt, kann es gelöscht werden. Es ist heute sogar möglich, die Spuren verschiedener Maschinen in verschiedenen Farben aufleuchten zu lassen.

Ganz neue Wege eröffnen sich der Flugsicherung durch die Kombination von Radaranlage und Rechengerät. Man diskutiert gegenwärtig Projekte, bei deren Verwirklichung die Verkehrsregelung in Flughafennähe völlig automatisch ablaufen soll. Ein Rechengerät erfaßt sämtliche von der Radarstation georteten



Maschinen und berechnet ihre Kurse, ihre Flughöhen und ihre Geschwindigkeit. An Hand dieser Werte stellt die Rechenanlage fest, wie die Maschinen fliegen müssen, um Kollisionsgefahren auszuschließen, Wartezeiten zu vermeiden und Brennstoff zu sparen. Das Ergebnis der Analyse wird in „Kommandos“ umgesetzt, die über Sender zum Flugzeug übermittelt werden. Dort werden sie entweder durch entsprechende Instrumente dem Piloten angezeigt oder aber sie betätigen unmittelbar die Flugzeugsteuerung.

Auf modern eingerichteten Flughäfen ist das Rundsichtgerät nicht die einzige Radaranlage. Für Schlechtwetterlandungen gibt es „Präzisionslanderadargeräte“. Sie führen ein Flugzeug bei schlechter Sicht bis in unmittelbare Bodennähe. Zwei Bildschirme zeigen den Flugweg – der eine beobachtet ihn von der Seite, der andere aus der „Vogelschau“. Der „Gleitweg“, den das Flugzeug für eine sichere Landung einhalten muß, ist zusammen mit Entfernungs- und Höhenmarken auf dem Bildschirm eingezeichnet.

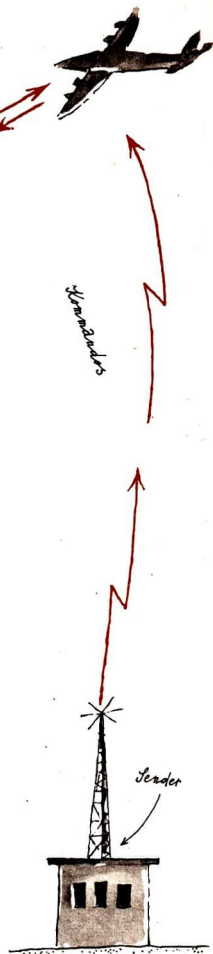
Aufgabe der Radarlotsen vor den Schirmen ist es, die Flugzeuge so zu führen, daß die zugehörigen Leuchtflecke auf dem vorgezeichneten Gleitweg absteigen. Zu diesem Zweck enthält der Pilot fortlaufend Kurs-, Höhen- und Korrekturangaben zugesprochen, und wenn er sich an diese Angaben hält und ihnen unverzüglich folgt, kommt die Maschine sicher auf den Boden. Auch dieses Verfahren, das an Piloten und Radarbeobachter hohe Anforderungen stellt, weil schon ein Mißverstehen, ein Versprechen oder ein zu langsames Reagieren eine Katastrophe verursachen können, wird sich eines Tages automatisieren lassen. Entsprechende Versuche verliefen recht hoffnungsvoll.

Erwähnen wir schließlich noch die Rollfeldradargeräte, Anlagen geringer Reichweite, mit denen der Bodenverkehr auf dem Flugfeld beobachtet wird. Auf den Schirmen dieser im Millimeterbereich arbeitenden Anlagen sind Flugzeuge, Fahrzeuge, ja sogar einzelne Personen zu unterscheiden.

Große Verkehrsmaschinen der Aeroflot und einiger anderer Fluggesellschaften sind ebenfalls mit Rundsichtanlagen ausgerüstet. Die Bordradargeräte sollen vor allem vor entgegenkommenden Maschinen und vor plötzlich auftauchenden Hindernissen warnen, zeigen aber auch Wirbelstürme und Gewitterfronten an.

Schwenkt man die Antenne eines Bordradargerätes so, daß die Erdoberfläche abgetastet wird, kann das Radargerät, auf dessen Bildschirm dann wieder eine „elektronische Landkarte“ entsteht, auch als Navigationshilfe dienen; denn Wasserläufe, Ortschaften und große Metallkonstruktionen sind im allgemeinen gut auszumachen. Während des zweiten Weltkrieges wurden auf diese Weise Bombenziele angefliegen.

Für die Zivilluftfahrt auf vorgeschriebenen Luftstraßen haben



elektronische Landkarten bisher jedoch nur geringe Bedeutung erlangen können. Dem Flugzeugführer stehen andere, sehr genau arbeitende Navigationseinrichtungen zur Verfügung. Er braucht sich nicht der Mühe zu unterziehen, das Radarbild auszuwerten, wenn er seinen Standort feststellen will. Bei Flügen über abgelegene, wenig besiedelte Gebiete – etwa während Flügen in den Polarzonen – haben sich solche Anlagen dagegen gut bewährt. Sie werden auch zur Suche nach Schiffswracks und Schiffbrüchigen verwendet.

Eine der wichtigsten Angaben für den Flugzeugführer ist die Flughöhe seiner Maschine. Die lange ausschließlich benutzten barometrischen Höhenmesser, deren Angaben auf dem mit der Höhe wechselnden Luftdruck beruhen, besaßen Mängel. Sie zeigten die Höhe über dem Startflughafen oder über dem Meeresspiegel an und wurden beim Start nach dem augenblicklichen Luftdruck eingestellt. Wollte der Pilot wissen, wie hoch er sich über dem Boden befand – und diese Angabe ist gerade wichtig –, mußte ihm das Gelände unter dem Flugzeug mit allen Senken und Erhebungen bekannt sein. Das aber war bei Kursabweichungen und bei Schlechtwetterflügen durchaus nicht immer der Fall.

Heute sind fast alle Flugzeuge mit einem „Funkhöhenmesser“ ausgestattet. Ein vereinfachtes Radargerät schickt Funkwellen zum Boden, fängt die Echowellen auf und berechnet daraus die Flughöhe. Es ist die Höhe „über Grund“, das heißt die tatsächliche Höhe über dem Boden. Damit entfallen die Fehler- und Gefahrenquellen des barometrischen Höhenmessers. Mit Geräten, die in ihrer Funktion dem Verkehrsradargerät ähneln, kann auch die Geschwindigkeit einer Maschine „über Grund“ gemessen oder ihre durch Wind verursachte Abdrift bestimmt werden.

Seit langem weiß man, daß Regenfälle, Gewitterwolken und Wirbelstürme das Radarbild beeinträchtigen. Beim „Wetterradar“ nutzt man diesen Effekt bewußt aus. Es ist ein Rundsichtgerät, das ständig einen Kreis von 400 km Durchmesser „absucht“. Die Zugstraßen von Stürmen und Gewittern, Luftmassengrenzen und Regengebiete sind deutlich zu erkennen. Man beobachtet das Wettergeschehen unmittelbar und muß es nicht erst aus den Meldungen zahlreicher Beobachtungsstationen rekonstruieren. Sturm- und Gewitterwarnungen können viel eher und außerdem präziser als bisher gegeben werden.

Auch Wetterballons, die zur Ermittlung von Windrichtung und -geschwindigkeit in verschiedenen Höhen aufgelassen werden, verfolgt man mit Radargeräten. Dadurch werden solche Messungen auch bei Nacht und bei bedecktem Himmel möglich.

Radargeräte für einen Einsatz auf der Erde müssen im Höchstfall eine Reichweite von wenigen Tausenden Kilometern haben. Das ist wenig gegenüber den Entfernungen, die in der astronomischen Forschung und bei der Ortung kosmischer Flugkörper zu überbrücken sind. Bereits während des zweiten Weltkrieges



empfang man Radarechos vom Mond. Später knüpfte man an diese Ergebnisse an und erhielt neben Mondechos auch Radarechos von der Venus über eine Entfernung von mehr als 40 Millionen km. Diese Versuche sind aus vielen Gründen wertvoll. Einmal zeigten sie, daß Funkverkehr noch auf derart große Entfernungen möglich ist. Das wurde inzwischen allerdings auch durch die sowjetischen und amerikanischen Raumsonden bestätigt. Zum anderen liefern die Echos vom Mond und von der Venus den Astronomen wichtige Daten. Radarechos können wertvolle Aufschlüsse über die Beschaffenheit und Gestalt der Mondoberfläche geben und zur Beantwortung der Frage beitragen, ob es auf dem Mond Reste einer Atmosphäre gibt oder nicht. Auch die Echos von der Venus gestatten Schlüsse auf die Atmosphäre dieses Planeten; Echos von der Sonne könnten dazu beitragen, manche Unklarheit über die Sonnenkorona zu beseitigen. Je weiter sich Radargeräte in den Raum vortasten, desto wertvollere Werkzeuge des Astronomen werden sie sein.

Jedermann weiß heute, daß die Flugbahnen von Satelliten und von Weltraumschiffen ständig von „Radaraugen“ verfolgt und vermessen werden. Diese Messungen sind deswegen unentbehrlich, weil der Flug der kosmischen Körper von der Erde aus überwacht und geleitet wird. Wenn eines Tages die Raumschiffe so groß sein werden, daß sie selbst Radargeräte an Bord führen, wird die Beobachtung von der Erde aus trotzdem nicht überflüssig sein. Jeder weitere Vorstoß in den Weltraum wird auch den Radartechnikern neue Aufgaben stellen; denn nur besonders leistungsfähige Geräte werden in der Lage sein, einen relativ so kleinen „Himmelskörper“ wie ein Raumschiff in den Weiten des Planetensystems zu entdecken und „festzuhalten“.

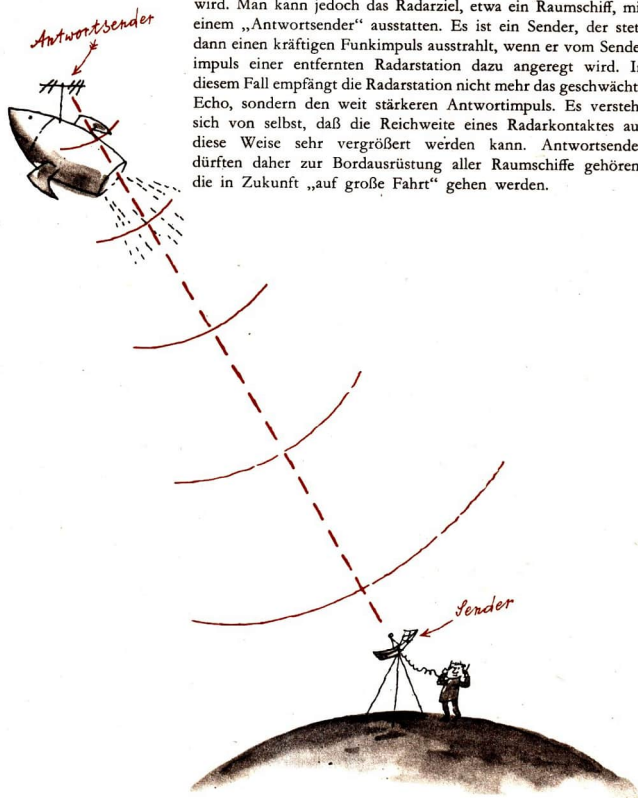
Es werden Radarstationen entstehen, deren Sender eine gewaltige Leistung aufweisen und deren Impulse entsprechend weit in den Raum dringen können. Die Empfindlichkeit der Empfänger muß gleichfalls erhöht werden. Auch sie bestimmt, wie wir wissen, die Reichweite einer Radarstation.

Mit den heute in der Radartechnik üblichen Mitteln würde man bei kosmischen Entfernungen allerdings bald an eine Grenze kommen. In jedem Empfänger entsteht ein gewisses Rauschen, das den Empfang schwächster Signale unmöglich macht. Will man es vermindern, muß man ganz neue technische Lösungen für den Empfängerbau suchen. Eine dieser Lösungen ist der „Molekularverstärker“ (kurz „MASER“ genannt). Er hat mit Röhren oder Transistoren überhaupt nichts gemein. Beim MASER werden Wechselwirkungen zwischen den elektromagnetischen Wellen und den Schwingungen der Atome und Moleküle zur Verstärkung ausgenutzt. Der Molekularverstärker „rauscht“ sehr wenig, erfordert aber in den gegenwärtigen Ausführungen erheblichen technischen Aufwand. Zu seinem Betrieb ist zum Beispiel flüssiges Helium erforderlich.



Die Entwicklung des MASER steckt noch in den Anfängen. Die Fachleute sind sich einig, daß der Molekularverstärker eines Tages ein wichtiges Hilfsmittel für den Empfang sehr schwacher Funksignale werden wird.

Die Wellen eines Radargerätes müssen die Entfernung zum Radarziel zweimal zurücklegen, einmal als Sendeimpuls und dann als Echo, wobei überdies ein nur geringer Bruchteil der das Ziel treffenden Energie zum Empfänger zurückgestrahlt wird. Man kann jedoch das Radarziel, etwa ein Raumschiff, mit einem „Antwortsender“ ausstatten. Es ist ein Sender, der stets dann einen kräftigen Funkimpuls ausstrahlt, wenn er vom Sendeimpuls einer entfernten Radarstation dazu angeregt wird. In diesem Fall empfängt die Radarstation nicht mehr das geschwächte Echo, sondern den weit stärkeren Antwortimpuls. Es versteht sich von selbst, daß die Reichweite eines Radarkontaktes auf diese Weise sehr vergrößert werden kann. Antwortsender dürften daher zur Bordausrüstung aller Raumschiffe gehören, die in Zukunft „auf große Fahrt“ gehen werden.



NAMEN- UND SACHWÖRTERVERZEICHNIS

A

Abendspitze 160
 Ablenkspannung 178
 Ablenkstufe 267
 Ablensystem 178
 Ablenkung, magnetische 179
 Ablenkung von Elektronen 176
 Abstimmmanzeige 256
 Abstimmmanzeigeröhre 256
 Abstimmkreis 248
 Abtasten 260
 Akkumulator 136
 Aluminiumgewinnung 132
 Ampere 6
 Ampère, A. M. 6
 Amplitudenmodulation 241
 Anlasserwiderstand 80
 Anode 170
 Anodenbatterie 170
 Anodenwiderstand 209
 Antenne 239, 246
 Antenne, abgestimmte 246
 Antenne, Blitzschutz der 61
 Antenne, unabgestimmte 247
 Anwendung der Röntgenstrahlen 174
 Anziehungskräfte, elektrische 47
 Arago, F. 97
 Arbeitskondensator 235
 Arbeitsspule 232
 Ardenne, M. v. 184
 Arrhenius, S. 130
 Astrophysik 188
 Asynchronmotor 83
 Audion 250

Aufladung von Treibriemen 53
 Aufnahmekopf 211
 Aufnahmetechnik 174
 Außenleiter 95
 Außenpolmaschine 93
 Austrittsarbeit 169
 automatische Läuferstrombegrenzung 226
 automatische Lautstärke-regelung 255
 automatische Scharf-abstimmung 256

B

Bahnstrom 85
 Bakterienzelle 140
 Balkentelegraf 61
 Bandgenerator 52
 Bandpaß 126
 Barlowsches Rad 86
 Basis 212
 Begleitton beim Fernsehen 267
 Belastungskurve 160
 Bell, A. G. 112
 Bellscher Hörer 112
 berührungslose Dickenmessung 102
 Berührungswiderstand 113
 Beschleunigungsmesser 102
 Besetzzeichen 121
 Bestimmung von Geschossgeschwindigkeiten 89
 Betatron 177
 Bewegungsrichtung der Elektronen 12

Bildelement 259
 Bildfängerröhre 263
 Bildgleichrichter 267
 Bildimpuls 265
 Bildröhre 177, 262
 Bildröhre, flache 268
 Bildsignal 263
 Bildverstärker 267
 Bildzerlegung 260
 Bimetallregler 43
 Bio-Solarzelle 140
 Blattdrucker 71
 Bleiakkumulator 136
 Blitz 55
 Blitzableiter 60
 Blitzgefahr 58
 Blitzschutz der Antenne 61
 Blitz, Wirkungen des 57
 Blockabschnitt 37
 Blocksystem 37
 Braun, F. 178
 Braunsche Röhre 178
 Bremsgitter 208
 Brennstoffelement 139
 Bügeleisen, elektrisches 42
 Bündelleiter 158
 Bürsten 77

C

Chappe, C. 61

D

Dampfturbine 143

Dauermagnet 27
 Dehnungsmeßstreifentechnik 9
 Dekadenzählröhre 220
 Demodulator 126, 249
 Detektorempfänger 249
 Dezimeterwellen 242
 Dickenmessung, berührungs-
 lose 102
 Dielektrikum 51, 234
 dielektrische Wärmebehand-
 lung 232
 Differentialtransformator 108
 Diode 171
 Dieselmotorkraftanlage 147
 Dispatcherverwaltung, zentrale
 168
 Dissoziation 130
 Doppelstrombetrieb 68
 Dopplereffekt 281
 Dreheiseninstrument 30
 Drehfeldgeber 110
 Drehfeld, magnetisches 83
 Drehkondensator 247
 Drehspeichersystem 75
 Drehstrom 82
 Drehstromasynchronmotor 83,
 85
 Drehstromgenerator 93
 Drehstromsynchronmotor 83
 Drehwähler 118, 220
 Drehzahlmesser, elektrischer 90
 Drehzahlregelung, elektro-
 nische 226
 Drehzahlwähler 227
 Dreieckschaltung 96
 Dreiphasensystem, verkettetes
 94
 Dreiphasenwechselstrom 82
 Drossel 102, 190
 Druckmessung 41
 Druck, osmotischer 133
 Durchflußmenge, Messung der
 40
 Durchleuchtungstechnik 174
 dynamometrisches Meßwerk 75
 Dynamotaschenlampe 92

E

Echolot 274
 Echoverfahren 273
 Edelgas-Fotozelle 187

Edison, T. A. 23, 141, 169
 Eingangsfrequenz 252
 Eingangskreis 252
 Einheitsmotoren 86
 Einkristall 196
 Einschaltstromstoß 196
 Eisenkern 89
 elektrische Anziehungskräfte 47
 elektrische Energie 11
 elektrische Heizung von
 Wohnräumen 21
 elektrische Klingel 33
 elektrische Kraftlinien 49
 elektrische Kraftübertragung
 155
 elektrische Leistung 12
 elektrische Linse 180
 elektrischer Drehzahlmesser 90
 elektrisches Bügeleisen 42
 elektrisches Feld 49
 elektrisches Ladungsbild 264
 elektrisches Ventil 171
 elektrisches Wechselfeld 234
 Elektrizität, statische 46
 elektrochemische Oberflächen-
 behandlung 131
 elektrodynamischer Laut-
 sprecher 74
 Elektrofilter 54
 Elektroherd 19
 Elektrolyt 130
 elektrolytischer Lösungsdruck
 133
 Elektrolytkupfer 131
 Elektromagnet 27
 elektromagnetische Kupplung
 35
 elektromagnetische Pumpe 76
 elektromagnetisches Ventil 34
 elektromagnetische Wellen 237
 Elektromagnetismus 26
 Elektromotor 76
 Elektronen 6
 Elektronen, Ablenkung von
 176
 Elektronen, Bewegungs-
 richtung der 12
 Elektronenemission 169
 Elektronen-Kleinmikroskop
 182
 Elektronenlaufzeit 244
 Elektronenlinse 180
 Elektronenmikroskop 181

Elektronenröhre 206
 Elektronenschleuder 177
 Elektronenstrahl als Werkzeug
 184
 Elektronenstrahlöfen 183
 Elektronenstrahlschweißen 184
 Elektronik 122, 216
 elektronische Drehzahl-
 regelung 226
 elektronische Füllhöhen-
 messung 221
 elektronische Längenmessung
 223
 elektronischer Trübungs-
 messer 221
 elektronische Zählgeräte 219
 Elektroden 19
 Elektrospeicherofen 22
 Elektrowärmegeräte 19
 Element, galvanisches 134
 Emissionsmikroskop 180
 Emitter 212
 Emittierkreis 212
 Empfangsgleichrichter 249, 253
 Endschalte 16, 89
 Endverstärker 240
 Energiebedarf, schwankender
 160
 Energie, elektrische 11
 Energie, Fernübertragung von
 154
 Entfernungsringe 279
 Erder 60
 Erdseil 159
 Erregermaschine 83, 96
 Erregerstrom 93
 Excitron 226

F

fahrbares Kraftwerk 147
 Fahrstraßensicherung 36
 Fangstange 60
 Faraday, M. 26, 50
 Faradayscher Käfig 49, 59
 Farbfernsehen 269
 Feld, elektrisches 49
 Feldmagnet 77
 Feld, magnetisches 26
 Ferngruppenwähler 129
 Fernmessung 39
 Fernschreibmaschine 69

Fernsehen, industrielles 269
 Fernsteuerung 39
 Fernübertragung von Energie 154
 Festzielecho 281
 Fingerscheibe 117
 flache Bildröhre 268
 fotoelektrische Steuereinrichtung 172
 Fotoelement 199
 Fotokatode 171
 Fotozelle 171, 211
 Franklin, B. 55
 Freisprechapparat 123
 Freistrahlturbine 150
 Frequenz 13, 238
 Frequenzband 125
 Frequenzgang des Verstärkers 256
 Frequenzkanal 241
 Frequenzmodulation 241
 Frühwarngerät 276
 Füllhöhenmessung, elektronische 221
 Füllstandkontrolle 39
 Fünferalphabet 69
 Funkhöhenmesser 284
 Funktionsblock 215

G

Gabelschaltung 125
 Gabelumschalter 116
 Galvani, L. 133
 galvanisches Element 134
 gasgefüllte Gleichrichterröhre 186
 Gasturbinenanlage 162
 Gauß, K. F. 63
 gedämpfte Schwingung 230
 gedruckte Schaltung 258
 Gegenkopplung 256
 Geißler, H. 188
 Geißlersche Röhre 188
 Germanium 194
 Germaniumgleichrichter 198
 Geschoßgeschwindigkeit, Bestimmung der 89
 Gesprächszähler 121
 Gewitter 55
 Gittervorspannung 210
 Gleichrichterröhre 171, 198

Gleichrichterröhre, gasgefüllt 186
 Gleichrichterunterwerk 165
 Gleichspannung 12
 Gleichstrom 12
 Gleichstromgenerator 97
 Gleichstrom-Höchstspannungsübertragung 165
 Gleichstromnebenschlusmotor 85, 224
 Gleisbild 37
 Gleisbildstellwerk 37
 Gleismagnet 38
 Glimmzylinder 190
 Glühlampe 23
 Goebel, H. 23
 GOELRO-Plan 142, 148, 164
 Gruppenwähler 120

H

Hafenradar 280
 Hakenumschalter 115
 halbleitende Stoffe 195
 Halbleiter 7, 193
 Halbleitergleichrichter 196
 Halbleiterkühlelement 204
 Halbleiterspitzengleichrichter 249
 Halbleitertechnik 17, 122
 Halbleiterthermoelement 203
 Handvermittlung 117
 Hauptamt 129
 Hauptschlusmotor 79
 Hauteffekt 233
 Hebdrehwähler 118
 Heißläufersuchanlagen 216
 Heißleiter 42, 196
 Heißwasserspeicher 23
 Heizkraftwerk 147
 Heizleiter 19
 Heizsonnen 19
 Hertz 13
 Hertz, H. 13
 Hintereinanderschaltung von Elementen 134
 Hochdruckanlagen 149
 Hochfrequenzherd 235
 Hochfrequenzverstärker 211, 251
 Höhenfinder 282
 Höhenregler 257

Höhengsonne 189
 Hohlleiter 244
 Hohlraumresonator 244
 Hohlleiterseil 158
 Hörer, Bellscher 112
 Hubmagneten 28
 Hystereseverluste 105

I

Ignitron 226
 Impulszentrale 277
 Induktionserscheinungen 87
 Induktionsgesetz 88
 Induktionsmaschine 91
 Induktionsofen 108
 Induktionsspule 116
 Induktionswirkungen 89
 induktiver Widerstand 101
 induktive Wärmebehandlung 232
 Industriegenerator 232
 industrielle Elektronik 216
 industrielles Fernsehen 269
 Infrarot-Dunkelstrahler 25
 Infrarot-Hellstrahler 24
 Infrarot-Raumheizung 25
 Infrarotstrahlung 24
 Infrarottunnel 25
 Innenpolmaschine 93
 Inselbetrieb 159
 internationales Verbundnetz 167
 internationale Zusammenarbeit 166
 Ionen 130, 186
 Ionentriebwerk 193
 Ionosphäre 187
 Isolator 7
 Isotope, radioaktive 175

J

Jacobi, M. H. 78

K

Kanalwähler 266
 Kapazität 51
 Kaplanturbine 150

Karibatsperre 151
 Kartenvergleichsgerät 280
 Katode 170
 Katode, indirekt geheizte 207
 Katodenstrahlröhre 178, 262
 Kernkraftwerk 152
 Kernreaktor 152
 Kerntransformator 106
 Kernverschmelzung, Energie aus 192
 Kernverschmelzungskraftwerk 154
 Kilokalorie 21
 Kilowatt 12
 Kilowattstunde 11
 Klangregistertasten 257
 Klappe 116
 Klappenschrank 116
 Kleinstakkumulator 138
 Kleinstkraftwerk 151
 Kleistsche Flasche 50
 Klingel, elektrische 33
 Klinke 116
 Klystron 245, 276
 Knotenamt 129
 Koaxialleitung 244
 Koaxialtube 127
 Kochplatte 19
 Kochsalzelektrolyse 132
 Kohledruckregler 46
 Kollektor 213
 Kollektorkreis 212
 Kometenschweif 188
 Kommutator 77, 97
 Kondensator 51, 145
 Kontaktfunken 16
 Kontaktthermometer 44
 Kontrastmittel 174
 Koordinatenschalter 122
 Koronaeffekt 158
 Koronaverluste 166
 Kraftlinien, elektrische 49
 Kraftlinien, magnetische 26
 Kraftübertragung, elektrische 155
 Kraftwerk, fahrbares 147
 Kriechströme 158
 Kristalldetektor 249
 Kühlelement 204
 Kühlung (Transformator) 106
 Kupferoxydulgleichrichter 198
 Kupplung, elektromagnetische 35

Kurbelinduktor 115
 Kurzschlußläufer 83
 Kurzwellen 242

L
 Ladungsbild, elektrisches 264
 Längenmessung, elektronische 223
 Langwellen 242
 Lasthebemagnet 28
 Lastverteiler 163
 Läufer 77
 Läuferstrombegrenzung, automatische 226
 Lauffener Übertragung 155
 Laufzeit der Elektronen 244
 Lautsprecher 73, 250
 Lautsprecher, elektrodynamischer 74
 Lautsprecher, permanent-dynamischer 74
 Lautstärkeregelung 254
 Lautstärkeregelung, automatische 255
 Leidener Flasche 50
 Leistung, elektrische 12
 Leiter 7
 Leiterbündel 158
 Leitungselektronen 7, 194
 Leitungswähler 120
 Lenz, F. E. 98
 Lenzsche Regel 98, 229
 Leuchtstofflampe 189
 Lichtbogen 16
 Lichtschranke 217
 Linearbeschleuniger 177
 Linse, elektrische 180
 Linse, magnetische 180
 Locher 67
 Löcherstrom 195
 Lochstreifensender 67
 Lodygin, A. N. 23
 Lokomotive, 50-Hz- 85
 Lösungsdruck, elektrolytischer 133
 Lufterhitzer 19

M
 magisches Auge 256

Magnet 26
 Magnetbrenslüfter 35
 magnetische Ablenkung 179
 magnetische Aufhängung 29
 magnetische Kraftlinien 26
 magnetische Linsen 180
 magnetisches Feld 26
 magnetische Streuung 104
 magnetisches Drehfeld 83
 magnetische Wirkungen 26
 magnetische Zielkennzeichnung 90
 Magnetron 244, 276
 Magnettonverfahren 211
 Manteltransformator 106
 MASER 285
 Maxwell, J. C. 237
 Megawatt 12
 MHD-Generator 191
 Meißner, A. 250
 Messung der Durchflußmenge 40
 Meßwandler 107
 Meßwerk, dynamometrisches 75
 Metallabscheider 28
 Mikrophon 113, 241
 Mischröhre 253
 Mischstufe 252
 Mittelwellen 242
 Modulation 241
 Modulator 126
 Molekularelektronik 215
 Molekularmagneten 27
 Molekularverstärker 285
 Morgenspitze 160
 Morse, S. 63
 Morsealphabet 63
 Morseapparat 64
 Morsetaste 64
 Motoren, polumschaltbare 84
 Motorwähler 118

N
 Nachtstrom 22
 Natriumdampfampe 189
 Natronlauge, Gewinnung von 131
 Nebenschlußmotor 79
 negative Elektrizität 8
 n-Germanium 195

Nichtleiter 7
 Nickel-Kadmium-Akku-
 mulator 138
 Niederdruckanlagen 149
 Niederspannungsleuchtstoff-
 lampe 189
 Niederschlagselektrode 54
 Nipkow, P. 261
 Nipkowscheibe 260
 npn-Transistor 212
 Nulleiter 95
 Nummernschalter 117

O

Oberflächenbehandlung,
 elektrochemische 131
 Oberflächenhärtung 234
 Oersted, H. C. 26
 offener Schwingungskreis 236
 Öffnungsfunken 101
 Ohm 8
 Ohm, G. S. 8
 Ohmsches Gesetz 10
 Ölkühlung 106
 Ortsbatterie 116
 osmotischer Druck 133
 Oszillator 252
 Oszillatorfrequenz 252
 Oszillograph 177

P

Parabolantenne 243
 Parallelschaltung von Ele-
 menten 134
 Peilstrich 280
 Pentode 208
 Periode 13
 permanent-dynamischer Laut-
 sprecher 74
 p-Germanium 195
 Phasen 82
 Plasma 187
 Plasmaphysik 187
 pn-Kristall 197
 pnp-Transistor 212
 Polarisation 135
 Polarlicht 188
 Polpaar 96
 Polrad 96

Polumschaltbare Motoren 84
 Popow, A. S. 238
 positive Elektrizität 8
 Präzisionslanderadargerät 283
 Primärspule 103
 Prinzip der Regelung 44
 Programmgeber 227
 Programmsteuerung 15
 Pumpe, elektromagnetische 76
 Pumpspeicherung 162
 Pumpspeicherwerk 162

Q

Quecksilberdampfgleichrichter
 187

R

RADAR 273
 Radarbake 280
 Radarempfänger 275
 Radargerät 273
 Radarkarte 279
 Radarreflektor 279
 Radarsender 275
 Radartechnik 245
 Radarziel 275
 radioaktive Isotope 175
 Ramsay, W. 152
 Raumladung 170
 Raumschiffantrieb 192
 Rauschen 253
 Recorder 67
 Regelanlage 45
 Regelung, Prinzip der 4
 Regelung, stetige 45
 Reglerbügeleisen 42
 Reibungselektrizität 47
 Reis, Ph. 111
 Rekombination 187
 Relais 30
 Relaisstation 243
 Reservehaltung 159
 Restmagnetismus 97
 Richmann, G. 55
 Richtfunkstrecken 242
 Rohrbahnkraftwerk 151
 Röhrengenerator 231, 239
 Rohrpostanlagen, Steuerung
 von 90

Röntgen, W. C. 172
 Röntgenreihenuntersuchungen
 174
 Röntgenröhre 173
 Röntgenstrahlen 172
 Rückkopplungsaudion 250
 Rückkopplungsschaltung 232
 Rückmeldeschaltung 34
 Rußbatterie 115
 Ruf- und Signalmaschine 121
 Rundsichtgerät 278

S

Satellit 201
 Sägezahnstrom 262
 Schaltbausteine 18
 Schalter 13
 Schalterdioden 17
 Schaltuhr 14
 Schaltung, gedruckte 258
 Schaltransistor 17
 Scharfabstimmung, auto-
 matische 256
 Schienenkontakt 36
 Schiffsradargerät 279
 Schilling von Canstatt, P. 62
 Schirmgitter 208
 Schmelzflußelektrolyse 132
 Schnellmorsegerät 66
 Schrittspannung 58
 Schutzgaskontakt 122
 schwankender Energiebedarf
 160
 Schwingungsschaltung 74
 Schwingung, gedämpfte 230
 Schwingungskreis 229, 247
 Schwingungskreis, offener 236
 Schwundausgleich 255
 Sekundärelektronen 171, 208
 Sekundärelektronenverviel-
 facher 172
 Sekundärspule 104
 Selbstblocksystem 37
 Selbstinduktion 100
 Selbstinduktionsspannung 101
 Selbstwählanlage 119
 Selbstwählfernverkehr 128
 Selengleichrichter 198
 Semjonow, N. 6
 Sender, 240
 Senderverstärker 240

Sicherungsanlage 15
 Sicherungsautomat 32
 Sichtgerät 277
 Siliziumfotoelement 199
 Siliziumgleichrichter 198
 Sinuskurve 12
 Skineffekt 233
 Sonnenbatterie 198
 Sonnenenergie 198
 Sonnengroßkraftwerke 202
 Spannung 8
 Spannungserzeuger 8
 Spannungsquelle 8
 Spannungsverstärkung 208
 Speicherröhre 282
 Sperröhre 277
 Sperrschicht 197
 spezifischer Widerstand 9
 Spitzenbedarf 161
 Spitzenbelastung 202
 Spitzenbelastung und Verbund-
 betrieb 164
 Spitzendiode 249
 Spitzenkraftwerk 162
 Spitzenwirkung 50
 Spitzenzeiten 161
 Sprühelektrode 54
 Sprühenladung 50
 Sputnik 198
 Stahllakkumulator 138
 Ständer 78, 93
 statische Elektrizität 46
 Staubexplosion 54
 Steinheil, K. A. 63
 Stereo-Schallplattenwieder-
 gabe 257
 Stereoübertragung 257
 Sternpunkt 95
 Sternpunktleiter 95
 Sternschaltung 95
 stetige Regelung 45
 Steuereinrichtung, foto-
 elektrische 172
 Steuergitter 206
 Steuerquarz 240
 Steuerquittungsschalter 34
 Steuersender 240
 Steuerung von Rohrpost-
 anlagen 90
 Stoffe, halbleitende 195
 Störstellenleitung 195
 Strahlendosismesser 218
 Streifendrucker 71

Streuung, magnetische 104
 Stromkreis 7
 Stromrichtung, technische 12
 Stromstoßscheibe 117
 Stromtor 224
 Stromversorgungsteil 210
 Stromwärme 18
 Summer 33
 Super 251
 Superheterodynempfänger 251
 Synchronisierimpulse 267
 Synchronisierung 265
 Synchronmotor 81

T

Tachometergenerator 92, 227
 Talsperrenkraftwerk 150
 Tauchsieder 19
 technische Stromrichtung 12
 Teilnehmer-Fernschreibnetz 72
 Telegraph 61
 Telefon 111
 TELEX-Netz 72
 Temperaturabhängigkeit des
 Widerstandes 9
 Temperaturfühler 42, 203
 Temperaturmessung 41
 Thermistor 42, 196
 Thermoelement 42, 202
 Thermogenerator 204
 Thyatron 224
 Thyatronsteuergerät 227
 Tiefenregler 257
 Tonbandgerät 211
 Tonfilm 211
 Tonfrequenzverstärker 210
 Topfkreis 244
 Trägerfrequenz 126
 Trägerfrequenzgenerator 126
 Trägerfrequenztechnik 126
 Transformator 103, 157
 Transformatorkern 105
 Transformator (Kühlung) 106
 Transistor 212
 Translog-Baustein 18
 Treibriemen, Aufladung von 53
 Triode 206
 Trockenanlagen 25
 Trockenelement 135
 Trockentunnel 25
 Trommelanker 78

Trübungsmesser, elektro-
 nischer 221
 Turbogenerator 96, 144
 Typendrucktelegraf 67

U

Übergangswiderstand 20
 Überlagerungsempfänger 251
 Überlagerungstelegrafie 69
 Übersprechen 124
 Überstrom-Schutzschalter 33
 Übertragungsspannung 157
 Ultrakurzwellen 242
 Ultrakurzwellenempfang 254
 Universalmotor 80
 Unterseekabel 66
 Unterwasserfernsehen 271
 Unterwasserverstärker 128

V

Vakuummetallurgie 183
 Van de Graafscher Generator
 52
 Ventil, elektrisches 171
 Ventil, elektromagnetisches 34
 Verbundbetrieb 159
 Verbundbetrieb und Spitzen-
 belastung 164
 Verbundnetz, internat. 167
 Verbundsystem 164
 verkettetes Dreiphasensystem
 94
 verkettete Wechselströme 82
 Verstärker 209
 Verstärker, Frequenzgang des
 256
 Verstärkerröhre 124, 206
 Vertikalablenkung 263
 Vielkathodenröhre 221
 Volt 8
 Volta, A. 8, 133
 Vorausanzeige 280
 Vorspannung, negative 210
 Vorwähler 120

W

Wahlbetrieb 117

Wähler 118
Wahlschienen 69
Wanderfeldröhre 245
Wärmeaustauscher 153
Wärmebehandlung, dielektrische und induktive 232
Wärmekraftwerk 143
Wasserkraft 148
Wasserkraftwerk 148
Watt 12
Wattstunde 11
Weber, W. E. 63
Wechselfeld, elektrisches 234
Wechselrichterunterwerk 166
Wechselspannung 12
Wechselspannungsgenerator 92
Wechselstrom 12
Wechselströme, verkettete 82
Wechselstrommotor 80
Wechselstromtelegrafie 68
Wechselstromwecker 115
Wechselstromwiderstand 101
Wehnelt, A. 263
Wehneltzylinder 263, 267

Wellen, elektromagnetische 237
Wellenlänge 238
Werbeleuchtröhre 189
Wetterradar 284
Widerstand 8
Widerstand, induktiver 101
Widerstandsschweißen 20
Widerstand, spezifischer 9
Widerstandsthermometer 41
Widerstand, Temperaturabhängigkeit des 9
Wiedergabekopf 211
Wirbelströme 98, 232
Wirbelstromdämpfung 99
Wirbelstromtachometer 99
Wirkungen, magnetische 26
Wohnräume, elektrische Heizung von 21
Würgeverbindung 122

X

X-Strahlen 172

Z

Zählgeräte, elektronische 219
Zählröhre 220
Zählwerk, elektromagnetisches 220
Zeilenablenkung 263
Zeilenimpuls 265
Zeilenzahl 261
Zentimeterwellen 242
Zentralbatterie 116
zentrale Dispatcherverwaltung 168
Zink-Kohle-Element 134
Zonenschmelzen 233
Zündspannung 186, 225
Zusammenarbeit, internationale 166
Zweipunktregler 45
Zwangsbremse 38
Zwischenbild 181
Zwischenfrequenz 252
Zwischenfrequenzverstärker 252, 267

INHALT

Wir schalten ein

- 5 Elektrizität – nichts Besonderes?
- 6 Elektronen, Spannung, Widerstand
- 13 Die Kontakte schließen sich
- 16 Lebensdauer – Betriebssicherheit

Hitze ohne Flammen

- 18 Vom Tauchsieder zur Baustelle
- 20 Dürfen wir – oder dürfen wir nicht?
- 23 Infrarot: Wärme aus der Glühlampe

Elektromagneten: Kraft durch Elektrizität

- 26 Nur ein stromdurchflossener Draht . . .
- 28 Allerlei Anziehendes und Abstoßendes
- 30 Der Magnet und die Kontakte

Fernbedienen – Fernmessen – Regeln

- 33 Und wieder Elektromagneten . . .
- 38 Wie voll ist der Tank?
- 42 Regeltechnik auf dem Bügelbrett

Elektrotechnik von gestern?

- 46 Das Elektrizitätswerk in der Postkarte
- 51 Elektronen im Fahrstuhl
- 55 Es blitzt und donnert
- 58 . . . doch die Buchen sollst du suchen!

Von Morse bis TELEX

- 61 Punkte, Striche, Buchstaben
- 66 Schneller, immer schneller
- 69 Telegrafieren per Schreibmaschine

Elektromotoren – Muskeln des 20. Jahrhunderts

- 73 Magneten unter sich

- 76 Kraftmaschine dringend gesucht!
- 80 Im Drehfeld
- 84 Besser, billiger, einfacher

Was Faraday nicht wissen konnte

- 87 Eine Spule und ein Magnet
- 91 Und so gewinnt man Elektroenergie
- 93 Der Drehstromgenerator
- 97 Wirbelströme
- 100 Von Windung zu Windung

Spannungen nach Maß

- 103 Spulen und ein Eisenkern
- 107 Transformatoren-Allerlei

Stimmen in die Ferne

- 111 Es fing bescheiden an
- 116 Das Telefonieren wird automatisiert
- 123 120 auf einen Streich

Elektrochemie – immer wichtiger

- 129 Unsichtbare Wanderer
- 133 Zink, Kohle, Salmiak
- 136 Der „Akku“
- 138 Ein neuer Weg: das Brennstoffelement

Strom aus Lübbenau und Bratsk

- 141 Der große Hunger
- 143 Das Wärmekraftwerk liegt vorn
- 147 Strom aus „weißer Kohle“
- 151 Wenn die Kohle knapp wird

Energie für Kontinente

- 154 Die Spannungen steigen
- 159 Das Netz ist geknüpft
- 164 Strom über die Grenzen

Elektronen unterwegs

- 169 Sprung ins Vakuum
- 172 „X-Strahlen“
- 175 Elektronen auf krummen Wegen
- 180 Blick in den Mikrokosmos
- 183 Der Elektronenstrahl als Werkzeug

Das Plasma hilft uns weiter

- 185 Lawine im Glasrohr
- 188 Viele Formen – viele Farben
- 190 MHD-Generator und Ionenrakete

Vielseitige Halbleiter

- 193 Leitungselektronen bekommen Gesellschaft
- 196 Widerstände und Gleichrichter auf neue Art
- 198 Halbleiter im Strahlenkegel
- 202 Spannungsquelle – Kühlschrank – Ofen

Kleine Ursache – große Wirkung

- 205 Die Diode wird umgebaut
- 208 Ein Verstärker stellt sich vor
- 211 Halbleiter können das auch

Elektronen helfen der Volkswirtschaft

- 216 Vorsicht! Gefahr!
- 218 Zählen, kontrollieren, messen
- 223 Motoren werden geregelt

Die Wellen des Heinrich Hertz

- 228 Elektronen schaukeln
- 230 Die Röhre kommt hinzu
- 232 Wärme – induktiv und dielektrisch
- 236 Wirkung in die Ferne
- 239 Ein Sender meldet sich
- 242 Kürzer, immer kürzer

Sie hören den Deutschlandsender

- 246 Vom Detektor . . .
- 250 . . . über das Rückkopplungsaudion
- 251 . . . zum Super
- 254 Der Empfänger bekommt Niveau

Sehen wir fern!

- 259 Stückchen für Stückchen
- 262 Wäre die Braunsche Röhre nicht . . .
- 265 Vom Drum und Dran
- 268 Fernsehen morgen
- 269 Der elektronische Sherlock Holmes

RADAR – Wegweiser und Wächter

- 273 „Augen so groß wie ein Kirchturm“
- 278 Auf der Erde . . .
- 281 . . . in der Luft und im Weltraum
- 287 Namen- und Sachwörterverzeichnis