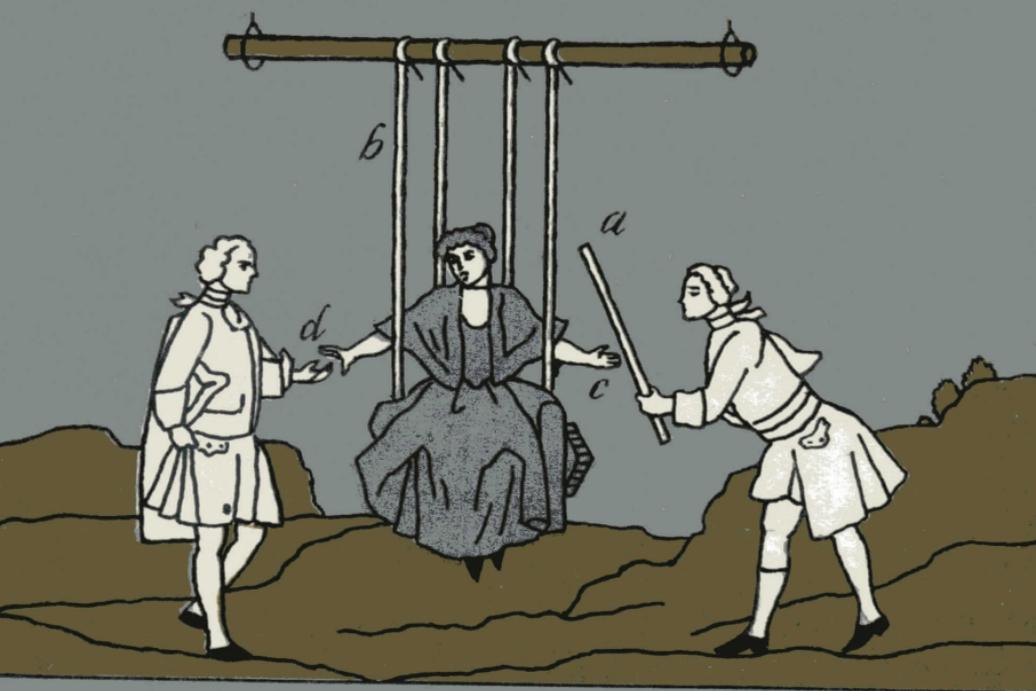


Physik für alle Band 3

A. I. Kitaigorodski



ELEKTRONEN



   
Physik für alle Band 3

---

A.I. Kitaigorodski

# ELEKTRONEN

Verlag MIR Moskau  
Urania-Verlag  
Leipzig • Jena • Berlin

Titel der Originalausgabe:

А. И. Китайгородский

«Физика для всех»

Издательство «Наука», Москва 1979 г.

Aus dem Russischen übersetzt und für die deutsche Ausgabe  
wissenschaftlich bearbeitet von Leo Korniljew

Best.-Nr. 6044

Gemeinschaftsausgabe des Verlages MIR Moskau und des Urania-  
Verlages Leipzig/Jena/Berlin

© 1982 Verlag MIR Moskau und Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

1. Auflage

Einband: I. Krawzow

Satz und Druck: UdSSR

ISBN 3-7614-0569-3

VVA-Nr. 33500569

# Vorwort

Im ersten Band der „Physik für alle“ haben Sie die Gesetzmäßigkeiten der Bewegung großer Körper sowie die Gravitationskräfte kennengelernt. Der zweite Band war der molekularen Stoffstruktur und der Molekülbewegung gewidmet.

Im vorliegenden dritten Band wollen wir die elektrische Stoffstruktur, die elektrischen Kräfte und das elektromagnetische Feld betrachten.

Im nächsten, d. h. vierten, Band wird von den Photonen, der Struktur des Atomkerns und von Kernkräften die Rede sein.

Alle vier Bände enthalten Angaben über sämtliche Grundbegriffe und -gesetze der Physik. Die darin enthaltenen konkreten Fakten wurden in der Absicht ausgewählt, den Inhalt der physikalischen Gesetze so klar wie möglich zu veranschaulichen, die für die Physik charakteristischen Wege der Betrachtung von Erscheinungen zu demonstrieren, eine Vorstellung vom Verlauf der Entwicklung der Physik zu geben und schließlich in den allgemeinsten Zügen zu zeigen, daß die Physik zugleich das Fundament aller Naturwissenschaften und der Technik ist.

Vor den Augen nur einer Generation hat sich das Antlitz der Physik verändert. Aus vielen Kapiteln der Physik wurden selbständige Gebiete von außerordentlicher anwendungstechnischer Bedeutung. Die Grundlagen der Physik zu kennen sollte heute selbstverständlich sein, und vorliegende Bände sind eine Physik *für alle*, mit deren Hilfe Vertreter der unterschiedlichsten Berufe eine

Vorstellung von den Prinzipien der Physik erhalten und zugleich erfahren können, was es in den letzten Jahrzehnten Neues innerhalb der physikalischen Wissenschaften gegeben hat. Natürlich wird diese Reihe vor allem Lehrer und physikinteressierte Schüler anziehen.

Ich möchte den Leser daran erinnern, daß er kein Lehrbuch, sondern ein populärwissenschaftliches Werk in den Händen hält. Bei einem Lehrbuch wird der Umfang der Darlegung von den jeweiligen Verständnisschwierigkeiten diktiert. Ein populärwissenschaftliches Buch folgt dieser Regel nicht und ist daher kapitelweise unterschiedlich faßlich. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist, daß wir eine ganze Reihe althergebrachter Kapitel sehr gerafft darstellen können, um so auf Kosten alten Stoffs Platz für neuen zu erhalten.

Nun zum Band „Elektronen“. Die Notwendigkeit, Definitionen der einfachsten Begriffe zur Beschreibung elektrischer Eigenschaften in Erinnerung zu bringen, habe ich für eine etwas eigenwillige Darstellungsform genutzt, indem ich versuchte, eine Vorstellung vom phänomenologischen Weg in der Physik zu geben.

Zwei von sechs Kapiteln sind der angewandten Physik gewidmet. Die Elektrotechnik ist dabei als Konspekt dargestellt. Jede detaillierte Beschreibung dieses Gegenstandes hätte Zeichnungen und schematische Darstellungen erfordert. Wir hielten es deshalb für besser, uns lediglich auf die wichtigsten Prinzipien der Elektrotechnik sowie auf Tatsachen zu beschränken, die einfach jeder kennen muß.

Genauso verhält es sich mit dem Kapitel Elektronik. Wir beschränkten uns auf die Geschichte und streiften die Grundlagen der Elektronik im „Eilzugstempo“.

*A. I. Kitaigorodski*

# Inhalt

## Vorwort 5

### 1. Elektrizität 9

Der elektrische Strom 9. Ruhende Elektrizität 17. Auf der Suche nach der Ausgangsbasis 27. Wie sich die Elektrizitätslehre entwickelte 30.

### 2. Die elektrische Struktur des Stoffs 33

Die kleinste Elektrizitätsmenge 33. Ionenströme 35. Der Elektronenstrahl 37. Der Millikan-Versuch 40. Das Atommodell 46. Die Quantelung der Energie 49. Das Periodensystem der Elemente nach Mendelejew 51. Die elektrische Struktur der Moleküle 54. Molekülstruktur und die Zahl Acht 59. Dielektrika 65. Die Leitfähigkeit der Gase 76. Die selbständige Entladung 82. Stoff im Plasmazustand 88. Metalle 92. Der Elektronenaustritt bei Metallen 98. Thermoelektrische Erscheinungen 100. Halbleiter 102. Der *p-n*-Übergang 109.

### 3. Elektromagnetismus 114

Das Maß des Magnetfeldes 114. Wirkungen des homogenen Magnetfeldes 122. Wirkungen des inhomogenen Magnetfeldes 128. Amperesche Ströme 130. Die Elektronenwolke des Atoms 135. Die magnetischen Momente von Partikeln 138. Die elektromagnetische Induktion 145. Die Richtung des Induktionsstroms 149. Zur Entdeckung des Gesetzes der elektromagnetischen Induktion 153. Induzierte Wirbelströme 155. Der Induktionsstoß 158. Die magnetische Suszeptibilität von Eisen 159. Domänen 164. Diamagnetische und paramagnetische Stoffe 166. Das Magnetfeld der Erde 169. Magnetfelder der Sterne 173.

#### **4. Ein Konspekt der Elektrotechnik 176**

Die sinusförmige EMK 176. Transformatoren 186. Maschinen, die elektrischen Strom erzeugen 190. Elektromotoren 196.

#### **5. Das elektromagnetische Feld 204**

Die Maxwellschen Gleichungen 204. Mechanische Strahlungsmodelle 212. Die beiden Aspekte des elektromagnetischen Feldes 219. Der fotoelektrische Effekt 224. Die Hertzschen Versuche 227. Zur Klassifikation elektromagnetischer Strahlung 236.

#### **6. Das Radio 240**

Einige Seiten Geschichte 240. Die Triodenröhre und der Transistor 249. Sender 254. Empfänger 257. Über die Ausbreitung von Funkwellen 260. Das Radar 263. Das Fernsehen 267. Mikroelektronik 271.

# I. Elektrizität

## Der elektrische Strom

Am Beispiel der Elektrizitätslehre kann man den physikinteressierten Leser mit dem sogenannten phänomenologischen Weg zur Erforschung der Natur bekanntmachen. Das Wort „Phänomen“ heißt soviel wie „Erscheinung“. Der Weg aber, von dem hier die Rede ist, besteht im folgenden. Der Forscher zeigt kein Interesse für die „Natur der Dinge“, er benutzt die Worte nur, um über Tatsachen zu berichten. Sein Ziel ist nicht die „Erklärung“, sondern nur die Beschreibung der Erscheinungen. Nahezu alle Termini, die er dabei einführt, haben für ihn nur dann einen Sinn, wenn man ein Verfahren zur zahlenmäßigen Abschätzung der betreffenden Begriffe angeben kann.

Um die verbale Faktendarstellung zu erleichtern, werden einige Hilfsbezeichnungen eingeführt. Freilich ist ihre Rolle durchaus zweitrangig; ebensogut könnte man andere Bezeichnungen vorschlagen oder einfach von „etwas“ sprechen.

Die phänomenologische Methode spielt in der Naturwissenschaft eine außerordentlich große Rolle. Elektrische Erscheinungen sind denkbar geeignet, um dem Leser das Wesen dieser Methode verständlich zu machen.

Ich werde am Ende dieses Kapitels kurz darüber berichten, in welcher Reihenfolge sich die Ereignisse tatsächlich entwickelten; zuerst jedoch die Darstellung eines idealisierten Schemas für die Entwicklung einer phänomenologischen Theorie elektrischer Erscheinungen. Denken wir an Charles Augustin de Coulomb (1736—1806), Alessandro Volta (1745—1827), Georg Simon Ohm

(1789—1854), André Marie Ampère (1775—1836), Hans Christian Ørsted (1777—1851), Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804—1865) und viele andere große Wissenschaftler und vereinigen sie in einer einzigen Person. Stellen wir uns vor, dieser Forscher sei mit der heute in der Wissenschaft üblichen Denkweise und Terminologie vertraut. Vom Standpunkt dieses Forschers aus soll unsere Darstellung erfolgen.

Er soll seine Entwicklung einer phänomenologischen Theorie der Elektrizität mit einer aufmerksamen Betrachtung des Akkumulators beginnen. Zuerst einmal stellt er fest, daß der Akkumulator zwei „Pole“ hat. Berührt er beide gleichzeitig mit den Händen, erfährt er sofort, daß dies besser zu unterlassen sei. Nach diesem Versuch entsteht folgender Gedanke: Etwas ist durch den Körper hindurchgegangen. Nennen wir dieses „Etwas“ Elektrizität.

Mit aller gebotenen Vorsicht beginnt der Forscher nun, die beiden Pole des Akkumulators durch verschiedene Drähte, Stäbe und Schnüre miteinander zu verbinden. Dabei gelangt er zu folgender Feststellung: Gegenstände, die mit den Polen verbunden werden, erwärmen sich manchmal stark, manchmal schwach; in einigen Fällen bleibt die Erwärmung aus.

Nach Auswahl geeigneter Worte zur Beschreibung der hier gemachten Entdeckungen entschließt sich der Forscher zu folgender Aussage: Verbinde ich die Pole durch einen Draht, wird dieser von Elektrizität durchflossen. Ich will diese Erscheinung elektrischen Strom nennen. Die Erfahrung lehrt, daß sich verschiedene Gegenstände auf unterschiedliche Art und Weise erwärmen. Diejenigen unter ihnen, die sich schlecht erwärmen, „leiten“ die Elektrizität offenbar schlecht oder setzen dem fließenden Strom einen großen Widerstand entgegen. Man kann sie Isolatoren oder Dielektrika nennen.

Nun versucht es der Forscher mit Flüssigkeiten. Es zeigt sich, daß sich die verschiedenen Stoffe auch hier nicht

eindeutig verhalten. Ihm gelingt eine interessante Entdeckung: Bei einer Lösung von Kupfersulfat und Kohleelektroden (die Bezeichnung Elektroden erhalten die an den Polen befestigten Gegenstände) stellt er an einem der Kohlenstäbe einen rötlichen Kupferniederschlag fest.

Der Forscher ist sich nun sicher, daß die Erscheinung, die er untersucht, mit dem Fließen eines Fluidums im Zusammenhang steht. Es ist sinnvoll, von einer Stromrichtung zu sprechen. Wir einigen uns also darauf, die Elektrode, an der sich das Kupfer niederschlägt, mit dem Minuszeichen, die andere mit dem Pluszeichen zu markieren. Da es zu umständlich wäre, jedesmal „negative Elektrode“ bzw. „positive Elektrode“ zu sagen, führt man dafür die Termini *Katode* und *Anode* ein. Der Strom fließt von Plus nach Minus, d. h. von der *Anode* zur *Katode*.

Damit ist die Entdeckung jedoch noch längst nicht ausgeschöpft. Unser Wissenschaftler stellt nämlich fest, daß je Sekunde immer die gleiche Masse Kupfer an der *Katode* abgeschieden wird. Offenbar sind die Kupferatome Träger des elektrischen Fluidums. Darum bringt der Forscher zwei neue Termini in Umlauf. Im ersten geht er davon aus, daß die Kupfermasse  $M$  der durch den Kreis geflossenen Elektrizitätsmenge  $q$  proportional ist, d. h., er führt die Definition

$$q = kM$$

ein, worin  $k$  ein Proportionalitätsfaktor ist. Und zum zweiten definiert er die im Kreis je Zeiteinheit  $t$  fließende Elektrizitätsmenge als *Stromstärke*  $I$ :

$$I = \frac{q}{t}.$$

Dadurch wurde ein bedeutender Fortschritt erzielt. Der Forscher kann den Strom nun durch zwei Meßgrößen kennzeichnen: durch die Wärmemenge, die je Zeiteinheit in

einem bestimmten Abschnitt des Stromkreises freigesetzt wird, und durch die Stromstärke.

Damit ergibt sich eine neue Möglichkeit: Der Forscher kann durch verschiedene Stromquellen erzeugte Ströme miteinander vergleichen. Gemessen werden die Stromstärke  $I$  und die Energie  $Q$ , die in Form von Wärme durch ein und dasselbe Leiterstück freigesetzt wird. Durch Wiederholung des Versuchs mit verschiedenen Leitern findet der Forscher heraus, daß das Verhältnis von Wärmemenge zu der den Leiter durchfließenden Elektrizitätsmenge bei unterschiedlichen Stromquellen verschieden ist. Für dieses Verhältnis muß nun nur noch ein geeigneter Terminus „erfunden“ werden. Man wählt das Wort „Spannung“. Je höher die Spannung, um so mehr Wärme wird freigesetzt.

Wir bezeichnen die Spannung, so wie es heutzutage üblich ist, mit dem Buchstaben  $U$  und erhalten:

$$U = \frac{Q}{q} \quad \text{oder} \quad Q = \frac{U}{t}$$

Die ersten Schritte sind zurückgelegt. Es wurden zwei Erscheinungen festgestellt: Beim Durchgang durch bestimmte Flüssigkeiten scheidet der Strom bestimmte Stoffe ab, und Strom setzt Wärme frei. Die Wärmemenge können wir messen. Damit ist das Verfahren zur Messung der Elektrizitätsmenge gegeben, d. h. *die Definition dieses Begriffs*. Außerdem sind auch die Definitionen der *abgeleiteten* Begriffe, also der Stromstärke und der Spannung, gegeben.

Wir haben eine Reihe einfacher Formeln aufgeschrieben. Doch beachten Sie bitte: Diese Formeln dürfen nicht als Naturgesetze bezeichnet werden. Insbesondere hat unser Forscher das Verhältnis  $Q/q$  als Spannung *bezeichnet*; er hat *nicht gefunden*, daß  $Q/q$  gleich der Spannung ist.

Jetzt aber geht er daran, das entsprechende Naturgesetz zu suchen. Man kann für ein und denselben Leiter

unabhängig voneinander zwei Größen messen: die Stromstärke und die Wärme oder (was im Prinzip dasselbe ist) die Stromstärke und die Spannung.

Die Untersuchung der Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung führt zur Entdeckung eines neuen Gesetzes. Die überwiegende Mehrzahl aller Leiter gehorcht dem Gesetz:

$$U = IR.$$

Die Größe  $R$  kann man als Widerstand bezeichnen, und zwar in Übereinstimmung mit den anfänglichen qualitativen Beobachtungen. Sie kennen diese Formel: Es ist das Ohmsche Gesetz. Setzen wir den Wert der Stromstärke aus dem Ohmschen Gesetz in die vorhergehende Formel ein, dann erhalten wir:

$$Q = \frac{U^2}{R} t.$$

Ich hoffe, Sie lassen sich nicht von der Möglichkeit irritieren, die vom Leiter in Form von Wärme freigesetzte Energie  $Q$  auch anders anzugeben:

$$Q = I^2 R t.$$

Aus der ersten dieser beiden Formeln folgt, daß die Wärmemenge dem Widerstand umgekehrt proportional ist. Wenn man diesen Satz so ausspricht, muß man allerdings ergänzen: bei konstanter Spannung. Genau dieser Fall war gemeint, als wir erstmals den Terminus „Widerstand“ gebrauchten. Die zweite Formel nun, die besagt, daß die Wärme dem Widerstand direkt proportional ist, erfordert den Zusatz: bei konstanter Stromstärke.

In der zuletzt angegebenen Form ist unschwer das Joulesche Gesetz zu erkennen.

Nachdem unser Wissenschaftler festgestellt hat, daß Spannung und Stromstärke proportional sind und somit die Möglichkeit zur Bestimmung des Leiterwiderstandes

gegeben ist, muß er sich naturgemäß fragen, wie diese wichtige Größe mit der Form und den Abmessungen des Leiters und mit dem Leiterwerkstoff verknüpft ist.

Entsprechende Versuche führen zur nächsten Entdeckung. Es ist nämlich

$$R = \rho \frac{l}{A};$$

$l$  stellt darin die Leiterlänge und  $A$  den Leiterquerschnitt dar. Diese überaus einfache Gleichung trifft dann zu, wenn wir es mit einem linearen Leiter zu tun haben, dessen Querschnitt über die Gesamtlänge konstant ist. Wer will, kann unter Einsatz komplizierter mathematischer Operationen die Formel des Widerstandes für einen Leiter beliebiger Form aufschreiben. Was aber bedeutet der Koeffizient  $\rho$ ? Er kennzeichnet den Werkstoff, aus dem der Leiter hergestellt ist. Der Wert dieser Größe, der die Bezeichnung spezifischer Widerstand erhalten hat, schwankt innerhalb eines sehr breiten Intervalls. In bezug auf den Wert von  $\rho$  können sich die verschiedenen Stoffe voneinander um das Mehrmilliardenfache unterscheiden.

Wir wollen nun noch einige formale Umformungen vornehmen, die uns später nützlich sein werden. Man kann das Ohmsche Gesetz auch in folgender Form aufschreiben:

$$I = \frac{UA}{\rho l}.$$

Oft wird das Verhältnis aus Stromstärke und Leiterquerschnitt benötigt. Man bezeichnet dieses Verhältnis als Stromdichte und verwendet dafür den Buchstaben  $j$ . Nun können wir das Ohmsche Gesetz wie folgt formulieren:

$$j = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l}.$$

Unser Forscher glaubt nun, daß ihm hinsichtlich des Ohmschen Gesetzes alles klar ist. Steht eine unbegrenzte Anzahl von Leitern mit bekanntem Widerstand zur Verfügung, kann man auf die umständliche Ermittlung der Spannung mit Hilfe eines Kalorimeters verzichten, denn die Spannung ist gleich dem Produkt aus Stromstärke und Widerstand.

Freilich bemerkt er schon bald, daß diese Feststellung einer Präzisierung bedarf. Unter Benutzung ein und derselben Stromquelle verbindet er deren Pole über verschiedene Widerstände. Naturgemäß wird die Stromstärke bei jedem derartigen Versuch eine andere sein. Allerdings stellt sich heraus, daß auch das Produkt aus Stromstärke und Widerstand  $IR$  nicht gleich bleibt. Bei näherer Untersuchung dieser vorläufig noch unverständlichen Erscheinung bemerkt der Forscher, daß sich das Produkt  $IR$  mit zunehmendem Widerstand einem bestimmten konstanten Wert nähert.

Wir bezeichnen diesen Grenzwert mit  $E$  und erhalten eine Formel, die nicht mit jener Formel übereinstimmt, die durch direkte Messungen der Stromstärke und der Spannung ermittelt worden ist. Die neue Formel lautet:

$$E = I (R + r).$$

Was ist das für ein merkwürdiger Widerspruch?

Überlegen wir. Es handelt sich natürlich nur um einen scheinbaren Widerspruch. Die unmittelbare kalorimetrische Spannungsmessung bezog sich nur auf den Leiter, der die Pole des Akkumulators miteinander verband. Dabei ist doch klar, daß auch im Akkumulator selbst Wärme freigesetzt wird (man braucht den Akkumulator nur anzufassen, wenn man sich davon überzeugen will). Der Akkumulator hat seinen eigenen Widerstand. Der Sinn der Größe  $r$ , die in der neuen Formel steht, liegt auf der Hand: Es ist der Innenwiderstand der Stromquelle. Was hingegen die Größe  $E$  betrifft, so bedarf sie

einer eigenen Bezeichnung. Die Größe  $E$  wird elektromotorische Kraft (EMK) genannt, obwohl sie weder dem Sinn noch der Maßeinheit nach eine Kraft ist. (Die Namenswahl ist historisch bedingt und erscheint heute wenig glücklich.)

Beide Formeln werden als Ohmsches Gesetz bezeichnet. Nur spricht man im Fall der ersten Formel vom Ohmschen Gesetz für einen stromdurchflossenen Leiter, im Fall der zweiten Formel vom Ohmschen Gesetz für den ganzen Stromkreis.

Nun aber scheint wirklich alles klar. Die Gesetze des Gleichstromkreises sind ermittelt.

Unser Forscher aber ist noch nicht zufrieden. Auch ohne die unmittelbare Spannungsmessung durch Kalorimeter bleibt die Untersuchung umständlich. Jedesmal muß die Katode mit dem daran abgeschiedenen Kupfer gewogen werden! Zugegeben, eine recht umständliche Art.

Und an einem wunderschönen forschungsintensiven Tag stellte unser Forscher rein zufällig eine Magnetnadel in die Nähe eines stromdurchflossenen Leiters. So kam es zu einer wichtigen Entdeckung: Wenn Strom durch den Leiter fließt, wird die Nadel abgelenkt, und zwar abhängig von der Stromrichtung mal nach der einen, mal nach der anderen Seite.

Die Bestimmung des an der Magnetnadel angreifenden Kraftmoments ist einfach. Auf der Basis der hier entdeckten Erscheinung kann ein Meßgerät entwickelt werden. Dafür muß man nur die Abhängigkeit des Kraftmoments von der Stromstärke ermitteln. Unser Forscher löst das Problem und konstruiert vortreffliche Zeigergeräte, die die Messung von Stromstärke und Spannung ermöglichen.

Unser Bericht darüber, was der Forscher bei Untersuchung der für den Gleichstromkreis geltenden Gesetze in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts vollbracht hat, wäre unvollständig, wenn wir nicht auch darauf ver-

weisen würden, daß er die Wechselwirkung der Ströme untereinander entdeckte: In ein und derselben Richtung fließende Ströme ziehen sich an; bei gegenläufigem Stromfluß kommt es zur Abstoßung. Natürlich läßt sich auch diese Erscheinung zur Messung der Stromstärke nutzen.

Bei Behandlung der Gesetze des Elektromagnetismus würde ich mich freilich nicht nur auf die vorstehenden Absätze beschränken; dem Elektromagnetismus ist ein eigenes Kapitel vorbehalten. Ich mußte diese wichtigen Tatsachen jedoch erwähnen, um das Ziel dieses Kapitels zu erreichen. In ihm soll gezeigt werden, wie die zur Charakterisierung der elektrischen Erscheinungen Strom, Ladung und Feld erforderlichen quantitativen Grundbegriffe und Maßeinheiten eingeführt wurden.

## Ruhende Elektrizität

Wir wollen davon ausgehen, daß unser „idealer“ Forscher jene verschiedenartigen Erscheinungen kennt, die bereits vor langer Zeit die Bezeichnungen „elektrische Erscheinungen“ erhielten. Die besonderen Eigenschaften von Bernstein oder auch Glasstäben, wenn man sie mit einem Lappen reibt, die Erzeugung von Funken, die zwischen zwei Körpern überspringen, die in den „elektrisierten“ Zustand gebracht worden sind, wurden bereits vor langer Zeit untersucht (besser: Sie wurden für effektvolle Vorführungen genutzt). Darum mußte sich der Forscher, als er an die Untersuchung des elektrischen Stroms ging, notwendigerweise die Frage stellen: Ist jenes Fluidum, das durch einen Leiter fließt, und jenes, das im Ruhezustand auf einem Körper so lange verharren kann, bis dieser „entladen“ wird, ein und dasselbe „Etwas“?

Doch muß man sich nicht, selbst wenn man einmal von den früher gewonnenen Erkenntnissen absieht, folgende Frage stellen: Wenn Elektrizität ein „Etwas“ ist,

das in der Art einer Flüssigkeit fließt, kann man es dann nicht „in ein Glas gießen“?

Wollte unser Forscher auf diese Frage eine klare Antwort erhalten, dann hätte er so verfahren müssen, wie wir es im folgenden beschreiben. Man nimmt eine Stromquelle hinreichend hoher Spannung (bitte gedulden Sie sich mit der Frage, was als hohe Spannung, als große Stromstärke usw. zu gelten hat), einer der beiden Pole wird geerdet, während man auf den zweiten Pol eine kleine, aus sehr dünner Aluminiumfolie hergestellte Hohlkugel legt. Diese Kugel wird an einem Seidenfaden aufgehängt. Das gleiche geschieht mit einer weiteren kleinen Kugel.

Nun nähern wir diese beiden kleinen Kugeln einander an (etwa auf einen Mittelpunktsabstand von 2 mm). Mit freudiger Überraschung bemerkt unser Forscher, daß beide Kugeln einander abstoßen. Kennt man die Masse der Kugeln, so läßt sich aus dem Ablenkungswinkel beider Lote die Kraft berechnen, die zwischen ihnen wirkt.

Der Forscher stellt fest: Wurden die Kugeln durch Berührung mit ein und demselben Pol des Akkumulators aufgeladen, dann stoßen sie sich ab. Erhielt die eine Kugel ihre Elektrizität von dem einen Pol und die andere von dem anderen Pol des Akkumulators, dann ziehen sich beide Kugeln an.

Dieser Versuch bestätigt unsere Annahme von der Elektrizität als einer Flüssigkeit und zeigt, daß wir es sowohl mit bewegter als auch mit ruhender Elektrizität zu tun haben können.

Da unser Forscher Elektrizitätsmengen anhand der an der Katode abgeschiedenen Kupfermenge bestimmen kann, läßt sich auch herausfinden, „wieviel Flüssigkeit in das Glas geschüttet worden ist“, d. h., wie groß die Elektrizitätsmenge ist, die jede Kugel aus dem Akkumulator „gesaugt“ hat.

Der Forscher gelangt weiterhin zu folgenden Einsichten: „Erdet“ man eine geladene Kugel, d. h., verbindet man sie durch einen Draht mit der Erde, dann verliert die Kugel ihre Ladung. Weiter wird nachgewiesen, daß die Ladung über den Draht „abfließt“, d. h., daß ein Strom durch den Draht fließt. Und schließlich kann jene Kupfermenge gemessen werden, die an der Katode aus dem Elektrolyten abgeschieden wird, wenn man zwischen Erde und Kugel eine entsprechende Versuchsanordnung schaltet, d. h., man kann die ursprünglich an der Kugel befindliche Menge ruhender Elektrizität messen.

Unser Forscher bezeichnet diese Elektrizitätsmenge als Ladung der Kugel und ordnet ihr, je nachdem, von welchem Pol des Akkumulators das elektrische Fluidum entnommen worden ist, ein positives oder negatives Vorzeichen zu.

Nun kann man die nächste Versuchsreihe in Angriff nehmen. An verschiedenen Akkumulatoren lassen sich durch Kugeln unterschiedlicher Größe verschiedene Elektrizitätsmengen entnehmen. Indem man die Kugeln in verschiedenen Entfernungen voneinander anordnet, kann man die zwischen ihnen bestehende Wechselwirkungskraft messen. Dabei findet unser Forscher das folgende wichtige Naturgesetz:

$$F = f \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

Die Wechselwirkungskraft ist dem Produkt aus den Ladungen beider Kugeln direkt und dem Abstandsquadrat zwischen den Kugeln umgekehrt proportional. Sie erkennen in dieser Formel das Coulombsche Gesetz, das freilich ganz anders ermittelt worden ist, als wir es hier beschreiben. Doch unser Forscher ist eine nichthistorische Gestalt.

## Das elektrische Feld

Unser Forscher kennt bisher Kräfte zweier Typen. Die eine Art von Kräften wird beim unmittelbaren Kontakt eines Körpers mit einem anderen wirksam. Das gilt etwa für den Fall, wenn ein Körper angezogen oder abgestoßen wird. Was jedoch die sogenannten Fernwirkungskräfte betrifft, so kannte er bisher nur die Schwerkraft oder — etwas weitergefaßt — die Gravitationskraft.

Nun ist eine neue Kraft hinzugekommen: die Coulombsche Anziehungs- bzw. Abstoßungskraft, die zwischen zwei geladenen Körpern wirkt. Sie ist der Schwerkraft sehr ähnlich; selbst die Formeln zeigen ein ähnliches Aussehen.

Die auf einen Körper von seiten der Erde wirkende Schwerkraft bereitete bei Berechnungen keine besonderen Schwierigkeiten. Was hingegen die Coulombschen Kräfte, oder auch elektrostatischen Kräfte genannt, betrifft, so kann man Situationen vorfinden, wo die elektrischen Ladungen auf sehr komplizierte und zu allem Überfluß auch noch unbekannte Weise im Raum verteilt sind.

Dabei könnte man doch ohne Kenntnis der Verteilung dieser Ladungen auskommen. Wir wissen, daß sich die Ladungen gegenseitig aus der Ferne „fühlen“. Warum sollte man das nicht so formulieren: *Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld*. Es könnte scheinen, als seien hier Schwierigkeiten wegen der Tatsache möglich, daß wir das elektrische Feld nicht sehen. Ich glaube aber — so sagt unser Forscher —, daß man das elektrische Feld nicht nur als mathematische Funktion auffassen darf, die uns die Berechnung erleichtert. Wirkt auf eine in einem bestimmten Punkt angeordnete Ladung eine Kraft ein, so heißt dies, daß sich dieser Punkt (des Raumes) in einem besonderen Zustand befindet. Das elektrische Feld ist eine physikalische Realität, d. h., es existiert, auch wenn wir es nicht sehen können. Natürlich hätte unser Forscher diese Auffassung zu Beginn des 19. Jahrhunderts nicht

beweisen können. Die Zukunft freilich sollte ihm recht geben.

Das Coulombsche Gesetz gibt die Formel an, mit deren Hilfe man die Wirkung einer kleinen Kugel auf eine andere bestimmen kann. Man könnte eine von beiden Kugeln starr befestigen und die andere dann an verschiedene Raumpunkte bringen. An allen Orten wird die beweglich aufgehängte (Prüf-)Kugel einer Kraft ausgesetzt sein. Diese Tatsache können wir jetzt anders formulieren: Eine elektrisch geladene Kugel erzeugt in ihrer Umgebung ein elektrisches Kraftfeld oder kürzer: ein elektrisches Feld.

Elektrische Felder können von geladenen Körpern beliebiger Form ausgehen. Zu ihrer Ermittlung ist das Coulombsche Gesetz allerdings nicht länger geeignet, doch können wir mit Hilfe einer Prüfkugel das elektrische Feld in der Umgebung eines geladenen Körpers messen und durchaus erschöpfend charakterisieren, indem wir Betrag und Richtung der Kraft angeben. Um die Beschreibung des Feldes davon unabhängig zu machen, wie groß die Ladung der Prüfkugel gewählt wird, kennzeichnet man das elektrische Feld durch seine Feldstärke:

$$E = \frac{F}{Q};$$

darin ist  $Q$  die elektrische Ladung der Prüfkugel.

Es gibt ein anschauliches Verfahren zur Beschreibung des elektrischen Feldes mit Hilfe von Kraftlinien. Abhängig von der Form geladener Körper und ihrer wechselseitigen Anordnung können die dabei erhaltenen grafischen Darstellungen ganz unterschiedlich aussehen. In Bild 1.1. sind zwei besonders einfache Fälle der Darstellung elektrischer Felder gezeigt. Die Bilder haben folgenden Sinn: Die Tangente an jedem Punkt einer Kraftlinie gibt die Richtung der elektrischen Kraft an dieser Stelle an. Die Anzahl von Linien, die auf die Einheit einer senkrecht

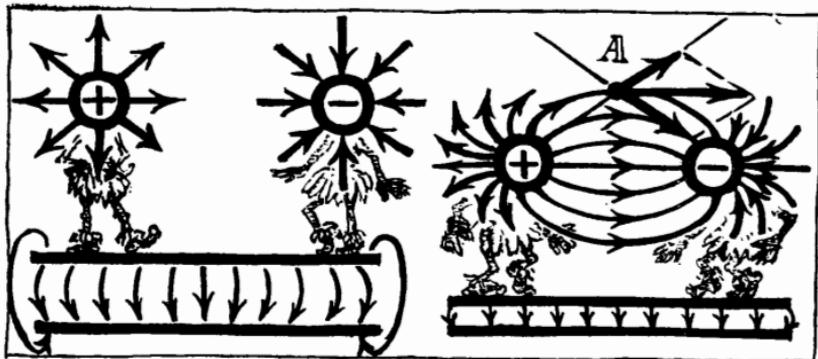


Bild 1.1.

zu den Kräften angeordneten Fläche entfallen, kann beliebig groß, jedoch dem Wert von  $E$  proportional sein. Wenn man freilich von der Anzahl der Kraftlinien spricht und keine bildliche Darstellung besitzt, so setzt man diese Anzahl einfach gleich dem Wert von  $E$ .

Bringt man eine frei bewegliche elektrische Ladung in ein elektrisches Feld, dann folgt sie in ihrer Bewegung dem Kraftlinienverlauf, vorausgesetzt natürlich, daß nicht auch andere Kräfte, etwa die Schwerkraft, eine Rolle spielen.

Die einfachste Gestalt haben die Kraftfelder kugelförmiger Felder. Nähert man zwei Kugeln oder zwei punktförmig darstellbare Ladungen einander, so überlagern sich ihre Felder. Die Feldstärken addieren sich nach der Parallelogrammregel. Man kann für jeden Punkt  $A$  herausfinden, welche Richtung die Kraftlinie an diesem Punkt hat und wie groß die Feldstärke ist, indem man die in Bild 1.1. gezeigte Konstruktion vornimmt.

Sind die geladenen Körper plattenförmig, dann hat das Feld die im unteren Teil des Bildes gezeigte Gestalt. Verringert man die Entfernung zwischen den Platten und läßt ihre Fläche zunehmen, so kann man ein nahezu

ideal homogenes Feld erzielen; der Randeffect bleibt unbedeutend. Über zwei nahe beieinander angeordnete Platten läßt sich sagen, daß sie das Feld verdichten. Eine Vorrichtung dieser Art heißt Kondensator, was übersetzt nichts anderes als „Verdichter“ bedeutet.

Wie wir wissen, ist die Arbeit zur Lageänderung eines Körpers unter dem Einfluß einer Kraft gleich dem Produkt aus dieser Kraft und dem Weg. Um eine Ladung von der einen Platte des Kondensators zur anderen (im Verlauf der Kraftlinie) zu transportieren, ist die Arbeit  $QEl$  notwendig. Die für den Transport einer Elementarladung erforderliche Arbeit ist gleich  $El$ .

Lassen Sie uns nun die beiden Platten eines Kondensators durch einen Leiter miteinander verbinden. Beim Transport der Elektrizitätsmenge  $Q$  durch den Leiter wird die Energie  $QU$  freigesetzt. Da wir schon vermuten, daß zwischen der Bewegung einer geladenen kleinen Kugel im elektrischen Feld und dem Transport der elektrischen „Flüssigkeit“ durch einen metallischen Leiter kein grundsätzlicher Unterschied besteht, setzen wir diese beiden Ausdrücke für die vom Feld aufgewendete Energie gleich:

$$QEl = QU.$$

Obengenannten Ausdruck kann man leicht nachprüfen, indem man die Platten eines Kondensators auseinanderückt und die Kraft mißt, die auf eine Probeladung wirkt.

Diese Messung läßt sich sehr elegant ausführen, ohne eine geladene Kugel an einem Seidenfaden aufzuhängen.

Jeder weiß, daß leichte Körper langsamer zu Boden fallen als schwere. Wir erinnern an dieser Stelle daran, daß dies — bis zu den Versuchen Galileis — der Grund dafür war, daß die Weisen der Antike und des Mittelalters glaubten, die Geschwindigkeit eines Körpers (und nicht seine Beschleunigung) sei der Kraft proportional. Die Irrigkeit dieses Standpunktes wurde erst dann anschau-

lich demonstriert, als man sah, wie Papierschnitzel und Metallkugeln in einem senkrecht angeordneten Rohr fallen, aus dem man zuvor die Luft evakuiert hatte. Dabei zeigte sich nämlich, daß der Geschwindigkeitszuwachs aller Körper gleich ist, d. h., daß sie alle mit ein und derselben Geschwindigkeit zur Erde fallen. In dem Fall, den wir hier gerade betrachten, ist es jedoch sinnvoll, den Luft einfluß „einzuschalten“, denn der Luftwiderstand führt dazu, daß eine leichte metallische Hohlkugel, mit der wir das Coulombsche Gesetz vorführten, sehr langsam nach unten sinkt.

Läßt man eine derartige Kugel zwischen den Platten eines Kondensators fallen, so kann man durch Änderung der an die Platten angelegten Spannung ein Feld erzeugen, das die Kugel gerade in der Schwebelage hält. Der Gleichgewichtszustand wird unter der Voraussetzung erreicht, daß die Schwerkraft gleich der Feldstärke ist, d. h.,  $mg = QE$  gilt. Aus dieser Gleichung läßt sich der Feldstärkewert ermitteln und die Richtigkeit unserer theoretischen Überlegungen bestätigen.

Die Anzahl der Kraftlinien, die eine beliebige, im elektrischen Feld befindliche gedachte oder reale Fläche durchdringt, heißt Kraftfluß. Wie groß ist der Kraftfluß, der eine geschlossene, geladene Körper einhüllende Fläche durchdringt?

Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall: Das Feld wird durch eine kleine Kugel allein erzeugt. Wir zeichnen um die Kugel herum eine Kugelschale. Ist der Radius dieser Kugelschale  $R$ , dann beträgt die Feldstärke an jedem Punkt der Kugelschalenfläche  $fQ/R^2$ . Die Fläche der Kugelschale ist gleich  $4\pi R^2$ . Der die Kugelschale durchdringende Kraftfluß ist demnach  $4\pi fQ$ . Es ist jedoch klar, daß der Kraftfluß unverändert bleibt, wenn wir eine beliebige andere Fläche wählen.

Wir lassen unsere Darstellung etwas komplizierter werden und nehmen an, daß das Feld von einer großen

Anzahl geladener Körper beliebiger Form erzeugt wird. Man kann jedoch alle diese Körper gedanklich in winzige Abschnitte zerlegen, deren jeder einer Punktladung äquivalent ist. Wir hüllen das Ladungssystem durch eine beliebige Fläche ein. Der von jeder Ladung ausgehende Kraftfluß ist  $4\pi fQ$ . Nun ist es ganz natürlich, daß sich die Flüsse arithmetisch addieren und der Gesamtfluß, der eine beliebige geschlossene, sämtliche Ladungen einhüllende Fläche durchdringt, der Gesamtladung aller Körper innerhalb dieser geschlossenen Fläche proportional ist.

Diese Feststellung ist das Grundgesetz, dem die elektrischen Felder gehorchen (es handelt sich um eine der vier Maxwellschen Gleichungen; siehe Kapitel 5).

Beachten Sie bitte, daß wir diese Formel weder abgeleitet noch bewiesen haben. Wir haben vielmehr erraten, daß es sich so und nicht anders verhält. Das wiederum bedeutet, daß wir es mit einem allgemeingültigen Naturgesetz zu tun haben, dessen Richtigkeit durch die experimentelle Bestätigung beliebiger Folgerungen nachgewiesen wird, die aus dem allgemeingültigen Gesetz fließen.

Es ist sehr wichtig, jene allgemeine Vorschrift zu kennen, die für beliebige Systeme zutrifft. Auf der Grundlage des oben formulierten Gesetzes kann eine EDVA in Sekundenschnelle das von einem denkbar komplizierten System geladener Körper erzeugte elektrische Feld berechnen. Wir hingegen wollen uns hier auf ein bescheideneres Problem beschränken und (unter Veranschaulichung der Arbeitsweise der theoretischen Physik anhand dieses elementaren Falles) die für die Praxis wichtige Formel der Kapazität eines Kondensators ableiten.

Zunächst definieren wir diesen häufig verwendeten Begriff. Als Kapazität eines Kondensators bezeichnet man das Verhältnis zwischen der an den Kondensatorplatten akkumulierten Ladung und der Spannung zwischen

den Kondensatorbelegungen, d. h.

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

Im Fall eines Kondensators verlaufen die Kraftlinien nicht nach den Seiten hin, sondern treten aus der positiven Platte aus und in die negative Platte ein. Bei Vernachlässigung der Verzerrung des Feldes im Randbereich des Kondensators kann man den Fluß durch das Produkt  $EA$  angeben. Aufgrund des allgemeingültigen Gesetzes können wir folgende Gleichung aufschreiben:

$$EA = 4\pi fQ,$$

d. h., die Feldstärke zwischen den Belegungen ist

$$E = 4\pi f \frac{Q}{A}.$$

Andererseits kann die Feldstärke des Kondensators auch wie folgt aufgeschrieben werden:

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

Setzen wir beide Ausdrücke gleich, so erhalten wir die Formel für die Kapazität des Kondensators:

$$C = \frac{A}{4\pi f d}.$$

Technische Kondensatoren bestehen aus streifenförmiger Metallfolie mit einer Zwischenlage aus Glimmer oder paraffiniertem Papier. Die beiden zuletzt genannten Stoffe sind Isolatoren. Welche Bedeutung hat die Einführung eines Dielektrikums zwischen den Belegungen eines Kondensators? Der Versuch zeigt, daß die Kapazität  $C$  eines Kondensators mit der Kapazität eines Kondensators ohne Zwischenlage  $C_0$  durch die Formel  $C = \epsilon C_0$  verknüpft ist,

Die Größe  $\epsilon$  heißt Dielektrizitätskonstante. Für Luft, Glimmer, Wasser und Seignettesalz sind die Werte von  $\epsilon$  gleich 1, ungefähr 6, 81 bzw. 9000.

### Auf der Suche nach der Ausgangsbasis

Das Ohmsche und das Joulesche Gesetz verbinden Energie, Stromstärke, Spannung und Widerstand miteinander. Man kann sagen, daß die Spannung gleich dem Produkt aus Stromstärke und Widerstand ist. Man kann aber auch sagen: Die Stromstärke ist gleich der durch den Widerstand dividierten Spannung. Freilich haben beide der hiergenannten Definitionen (die man auch in Lehrbüchern findet) den Nachteil, daß sie nur dann ohne Schwierigkeiten verwendet werden können, wenn das Ohmsche Gesetz gilt. Wie jedoch bereits gesagt, gilt das Ohmsche Gesetz nicht immer. Besser ist es daher anzunehmen, daß der Leiterwiderstand eine abgeleitete Größe ist, die sich als Verhältnis der an den Leiterenden angelegten Spannung zu der Stromstärke ergibt, die durch den Leiter fließt.

Da man die Energie des elektrischen Stroms, ausgehend vom Energieerhaltungssatz, aufgrund der thermischen und mechanischen Wirkungen des Stroms messen kann, leuchtet die Zweckmäßigkeit der Definition der Stromstärke bzw. der Spannung als einer von der Energie abgeleiteten Größe ein. Besonders naheliegend ist es, die Stromstärke über die Elektrolyse und die Spannung an den beiden Enden eines Stromkreisabschnitts als Quotient der freigesetzten Energie und der Elektrizitätsmenge zu definieren.

Sie müssen sich aber darüber im klaren sein, daß dieses Definitionssystem nicht das einzige ist. Anstelle der Elektrolyse könnte man der Definition der Stromstärke auch jede andere Stromwirkung zugrunde legen, etwa die

Wirkung des Stroms auf eine Magnetnadel oder auf einen anderen Strom.

Im Grundsatz unanfechtbar wäre auch dieser Weg: Man wählt eine Standardstromquelle und gibt die Spannung jeder anderen Stromquelle durch die Anzahl äquivalenter Standardelemente (bzw. -zellen) an. Das ist keineswegs eine bloße Erfindung, dieser Vorschlag wurde seinerzeit unterbreitet. Die Standardstromquelle heißt Weston-Element.

Und noch eine Variante: Man kann ein System von Definitionen und Maßeinheiten aufbauen, indem man einen Eichwiderstand wählt und wiederum alle anderen Widerstände durchmißt, um herauszufinden, durch wieviel Standardwiderstände man den betreffenden Leiter ergänzen kann. Seinerzeit benutzte man als Einheitswiderstand eine Quecksilbersäule festgelegter Länge und festgelegten Querschnitts.

Es ist sehr nützlich, sich vor Augen zu führen, daß die Reihenfolge, in der physikalische Begriffe abgeleitet wurden, zufällig ist. Natürlich hat das keinerlei Einfluß auf den Inhalt der Naturgesetze. Bisher haben wir über elektrische Erscheinungen im Gleichstromkreis gesprochen. Selbst wenn wir uns auf diese Gruppe von Erscheinungen beschränken, haben wir die Möglichkeit, unterschiedliche Definitionssysteme für die Begriffe und dementsprechend auch verschiedene Systeme für die Maßeinheiten aufzubauen. In Wahrheit freilich stehen noch weitaus mehr Möglichkeiten zur Wahl, da sich die elektrischen Erscheinungen keineswegs auf den Gleichstromkreis allein beschränken.

Bis zum heutigen Tag definiert man in vielen Physik-lehrbüchern den Begriff der elektrischen Ladung (oder, was dasselbe ist, der Elektrizitätsmenge), ausgehend vom Coulombschen Gesetz; dann tritt die Spannung in Erscheinung, und erst danach — nachdem die Beschreibung der statischen Elektrizität abgeschlossen ist — führen

die Autoren die Begriffe Stromstärke und elektrischer Widerstand ein. Wir sind, wie Sie sehen, einen anderen Weg gegangen.

Noch größere Willkür herrscht bei der Wahl der Maßeinheiten. Jeder Forscher hat das Recht, nach eigenem Gutdünken zu verfahren. Er darf dabei allerdings nicht außer acht lassen, daß sich die Wahl der Maßeinheiten auf die Proportionalitätskoeffizienten in den verschiedenen Formeln auswirkt.

Es wäre nicht falsch, die Einheiten der Stromstärke, der Spannung und des Widerstandes unabhängig voneinander festzulegen. Freilich würde dann in der Formel, die das Ohmsche Gesetz angibt, ein Koeffizient auftreten, der eine bestimmte Maßeinheit angibt. Bis in die jüngste Zeit hinein, als nämlich die wohlvertrauten Kalorien noch nicht durch den unbarmherzigen Spruch der Internationalen Kommission aus der Physik verbannt waren, stand ein derartiger Koeffizient auch in der Formel des Jouleschen Gesetzes. Der Grund war, daß man die Maßeinheiten der Stromstärke und der Spannung völlig unabhängig von der Maßeinheit der Energie (bzw. der Wärme oder der Arbeit) definiert hatte.

Mit der Einführung des SI gilt nun in allen Wissenschaftsgebieten, also auch in der Elektrizitätslehre, nur eine einzige Energieeinheit, nämlich das Joule. Die Basis-einheit der Elektrizitätslehre ist die Stromstärke. Als Einheit der Elektrizitätsmenge dient das Coulomb; es ist gleich einer Amperesekunde. Das Ampere wird auf der Grundlage der Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern definiert. Wir werden die Definition auf S. 122 im Kapitel über den Elektromagnetismus angeben.

Danach verfolgt das SI den gleichen Weg, den wir auch unseren Forscher gehen ließen. Wir gelangen zur Einheit der Spannung, dem Volt, das gleich dem Quotienten aus einem Joule und einem Coulomb ist; das Ohm, die Einheit des Widerstandes, ist gleich dem Quotienten

aus Volt und Ampere; die Einheit des spezifischen Widerstandes ist das Produkt aus Ohm und Meter.

Doch nun gelangen wir zum Coulombschen Gesetz und sehen, daß der Proportionalitätskoeffizient  $f$  eine Maßeinheit erhalten und einen bestimmten experimentell zu ermittelnden Wert angenommen hat.

Das Coulombsche Gesetz wird selten benötigt; die Formel jedoch für die Kapazität eines Kondensators wird bei vielen technischen Berechnungen laufend gebraucht. Um den Faktor  $4\pi$  in den Formeln des elektrischen Flusses, der Kapazität eines Kondensators und noch in vielen anderen Formeln eliminieren zu können, haben die Techniker den Koeffizienten  $f$  schon lange durch den Ausdruck  $1/4\pi\epsilon_0$  ersetzt. Aus einsichtigen Gründen kann man  $\epsilon_0$  als Dielektrizitätskonstante des Vakuums oder auch als absolute Dielektrizitätskonstante bezeichnen. Sie beträgt

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N}} \cdot \text{m}^2.$$

Der Kraftlinienfluß ist nunmehr durch die Formel

$$\frac{1}{\epsilon_0} (Q_1 + Q_2 + \dots)$$

anzugeben und die Kapazität eines Kondensators durch

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d}.$$

Ein Farad, die Einheit der Kapazität, ist gleich dem Quotienten aus Coulomb und Volt.

### Wie sich die Elektrizitätslehre entwickelte

Die Elektrizitätslehre entwickelte sich keineswegs auf jenem Weg, den unser konstruierter Forscher beschriftet.

Elektrostatische Erscheinungen waren bereits im fernen Altertum bekannt. Schwer zu sagen, ob den griechi-

schen Wissenschaftlern bekannt war, welche Körper außer Bernstein (die griechische Bezeichnung von Bernstein ist übrigens „electron“) durch Reiben besondere Eigenschaften gewinnen und Papierschnitzel anziehen. Erst im 17. Jahrhundert zeigte William Gilbert, daß auch Diamant, Siegellack, Schwefel, Alaune und viele andere Körper über diese seltsame Eigenschaft verfügen. William Gilbert war, soweit man weiß, der erste, der Geräte zur Beobachtung der Wechselwirkung elektrisierter Körper entwickelte. Im 18. Jahrhundert ist bereits bekannt, daß manche Körper imstande sind, Ladungen festzuhalten, während diese von anderen Körpern „abfließen“. Kaum jemand zweifelt daran, daß die Elektrizität so etwas ähnliches wie eine Flüssigkeit ist. Die ersten elektrostatischen Maschinen werden gebaut; man kann mit ihrer Hilfe Funken erzeugen und mehrere Leute gleichzeitig in „Zuckungen“ versetzen, wenn diese einander an den Händen halten und die beiden äußeren Personen jeweils einen Pol der in Betrieb befindlichen Elektrisiermaschine berühren. Höflinge aus vielen Ländern besuchen die Laboratorien der Wissenschaftler wie einen Zirkus. Und die Wissenschaftler ihrerseits geben sich alle Mühe, die vorgeführten Erscheinungen möglichst effektiv zu gestalten.

Bereits im 18. Jahrhundert kann man von der Elektrostatik als von einer Wissenschaft sprechen. Es gibt eine große Anzahl verschiedener Elektroskope; Coulomb beginnt mit quantitativen Messungen der Wechselwirkungskräfte von Ladungen.

1789 entdeckte Luigi Galvani (1737—1798) die Kontraktion von Froschschenkeln, die durch elektrischen Strom bewirkt wurde.

Bei Fortsetzung der galvanischen Versuche gelangt Volta Ende des 18. Jahrhunderts zu der Einsicht, daß die Muskeln des Froschschenkels von elektrischem Fluidum durchflossen werden. Der nächste bedeutsame Schritt ist

die Herstellung der ersten Stromquelle, des sogenannten galvanischen Elements, und später dann der Voltaschen Säule.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts weiß die gesamte wissenschaftliche Welt von Voltas Entdeckung. Nun beginnt die Erforschung des elektrischen Stroms. Eine Entdeckung folgt der anderen.

Eine Reihe von Forschern studiert die Wärmewirkung des Stroms. Damit befaßte sich auch Ørsted, der — rein zufällig — die Wirkung des Stroms auf die Magnetsnadel entdeckte.

Die brillanten Arbeiten von Ohm und Ampère erfolgten etwa gleichzeitig, nämlich in den zwanziger Jahren des 19. Jahrhunderts.

Ampère wurde durch seine Arbeiten schnell berühmt. Ohm hingegen verfolgte das Pech. Seine Arbeiten, in denen sich Sorgfalt des Experiments und exakte Berechnungen vereinigen, die sich durch Strenge und konsequente Einführung phänomenologischer Begriffe unter gänzlicher Nichtbeachtung der „Natur“ der Dinge auszeichnen, erlangten nicht die Aufmerksamkeit seiner Zeitgenossen. Fand sich ein Kritiker, dann nur zu dem Zweck, die „krankhafte Phantasie des Autors, der bemüht ist, die Würde der Natur herabzusetzen“, zu verspotten. (Der Urheber dieses Zitats ist wohl der Physiker de la Riva, der keinen einzigen entscheidenden Beitrag zur Wissenschaft geleistet hat.)

Die Originalarbeiten der Physiker jener Zeit lesen sich heute äußerst schwierig. Die experimentellen Entdeckungen werden in einer uns fremden Sprache dargelegt. Zuweilen ist völlig unklar, was der Autor mit dem einen oder anderen Wort meint. Die Namen der großen Wissenschaftler leben im Gedächtnis der Nachgeborenen nur dank den Bemühungen der Wissenschaftshistoriker fort.

## 2. Die elektrische Struktur des Stoffs

### Die kleinste Elektrizitätsmenge

Lange Zeit hindurch reduzierte sich alles, was die Physiker über elektrische Erscheinungen wußten, auf die Annahme, Elektrizität sei eine Art Flüssigkeit. Noch Ende des 19. Jahrhunderts war folgende Anekdote im Schwange. Ein Prüfer, der sein Mütchen an einem miserablen Studenten kühlen wollte, sagt zu diesem: „Nun also, wenn Sie schon alle meine übrigen Fragen nicht haben beantworten können, dann erlauben Sie mir noch eine selten einfache Frage: Was ist Elektrizität?“ Darauf der Student: „Herr Professor, Ehrenwort, ich hab's gestern noch gewußt, aber jetzt in der Aufregung vergessen.“ „Welch ein Verlust für die Menschheit“, ruft der Prüfer daraufhin aus, „Sie waren der einzige Mensch, der gewußt hat, was Elektrizität ist, und Sie Unglücksrabe mußten es vergessen!“

Erste Vermutungen dahingehend, daß Elektrizität kein flüssigkeitsartiges Kontinuum ist, sondern aus besonderen Partikeln besteht, ebenso wie die Überzeugung, daß die elektrischen Partikeln auf irgendeine Weise mit den Atomen verknüpft sein müssen, entstanden bei Erforschung der Elektrolyse.

Michael Faraday (1791—1867) stellte bei Versuchen zur Zerlegung in Wasser gelöster Stoffe beim Durchgang eines Stroms durch eine Lösung fest, daß ein und derselbe elektrische Strom, je nachdem, welche chemische Verbindung im Wasser gelöst ist, unterschiedliche Stoffmengen an den Elektroden abscheidet. Faraday fand, daß zur

Abscheidung eines Grammatoms im Fall eines einwertigen Stoffs 96 500 Coulomb durch den Elektrolyten geschickt werden müssen, während sich diese Zahl bei Abscheidung eines Grammatoms zweiwertiger Stoffe verdoppelt.

Nun glauben Sie vielleicht, Faraday hätte angesichts dieses Ergebnisses „Heureka!“ gerufen und erklärt, er sei hinter die Natur der Elektrizität gekommen? Nein, der große Experimentator ließ seiner Phantasie nicht die Zügel schießen. Bezüglich des elektrischen Stroms verhielt sich Faraday so wie unser Forscher aus dem ersten Kapitel. Er verwendete nur Begriffe, die sich in Zahlen ausdrücken lassen.

Aber wieso denn, könnte jemand fragen, schließlich war damit doch nachgewiesen, daß  $6,02 \cdot 10^{23}$  (zur Erinnerung: die Avogadro'sche Zahl) Atome 96 500 Coulomb Elektrizität transportieren. Wenn ich demnach die zweite Zahl durch die erste dividiere, erhalte ich den Wert jener Elektrizitätsmenge, die ein einwertiges Atom trägt. Als Ergebnis der Division erhält man  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Das ist die kleinste Elektrizitätsmenge, ein „Atom Elektrizität“ bzw. die „Elementarladung“!

Freilich wurde die Avogadro'sche Zahl erst 1870 ermittelt.

Erst danach (es ist nicht viel mehr als 100 Jahre her!) gelangten jene Physiker, die Spaß an Hypothesen haben und sich in ihrer Denkweise wesentlich vom „Nur-Forscher“ unterscheiden, der nicht über die Grenzen des Phänomens hinauszugehen wagt, zu der Einsicht, daß folgende Annahme sehr wahrscheinlich sei. Neben den elektrisch neutralen Atomen existieren Partikeln, die eine oder mehrere (positive oder negative) Elementarladungen tragen. Positiv geladene Atome (Kationen) werden bei der Elektrolyse an der Kathode abgeschieden; Atome, die eine negative Ladung tragen (Anionen), scheiden sich an der Anode ab.

Wasserlösliche Salze zerfallen beim Auflösen in Anionen und Kationen; Kochsalz, d. h. Natriumchlorid, zerfällt beispielsweise nicht in Chlor- und Natriumatome, sondern in positive Natriumionen und negative Chlorionen.

### Ionenströme

Die Erscheinung der Elektrolyse hat logischerweise zu dem Gedanken geführt, es könnten elektrische Partikeln existieren.

Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts fand man Möglichkeiten, Moleküle in geladene Molekülbruchstücke zu verwandeln. (Man bezeichnet diesen Vorgang als Ionisierung.) Es wurde gezeigt, wie sich gerichtete Ströme geladener Partikeln erzeugen lassen, und schließlich wurden Verfahren zur Messung der Ionenladung und -masse entwickelt. Eine erste Bekanntschaft mit Ionenströmen schlossen die Physiker, als sie Glasröhren mit verdünntem Gas in einen Gleichstromkreis schalteten. Liegt an den in die Röhre eingeschmolzenen Elektroden nur eine geringe Spannung an, dann fließt kein Strom. Man fand jedoch, daß sich das Gas sehr einfach in einen Leiter verwandeln läßt. Die Wirkung von Röntgenstrahlen, ultraviolettem Licht, aber auch von radioaktiver Strahlung hat die Ionisierung des Gases zur Folge. Man kann auf solche besonderen Maßnahmen auch verzichten, muß dann aber eine höhere Spannung an dem gasgefüllten Rohr anlegen. Gas verwandelt sich in einen Leiter! Man darf von der Annahme ausgehen, daß seine Moleküle in Anionen und Kationen zerbrechen. Die Anionen wandern zur positiven und die Kationen zur negativen Elektrode. Eine wichtige Etappe bei der Erforschung dieser Erscheinung bestand in der Erzeugung eines Teilchenstroms. Zu diesem Zweck muß in der Elektrode eine Öffnung angebracht werden, und die durch die Öffnung

hindurchtretenden Ionen gleichen Vorzeichens sind in einem elektrischen Feld zu beschleunigen. Mit Hilfe von Blenden läßt sich ein scharf gebündelter Strahl von Anionen bzw. Kationen erzeugen, die eine beträchtliche Geschwindigkeit aufweisen. Trifft dieser Strahl auf einen Schirm von der gleichen Art, wie man ihn in der Bildröhre des Fernsehers verwendet, dann sehen wir einen Leuchtfleck. Wird der Ionenstrom durch zwei senkrecht zueinander angeordnete elektrische Felder geschickt und ändert man die zur Erzeugung dieser Felder an den Kondensatoren anliegende Spannung, kann man den Leuchtpunkt beliebig über den Schirm wandern lassen.

Mit Hilfe einer derartigen Versuchseinrichtung lassen sich die wichtigsten Parameter der Partikeln, insbesondere ihr Ladungsmasseverhältnis, bestimmen.

Im Beschleunigungsfeld gewinnen die Ionen einen Energiebetrag, der gleich der Arbeit der elektrischen Kräfte ist, d. h.

$$\frac{1}{2} mv^2 = eU.$$

Während die Spannung bekannt ist, muß die Teilchengeschwindigkeit ermittelt werden. Dafür gibt es verschiedene Verfahren. So läßt sich beispielsweise die Ablenkung des Lichtflecks auf dem Bildschirm messen. Die Ablenkung wird um so größer sein, je länger der vom Teilchen zurückgelegte Weg und je kleiner seine Anfangsgeschwindigkeit sind. Das Problem läßt sich in Strenge lösen. Es ähnelt der Flugbahnberechnung eines waagrecht geworfenen Steins.

Es gibt auch Verfahren zur direkten Messung jener Zeit, die das Ion für den Gesamtweg benötigt.

Wir kennen nun also die Spannung und die Geschwindigkeit des Ions. Was läßt sich alles daraus berechnen? Aus unserer Gleichung ergibt sich das Verhältnis von Partikelladung zur Partikelmasse. Ein Ärgernis freilich bleibt bestehen: Wie immer man die Versuchsbedingungen

auch ändert, welche Teilchenablenkungen und -beschleunigungen man auch benutzt, es gelingt nie, Ladung und Masse „auseinanderzusortieren“. Erst, wenn man Erkenntnisse der Chemie und den Wert für die Elementarladung, der bei Untersuchung des Elektrolysevorgangs erhalten wurde, zu Hilfe nimmt, gelingt der eindeutige Schluß: Die Ladungen aller einwertigen Ionen sind gleich; die Ladungen aller zweiwertigen Ionen sind doppelt so groß; die Ladungen aller dreiwertigen Ionen sind dreimal so groß usw. Die hochgenaue Messung der Ladungsmasseverhältnisse darf daher als Meßverfahren für die Ionenmasse angesehen werden.

Das ist auch der Grund, weshalb ein Gerät, das auf dem Prinzip des obenbeschriebenen Versuchs beruht und von außerordentlicher Bedeutung für die Chemie und die chemische Technologie ist, die Bezeichnung Massenspektrograph (vgl. Band 4) trägt, obwohl es im Grunde genommen das Verhältnis von Ionenladung zu Ionenmasse mißt.

## **Der Elektronenstrahl**

Wir wollen hier nicht den Zickzackweg jener historischen Ereignisse nachvollziehen, der die Physiker zu der festen Überzeugung führte, daß nicht nur eine kleinste Elektrizitätsmenge existiert, sondern daß diese kleinste Menge auch einen materiellen Träger, das Elektron, besitzt. Statt dessen wollen wir einen Schulversuch beschreiben.

Das hierfür verwendete Gerät hieß früher einmal Kondenröhre. Heute heißt es Elektronenstrahlröhre, Elektronenstrahlkanone oder auch Oszillograph. Sollte Ihre Schulzeit schon lange zurückliegen und Sie dieses Gerät nie gesehen haben, so ist dies kein Grund zum Verzagen. Jeder von uns kennt die Elektronenstrahlröhre, denn sie ist der wohl wichtigste Bestandteil des Fernsehers, auf dessen Bildschirm der Elektronenstrahl Bilder zeichnet.

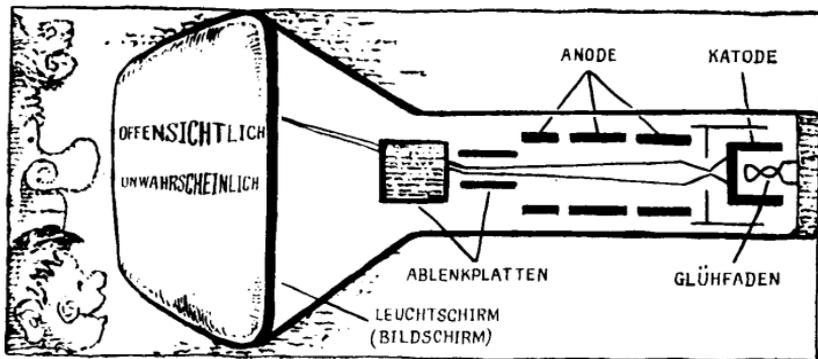


Bild 2.1.

Doch zurück zu unserem Schulversuch. Die Prinzipdarstellung der Röhre zeigt Bild 2.1. Die Röhre ist dual evakuiert; sie enthält keine Moleküle, die etwa zerstört werden könnten. Heizen wir jedoch einen Metallfaden durch Strom (den man als Katodenstrom bezeichnet) auf und schließen Katode und Anode danach an die entsprechenden Pole der Spannungsquelle an, so sehen wir auf dem Bildschirm der Röhre einen Leuchtfleck und können mit Hilfe eines Meßgerätes feststellen, daß ein elektrischer Strom von der Anode zur Katode fließt. Es liegt nahe, diesen Strom als Anodenstrom zu bezeichnen.

Da ein Strom durch das Vakuum fließt, müssen wir den Schluß ziehen, daß der glühende Faden negativ geladene Partikeln emittiert. Diese Erscheinung heißt thermische Elektronenemission. Dazu ist jeder glühende Körper befähigt.

Die Partikeln — und wir wollen nicht verheimlichen, daß es sich dabei wirklich um Elektronen handelt — wandern zu den Anoden, die als „Töpfchen“ mit einer runden Öffnung im Boden ausgeführt sind. Die Elektronen treten in Gestalt eines scharf gebündelten Strahls

aus der Anode aus, der nach den gleichen Verfahren untersucht werden kann, wie wir sie soeben für den Ionenstrahl beschrieben haben.

Nachdem wir uns mit Hilfe des Leuchtschirms davon überzeugt haben, daß der Glühfaden Elektronen emittiert, gehen wir mit Hilfe von Ablenkplatten an die Bestimmung des Ladungsmasseverhältnisses. Wir erhalten folgendes Ergebnis: Das Verhältnis ist für ein Elektron 1840mal größer als für das leichteste Ion, nämlich das Wasserstoffion. Daraus ziehen wir den Schluß, daß die Masse eines Elektrons nur dem 1840sten Teil der Masse eines Wasserstoffions entspricht. Die Masse eines Elektrons beträgt also  $9 \cdot 10^{-28}$  g.

Hier könnte man zu Recht einwenden, daß wir zu hastig waren. Schließlich darf man doch nicht aus der Messung des Ladungsmasseverhältnisses für ein Elektron den Schluß ziehen, daß die Masse des Elektrons kleiner als die Ionenmasse ist. Vielleicht haben ein positives Ion und ein Elektron ganz verschieden große Ladungen?

Die erste Bestimmung des Ladungsmasseverhältnisses für ein Elektron erfolgte bereits Ende des vorigen Jahrhunderts durch den berühmten Physiker Joseph John Thomson (1856—1940). (Seine Freunde nannten ihn Dshidshi\*. Wahrscheinlich hat diese Abkürzung, die man in der Memoirenliteratur immer wieder liest, weniger mit einer besonderen Vorliebe der Engländer für alle Arten von Abkürzungen zu tun als damit, daß im 19. Jahrhundert ein anderer hervorragender Physiker gleichen Namens lebte. Gemeint ist William Thomson, der für seine wissenschaftlichen Verdienste in den Adelsstand erhoben wurde und seit 1892 den Titel Lord Kelvin of Largs trug.) Natürlich war seine Katodenröhre im Vergleich zum heutigen Oszillographen unvollkommen.

---

\* Die Bezeichnung rührt von den englisch ausgesprochenen Anfangsbuchstaben der beiden Vornamen Thomsons her. Anm. d. Übers.

Thomson verstand sehr wohl, daß seine Messungen den diskreten Charakter der elektrischen Ladung und die Existenz einer kleinsten Elektrizitätsmenge nur wahrscheinlich machen.

Wie seltsam es auch scheinen mag: Obwohl die Physiker das Verhalten der Katoden- und Anodenstrahlen beobachtet hatten, blieben viele bei der Auffassung, diese Strahlen besäßen Wellennatur. Jene Wissenschaftler erkannten nicht, daß Ströme, die durch einen Metalldraht, eine Flüssigkeit sowie durch Gase und Vakuum fließen, nahe Verwandte sind. Sie wollten unmittelbare Beweise. Verständlich: Um aus einer hypothetischen Annahme eine Tatsache werden zu lassen, reichen mittelbare Argumente nicht aus.

Zunächst mußte die hypothetische Annahme also durch direkte Messungen des Wertes der Teilchenladung gestützt werden. Entsprechende Versuche unternahmen — und keineswegs erfolglos — Thomson selbst sowie seine Schüler in den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts. Erste genaue Messungen erfolgten dann 1909 durch Robert Millikan.

### **Der Millikan-Versuch**

Die Idee vom diskreten Charakter der Elektrizität erscheint sehr kühn, und die Berechnung der Elementarladung läßt sich auch anders interpretieren. Warum sollte man beispielsweise nicht sagen, daß Anionen tatsächlich existieren, die negative Elektrizität jedoch eine Flüssigkeit ist, die von einem positiven Ion mitgerissen wird. Ein Ion fängt dabei eine bestimmte Menge dieser Flüssigkeit ein, ein anderes Ion wieder eine andere Menge, und der Versuch liefert nur einen Mittelwert. Das wäre eine durchaus vernünftige Erklärung.

Wie wir soeben feststellten, waren Thomsons Versuche zwar ein wesentliches, aber nicht das entscheidende Argu-

ment zugunsten der Existenz des Elektrons. Wir können daraus ableiten, wie wichtig für die Physik ein Experiment war, das mit einem Mal alle Zweifel beseitigte. Dieses Experiment unternahm 1909 der amerikanische Physiker Robert Millikan. Lassen wir seine anderen Arbeiten außer acht, so genügte schon allein dieses eine Experiment, um seinen Namen in alle Physiklehrbücher Eingang finden zu lassen.

Der Grundgedanke seines Versuchs fußt auf einer einfachen Tatsache. So wie ein Glasstab beim Reiben elektrische Eigenschaften gewinnt, tun dies auch andere Körper. Man bezeichnet diese Erscheinung als Elektrisierung durch Reibung. Warum sollte man jedoch glauben, daß nur Festkörper diese Eigenschaft besitzen? Sollten nicht auch Öltröpfchen elektrisiert werden, wenn wir sie in eine Kammer einspritzen? Schließlich ist das Öl beim Passieren der Zerstäuberdüse auch der Reibung ausgesetzt. Und so verhält es sich in Wirklichkeit auch. Um sich davon zu überzeugen, bedarf es einer im Prinzip sehr einfachen Versuchsanordnung: Man sprüht einen aus Öltröpfchen bestehenden Strahl in den Raum zwischen den waagrecht angeordneten Platten eines Kondensators und ordnet ein Mikroskop so an, daß sich die Bewegung der Tröpfchen verfolgen läßt. Solange noch kein elektrisches Feld vorhanden ist, werden die Tröpfchen natürlich unter dem Einfluß der Schwerkraft nach unten sinken. Die Tröpfchen sind leicht, so daß die Schwerkraft fast augenblicklich durch die Luftwiderstandskraft ausgeglichen wird und die Tröpfchen gleichförmig nach unten sinken. Sobald aber eine Spannung an die Kondensatorplatten gelegt wird, ändert sich das Bild. Die Tröpfchenbewegung wird entweder beschleunigt oder verzögert, je nachdem, welche Richtung das elektrische Feld hat. Millikan wählte die Feldrichtung so, daß die Tröpfchen ihre Bewegung verlangsamen mußten. Durch allmähliche Vergrößerung der Feldstärke gelang es ihm, die Tröpfchen

in der Luft in der Schwebelage zu halten. Stundenlang beobachtete der Forscher das Verhalten eines einzelnen Tröpfchens. Mit Hilfe des Feldes vermochte er, die Bewegung des Tröpfchens zu steuern bzw. nach Wunsch auch anzuhalten.

Was läßt sich auf der Grundlage dieses Versuchs berechnen? Zunächst wollen wir die Angaben diskutieren, die sich während der Beobachtungen ohne Feldeinwirkung ergeben. Die Gleichung zwischen Schwerkraft und Luftwiderstand kann in folgender Form aufgeschrieben werden:

$$mg = av.$$

Die Dichte des Öls läßt sich mittels unabhängiger Versuche leicht bestimmen, und der Tröpfchendurchmesser wird mit Hilfe des Mikroskops gemessen. Dann läßt sich die Masse eines Tröpfchens ohne Schwierigkeiten berechnen. Da die Tröpfchen langsam nach unten sinken, erhalten wir die Fallgeschwindigkeit eines Tröpfchens  $v$  hinreichend genau anhand von Strichmarkierungen im Mikroskop und unter Zuhilfenahme einer Stoppuhr. Aus der oben angegebenen Gleichung läßt sich nun der Widerstandskoeffizient  $a$  ermitteln.

Schalten wir nun das Feld ein. Am günstigsten ist es, die Feldstärke so zu wählen, daß der Tropfen gleichförmig zu steigen beginnt. Zu den beiden Kräften, die bereits auf das Tröpfchen wirkten, ist eine dritte Kraft gekommen, die durch das elektrische Feld erzeugt wird; die Feldstärke  $E$  ist uns als Verhältnis der Spannung zum Plattenabstand des Kondensators bekannt. Eine gleichförmige Aufwärtsbewegung bedeutet, daß sich die drei Kräfte im Gleichgewicht befinden. Diese Gleichgewichtsbedingung sieht dann folgendermaßen aus:

$$QE - mg = av'.$$

Der neue Geschwindigkeitswert  $v'$  wird ebenfalls mit dem Mikroskop gemessen. Die Werte aller in dieser Gleichung enthaltenen Größen sind uns damit bis auf den Wert der Tröpfchenladung bekannt. Wir berechnen den Wert dieser Ladung und tragen ihn ins Laborbuch ein, was für jeden ordentlichen Experimentator obligatorisch ist.

Und nun kommen wir zur wichtigsten Idee von Millikan. In einem Elektrolyten, so überlegte er sich, wird der Strom durch Ionen unterschiedlichen Vorzeichens transportiert. Ionen lassen sich aber auch in einem Gas erzeugen. Luft wird durch viele verschiedene Verfahren ionisiert. So kann man die ganze Versuchsanordnung etwa in der Nähe einer Röntgenröhre aufbauen. Röntgenstrahlen ionisieren die Luft. Das war damals bereits bekannt. Ein geladenes Tröpfchen muß logischerweise Ionen mit entgegengesetztem Vorzeichen anziehen. Sobald nun ein Ion mit dem Tröpfchen in Berührung kommt, ändert sich dessen Ladung. Im gleichen Augenblick, da sich die Ladung geändert hat, muß das Tröpfchen auch seine Geschwindigkeit ändern, die man sogleich durch eine neue Messung ermittelt.

Beobachtungen bestätigten die Richtigkeit dieses Gedankens. Nach Einschalten der Röntgenröhre setzten sprunghafte Geschwindigkeitsänderungen der Tröpfchen ein. Der Beobachter konzentrierte seine Aufmerksamkeit nun auf ein bestimmtes Tröpfchen und ermittelte dessen Geschwindigkeitsdifferenzen vor und nach Einschalten der Röntgenröhre. Aus der vorhin angeführten Formel ließ sich dann unmittelbar der Wert von  $Q$  berechnen.

Sie haben noch nicht eingesehen, warum das alles gemacht wird? Angenommen, es existiert wirklich eine elektrische Elementarladung, dann muß ihr Wert dem gemessenen Wert entsprechen, sofern sich dem betrachteten Tröpfchen nur ein einwertiges Ion angelagert hat; haben sich mehrere Ionen an das betrachtete Tröpfchen

„angehängt“, dann müssen ganzzahlige Vielfache der Elementarladung gemessen werden.

Millikan unternahm seine Versuche mit Tröpfchen von Öl, Wasser, Quecksilber und Glycerin; er wechselte auch das Vorzeichen der Tröpfchenladung und füllte sein Laborbuch mit einigen hundert Zahlenwerten für  $Q$ , und alle waren Vielfache ein und desselben Wertes, der seinerzeit durch elektrolytische Untersuchungen gefunden worden war.

Nachdem Millikan seine Ergebnisse veröffentlicht hatte, zweifelten auch die Skeptiker nicht mehr, daß die elektrische Ladung in der Natur in diskreten Portionen angetroffen wird. Strenggenommen beweisen aber auch Millikans Versuche nicht unmittelbar die Existenz des Elektrons als Partikel.

Doch der Hypothese gehen Fakten voraus. Von der „körnigen“ Natur der Elektrizität war manch einer bereits Anfang des 19. Jahrhunderts überzeugt. Die Ladung eines Ions hatte Stony 1891 erstmals berechnet; er schlug auch den Terminus „Elektron“ vor, allerdings nicht für eine Partikel, sondern für die Ladung des einwertigen negativen Ions. Thomsons Versuche veranlaßten die meisten Physiker, an die Existenz des Elektrons als Partikel zu glauben. Drude definierte als erster eindeutig das Elektron als eine Partikel, die die Elementarladung negativer Elektrizität trägt.

So war das Elektron anerkannt, noch ehe es jemand „gesehen“ hatte.

Den direkten Beweis zur Existenz des Elektrons lieferten spätere superexakte Versuche. Man läßt einen schwachen Partikelstrom auf einen Bildschirm fallen und kann die Partikeln dadurch einzeln zählen. Jedes Elektron liefert einen Lichtblitz (auch als Szintillation bezeichnet) auf dem Leuchtschirm. Übrigens benutzt man für diesen Zweck schon seit langem keine Leuchtschirme mehr, sondern eigens dafür konstruierte Zähler, die nach

ihrem Erfinder Geigerzähler heißen. Der Grundgedanke dieses Zählers beruht auf der Tatsache, daß ein einziges Elektron — dem Abzugshahn eines Revolvers vergleichbar — einen starken Stromimpuls auslöst, der dann leicht registriert werden kann. So erhält der Physiker die Möglichkeit, Elektronen zu zählen, die beispielsweise während einer Sekunde in eine „Falle“ geraten. Verwendet man als derartige Falle einen Metallkolben, in den Elektronen eintreten, dann läßt sich der Kolben allmählich auf, und schließlich wird eine Elektrizitätsmenge erreicht, die genügend groß ist, um sie genau messen zu können. Um die Elektronenladung zu ermitteln, braucht man diese Elektrizitätsmenge nur noch durch die Anzahl der eingefangenen Elektronen zu dividieren.

Erst jetzt konnte man ohne Skrupel sagen: Die Existenz des Elektrons hat aufgehört, eine hypothetische Annahme zu sein. Sie ist Tatsache.

So haben wir nun in aller Eile jene Entdeckungen abgehandelt, die das Fundament der Physik von heute bilden. Aber das ist nun einmal ihr Schicksal! Das Neue verdrängt das Alte, und selbst Schlüsselereignisse, die sich bei der Errichtung des Tempels der Wissenschaft abspielten, gehören in den Zuständigkeitsbereich der Historiker.

Wir können jetzt auch die Frage beantworten, was Elektrizität ist. Das elektrische Fluidum ist ein Strom elektrischer Partikeln. Ein Körper heißt elektrisch geladen, wenn die Anzahl von Partikeln eines Vorzeichens größer ist als die Anzahl von Partikeln des umgekehrten Vorzeichens.

„Das ist vielleicht eine Erklärung“, höre ich hier einen Leser unwillig ausrufen, „und was ist, bitteschön, eine elektrische Partikel?“

„Ist das etwa unklar? Partikeln sind elektrisch, wenn sie nach dem Coulombschen Gesetz miteinander in Wechselwirkung treten.“

„Und das ist alles?“ fragt der Leser ungläubig.

„Alles“, antwortet der Physiker, „alles, was die Antwort auf Ihre Frage betrifft.“ Aber wir haben noch Antworten auf viele andere interessante Fragen parat. So haben wir ja nicht gesagt, in welchen Fällen wir den Elementarteilchen der positiven Elektrizität begegnen werden. Auch werden wir erfahren, daß elektrische Partikeln nicht nur durch Ladung und Masse, sondern auch durch andere Eigenschaften gekennzeichnet werden.

Zunächst jedoch wollen wir über die Struktur des Atoms berichten.

### Das Atommodell

Wie ist ein Atom aus elektrischen Partikeln aufgebaut? Die Antwort auf diese Frage wurde mit Hilfe der Strahlen erhalten, die das Radium aussendet. Über diesen bemerkenswerten Stoff und über die große Familie der natürlichen und künstlichen radioaktiven Elemente werden wir im vierten Band berichten. An dieser Stelle brauchen wir nur zu wissen, daß Radium kontinuierlich eine harte elektromagnetische Strahlung (Gammastrahlen), einen Strom von Elektronen (die seinerzeit den Namen Betastrahlen erhielten) sowie Alphastrahlen aussendet, die aus zweifach positiv geladenen Heliumatomen bestehen.

1911 schlug der bedeutende englische Physiker Ernest Rutherford (1871—1937) das sogenannte Planetenmodell des Atoms vor, zu dem er aufgrund sorgfältiger Untersuchungen der Streuung von Alphateilchen an verschiedenen Stoffen gelangt war. Rutherford unternahm seine Versuche an einer Goldfolie, deren Dicke nur ein zehntel Mikrometer betrug. Dabei stellte sich heraus, daß von 10 000 Alphateilchen nur eines um einen größeren Winkel als  $10^\circ$  abgelenkt wird.

Im Verlauf dieser geradezu verblüffend einfachen Versuche wurde der Durchgang jedes einzelnen Teilchens fest-

gehalten. Die heutige Technik erlaubt inzwischen die vollautomatische Ausführung entsprechender Messungen.

Damit wurde sogleich offenbar, daß die Atome im wesentlichen aus nichts, d. h. aus leerem Raum, bestehen. Die seltenen Frontalzusammenstöße sind so zu verstehen, daß sich im Innern des Atoms ein positiv geladener Kern befindet. In der Umgebung des Kerns sind die Elektronen angeordnet. Sie sind sehr leicht und stellen daher für die Alphateilchen kein ernstzunehmendes Hindernis dar. Die Elektronen bremsen Alphateilchen zwar ab, doch vermag der Zusammenprall mit jedem einzelnen Elektron das Alphateilchen nicht aus seiner Bahn abzulenken.

Rutherford ging von der Voraussetzung aus, daß es sich bei den Wechselwirkungskräften zwischen den gleichnamig geladenen Atomkernen und den Alphateilchen um Coulombsche Kräfte handelt. Weiterhin nahm er an, daß die Atommasse im Kern des Atoms konzentriert sei, und berechnete die Wahrscheinlichkeit für die Ablenkung einer Partikel um einen bestimmten Winkel. Er ermittelte die exakte Übereinstimmung zwischen Theorie und Versuch.

Genau das ist der Weg, auf dem Physiker die von ihnen erdachten Modelle überprüfen.

„Ermöglicht das Modell die Vorhersage der Versuchsergebnisse?“

„Ja.“

„Es spiegelt also die Wirklichkeit wider?“

„Nicht so hastig. Das Modell erklärt eine ganze Reihe von Erscheinungen; deshalb ist es ein gutes Modell. Seine Präzisierung hingegen wird die Zukunft bringen...“

Rutherfords Versuchsergebnisse ließen keinen Zweifel mehr an der Feststellung: Elektronen bewegen sich unter dem Einfluß Coulombscher Kräfte in Kernnähe.

Aus der Theorie folgten auch einige quantitative Abschätzungen, die sich in der Folgezeit bestätigten. Die Größe der kleinsten Atomkerne betrug ungefähr  $10^{-13}$  cm,

während die Größe eines Atoms in der Größenordnung von  $10^{-8}$  cm lag.

Durch einen Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerisch erhaltenen Werten konnten auch die Ladungen der aufeinanderstoßenden Kerne abgeschätzt werden. Diese Abschätzungen spielten eine sehr wichtige, wenn nicht überhaupt die wichtigste Rolle für die Interpretation des Periodensystems der Elemente.

Ein Atommodell haben wir nun. Doch sofort taucht die nächste Frage auf. Warum stürzen die Elektronen (als negativ geladene Partikeln) nicht in den (positiv geladenen) Kern? Warum ist das Atom stabil?

Was soll daran unverständlich sein, könnte der Leser fragen. Schließlich stürzen auch die Planeten nicht in die Sonne. Die Coulombsche Kraft ist ebenso wie die Schwerkraft eine zentripetal wirkende Kraft und gewährleistet den kreisförmigen Umlauf der Elektronen um den Kern.

Doch genau hier liegt der Hund begraben: Die Analogie zwischen dem Planetensystem und einem Atom ist nur oberflächlich. Wie wir später erfahren werden, muß das Atom, den allgemeinen Gesetzen des elektromagnetischen Feldes folgend, elektromagnetische Wellen emittieren. (Übrigens braucht man dafür die Theorie des Elektromagnetismus nicht einmal zu kennen. Stoff, also Atome, ist befähigt, Licht und Wärme zu emittieren. Wenn es aber so ist, verliert das Elektron Energie und muß demzufolge in den Kern stürzen.)

Welchen Ausweg gibt es? Sehr „einfach“: Man muß die Tatsache akzeptieren und sie in den Rang eines Naturgesetzes erheben. Dieser Schritt wurde 1913 von einem großen Physiker unseres Jahrhunderts getan: von Niels Bohr (1885—1962).

## Die Quantelung der Energie

Wie alle ersten Schritte wurde auch dieser Schritt recht zögernd unternommen. Wir werden hier ein neues Naturgesetz darlegen, das nicht nur Rutherfords Atom rettete, sondern uns auch zu der Einsicht zwang, daß die Mechanik der großen Körper für Partikeln kleiner Massen nicht anwendbar ist.

Die Natur ist nun einmal so eingerichtet, daß eine Reihe mechanischer Größen, wie etwa das Drehmoment und die Energie, für ein beliebiges System miteinander in Wechselwirkung stehender Partikeln keine kontinuierliche Reihe von Werten annehmen kann. Im Gegenteil, das Atom, von dem hier sogleich die Rede sein wird, oder auch der Atomkern, über dessen Struktur wir später berichten werden, hat eine nur dem betreffenden System eigene Folge energetischer Niveaus. Es gibt ein niedrigstes Niveau (oder Nullniveau). Die Energie des Systems kann nicht kleiner sein als der Wert, der diesem Niveau entspricht. Für den Fall des Atoms heißt dies, daß es einen Zustand gibt, in dem das Elektron einen gewissen Minimalabstand vom Kern hat.

Die Änderung der Energie eines Atoms kann nur sprungartig erfolgen. Ein „Aufwärtssprung“ bedeutet, daß das Atom Energie absorbiert hat. Erfolgt der Sprung „abwärts“, dann hat das Atom Energie emittiert.

Wir werden später sehen, wie elegant sich die Emissionsspektren verschiedener Systeme unter diesem Aspekt entschlüsseln lassen.

Das hier formulierte Gesetz heißt das Gesetz der Energiequantelung. Man kann auch sagen, daß die Energie Quantencharakter besitzt.

Vermerkt werden muß, daß das Gesetz der Quantelung von allgemeingültigem Charakter ist. Es gilt nicht etwa nur für das Atom, sondern auch für jeden Gegenstand, der meinethalben aus vielen Milliarden von Ato-

men besteht. Haben wir es jedoch mit großen Körpern zu tun, dann kann es häufig geschehen, daß wir die Energiequantelung „nicht bemerken“. In einem aus Milliarden und Abermilliarden von Atomen bestehenden Gegenstand wächst die Anzahl der Energieniveaus nämlich, grob gesagt, auf das Mehrmilliardenfache. Infolgedessen liegen die Energieniveaus so dicht beieinander, daß sie praktisch ineinanderfließen. Darum bemerken wir den diskreten Charakter der möglichen Energiewerte nicht. Jene Mechanik, die wir im ersten Band dargestellt haben, ändert sich praktisch so lange nicht, wie von großen Körpern die Rede ist.

Im zweiten Band haben wir festgestellt, daß die Energieübertragung von einem Körper auf einen anderen in Form von Arbeit und in Form von Wärme stattfinden kann. Nunmehr können wir auch erklären, worin sich diese beiden Formen der Energieübertragung unterscheiden. Bei einer mechanischen Einwirkung (etwa bei Kompression) werden die Energieniveaus verschoben. Die Verschiebung ist äußerst geringfügig und zeigt sich erst bei hochgenauen Versuchen, und auch dann nur, wenn die Drücke hinreichend groß sind. Was die Wärmewirkung betrifft, so besteht sie darin, daß ein System von einem niedrigen Energieniveau auf ein höheres (Erwärmung) oder von einem hohen auf ein niedrigeres Energieniveau (Abkühlung) gebracht wird.

Die Quantelung der Energie genau wie der anderen mechanischen Größen ist ein allgemeines Naturgesetz, aus dem sich durchaus streng höchst unterschiedliche Folgerungen ableiten lassen, die dann ihre experimentelle Bestätigung finden.

Vielleicht möchten Sie nun fragen, warum die Energie gequantelt ist. Auf diese Frage gibt es keine Antwort. Die Natur ist so eingerichtet! Jede Erklärung ist die Zurückführung einer Einzeltatsache auf einen allgemeineren Sachverhalt. Gegenwärtig kennen wir keine

einzigste so allgemeine Feststellung, daß sich daraus als Folgerung die Quantelung der Energie ergeben würde. Allerdings ist es nicht ausgeschlossen, daß in der Folgezeit so weitreichende und umfassende Gesetze entdeckt werden, daß sich die Prinzipien der Quantenmechanik als Folgerung herleiten lassen. Wie dem auch sei, für den heutigen Tag ist das Gesetz der Quantelung eines der wenigen großen Naturgesetze, das keiner kausalen Begründung bedarf. Die Energie ist gequantelt, weil sie gequantelt ist.

In dieser allgemeinen Form wurde das Gesetz in den Jahren 1925 bis 1927 durch die Arbeiten des französischen Physikers Louis de Broglie sowie der deutschen Physiker Erwin Schrödinger und Werner Heisenberg angegeben. Die Lehre, der das Quantelungsprinzip zugrunde liegt (das Wort Quant kommt übrigens von Quantum und bedeutet soviel wie Portion), hat die Bezeichnung Quanten- oder Wellenmechanik erhalten. Aber darüber später.

### **Das Periodensystem der Elemente nach Mendelejew**

Im Jahr 1869 veröffentlichte Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834—1907) sein Periodensystem der chemischen Elemente. Wir werden es hier nicht abdrucken, Sie finden es in jedem Lehrbuch der Chemie. Es sei nur daran erinnert, daß Mendelejew beim Ordnen der damals bekannten Elemente nach ihren Atommassen feststellte, daß sich die chemischen Eigenschaften sowie einige physikalische Besonderheiten der Elemente periodisch in Abhängigkeit von der Atommasse ändern.

In Mendelejews tabellarischer Anordnung der Elemente gehört jedes Element einer von neun Gruppen sowie einer von sieben Perioden an. Die zu einer Gruppe gehörenden Elemente schrieb Mendelejew spaltenweise

so übereinander, daß die Elemente, deren Symbole jeweils untereinander standen, ähnliche chemische Eigenschaften besaßen. Für noch nicht entdeckte Elemente ließ er „Kästchen“ in seiner Tabelle frei. Scharfsinnig setzte er Nickel an den „richtigen“ Platz nach Kobalt, obwohl dieses eine etwas größere Atommasse besitzt.

Einige „Kästchen“ wurden noch zu Lebzeiten Mendelejews „besetzt“; damit war sein Weltruhm begründet. Nun war klar, daß das Periodensystem nicht lediglich ein formaler Vorgang, sondern die Entdeckung eines großen Naturgesetzes war.

Der Sinn der Ordnungszahl, die jedes Element im Periodensystem erhält, trat erst zutage, als alle Zweifel der Physiker am Rutherford'schen Planetenmodell des Atoms und an den Gesetzen der Energiequantelung ausgeräumt waren. Worin besteht dieser Sinn? Sehr einfach: Die Ordnungszahl entspricht der Anzahl von Elektronen, die um den Kern kreisen. Oder anders formuliert: Die Ordnungszahl eines Elements gibt die positive Ladung seines Kerns, ausgedrückt in Einheiten der Elektronenladung, an (elektrische Neutralität der Atome).

Das Periodensystem nach Mendelejew, das Prinzip der Energiequantelung sowie die Untersuchung der charakteristischen optischen und Röntgenspektren der Atome (wovon später die Rede sein wird) führten zum Verständnis des gleichartigen Verhaltens von Atomen einer Spalte des Periodensystems.

Der Energieinhalt eines Atoms ist gleich der Wechselwirkungsenergie zwischen seinen Elektronen und dem Kern. Da die Energie gequantelt ist, nahm man an, daß sich die Elektronen an jedem Atom nach ihrem Energiegehalt regelmäßig anordnen lassen. Die Bindung des ersten Elektrons am Kern ist am stärksten, die des zweiten schwächer, die des dritten noch schwächer usw., d. h., die Elektronen eines Atoms sind gewissermaßen auf einer energetischen Stufenleiter angeordnet. Dieser

logische Schluß trifft zwar zu, doch ergibt sich aus dem Experiment eine Präzisierung des Bildes. Zum ersten stellte sich heraus, daß jede Energiestufe nicht nur von einem, sondern von zwei Elektronen besetzt sein kann. Freilich sind diese Elektronen nicht gleich, sondern unterscheiden sich voneinander durch eine Eigenschaft, die als „Spin“ bezeichnet wird. Es handelt sich um eine vektorielle Eigenschaft. Zur Veranschaulichung könnte man sich vorstellen, daß auf einer besetzten Stufe zwei „Pünktchen“ sitzen, die mit Pfeilen versehen sind; ein Pfeil zeigt „nach unten“, der andere „nach oben“.

Das Wort „Spin“ ist wie folgt entstanden. Es ist ein englisches Wort und läßt sich mit „Drall“ übersetzen. Um sich den Unterschied zwischen zwei auf einer Stufe befindlichen Elektronen zu veranschaulichen, stellte man sich vor, daß eins der beiden Elektronen im Uhrzeigersinn, das andere im Gegenuhrzeigersinn um seine Achse rotiert. Dieses Modell wurde durch die oberflächliche Ähnlichkeit eines Atoms und des Planetensystems angeregt. Wenn das Elektron so etwas wie ein Planet sein sollte, warum sollte man ihm dann nicht erlauben, um seine Achse zu rotieren? Aber ich muß Sie wieder einmal enttäuschen: Man kann sich den Spin eines Elektrons nicht wirklich vorstellen. Man kann ihn aber messen, wie wir im folgenden sehen werden.

Der zweite wichtige Schluß, zu dem uns die aufmerksame Untersuchung der Atomspektren geführt hat, besteht darin, daß die Abstände zwischen den Energiestufen unterschiedlich sind und sich in Gruppen einteilen lassen.

Auf die erste Stufe, die als *K*-Schale bezeichnet wird, folgt eine energetische Lücke; daran schließt sich eine aus acht Elektronen bestehende Gruppe an, die als *L*-Schale bezeichnet wird; darauf folgt die mit 18 Elektronen besetzte *M*-Schale usw. Wir wollen hier nicht die Lage der Schalen und die Reihenfolge beschreiben, in

der sie bei den jeweiligen Atomen aufgefüllt werden. Das Bild, das wir dazu entwerfen müßten, wäre nämlich gar nicht so einfach, und seine Beschreibung würde viel Raum beanspruchen. Einzelheiten spielen in unserer Darstellung keine Rolle, und wir haben die Energiestufen nur erwähnt, um die Ähnlichkeit jener Atome zu erklären, die im Periodensystem untereinander angeordnet sind. Sie alle haben nämlich auf der äußeren Schale die gleiche Anzahl von Elektronen.

Damit wird auch der chemische Begriff der Valenz oder Wertigkeit des Atoms klar. So haben Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Zäsium und Franzium je ein Elektron auf der Außenschale. Bei Beryllium, Magnesium, Kalzium usw. sind es je zwei Elektronen. Die Valenzelektronen sind am schwächsten an ihr Atom gebunden. Darum bilden die Atome der in der ersten Spalte des Periodensystems stehenden Elemente bei ihrer Ionisierung vorzugsweise einfach geladene Partikeln. Die Ionen von Beryllium, Magnesium usw. sind zweifach geladen usf.

### Die elektrische Struktur der Moleküle

Das Molekül bezeichnen Chemiker als den kleinsten Repräsentanten eines Stoffs. Physiker dagegen benutzen dieses Wort nur dann, wenn dieser kleinste Repräsentant tatsächlich als separater kleiner Körper existiert.

Existiert nun ein Kochsalzmolekül? Natürlich, wird der Chemiker antworten, und schreibt sofort die zugehörige Formel  $\text{NaCl}$  auf. Kochsalz ist Natriumchlorid. Sein Molekül besteht aus einem Natriumatom und einem Chloratom. Freilich trifft diese Antwort nur formal zu. In Wahrheit lassen sich jedoch weder in einem Kochsalzkriställchen noch in einer wäßrigen Kochsalzlösung noch etwa in dampfförmigem Natriumchlorid Atompaare feststellen, die sich wie ein zusammengehöriges Ganzes

verhalten. Wir haben im zweiten Band gesagt, daß jedes Natriumatom innerhalb eines Kochsalzkristalls von sechs Chloratomen umgeben ist. Alle diese nächstbenachbarten Chloratome sind gleichberechtigt, und niemand vermag zu sagen, welches von ihnen dem betrachteten Natriumatom „angehört“.

Nun lösen wir Kochsalz in Wasser auf. Dabei zeigt sich, daß diese Lösung den elektrischen Strom ausgezeichnet leitet. Man kann nun experimentell in Strenge nachweisen, daß der elektrische Strom einen Strom negativ geladener Chloratome darstellt, die sich in einer Richtung bewegen, sowie einen Strom positiv geladener Natriumatome, die sich in entgegengesetzter Richtung bewegen. Also bilden die Atome von Chlor und Natrium auch in der Lösung keine fest miteinander verknüpften Atompaaire.

Nachdem das Atommodell etabliert war, lag auf der Hand, daß ein Chloranion nichts anderes ist als ein Chloratom mit einem „überschüssigen“ Elektron, während dem Natriumkation ein Elektron „fehlt“.

Läßt sich daraus der Schluß ziehen, daß auch festes Natriumchlorid nicht aus Atomen, sondern aus Ionen aufgebaut ist? Ja. Diese Annahme wird durch viele Versuche bewiesen, die wir hier außer acht lassen wollen.

Was ist aber mit dampfförmigem Natriumchlorid? Auch im Natriumchloriddampf finden wir keine Moleküle. Dampfförmiges Natriumchlorid besteht aus Ionen oder verschiedenen, äußerst instabilen Ionengruppen. Man kann bei Ionenverbindungen von Molekülen nur im stöchiometrischen Sinn dieses Wortes sprechen.

!Soweit Ionenverbindungen wasserlöslich sind, liegen sie in der Lösung vollständig dissoziiert vor. Derartige Lösungen, als deren klassisches Beispiel viele Metallsalze wie etwa das Natriumchlorid dienen können, besitzen eine gute Leitfähigkeit und heißen — weil sie vollständig dissoziiert sind — starke Elektrolyte,

Wir wollen nun einige Beispiele von Stoffen angeben, die aus Molekülen im eigentlichen Sinn aufgebaut sind. Dazu gehören Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe, Kohlenhydrate, Steroide, Vitamine ... Man könnte diese Aufzählung noch lange fortsetzen.

Alle Klassifikationen gelten stets mit gewissen Einschränkungen. Ich muß daher vorsorglich darauf verweisen, daß es auch Fälle gibt, wo ein Stoff in einem Aggregatzustand aus Molekülen im eigentlichen Sinn besteht, in anderen Aggregatzuständen hingegen nicht. Zu diesen Stoffen gehört auch ein so wichtiger Stoff wie Wasser. Die Moleküle des Wasserdampfs sind separate kleine Körper. Der Versuch hingegen, in Eiskristallen ein Molekül zu „umreißen“ und zu sagen, daß dieses eine konkrete Wasserstoffatom nur mit diesem konkreten anderen Sauerstoffatom verbunden sei, macht bereits Schwierigkeiten.

Doch wie dem auch sei: Die Klasse der molekularen Kristalle ist sehr groß.

Wir haben bereits im zweiten Band darüber gesprochen, wie molekulare Kristalle aufgebaut sind. Erinnern wir uns daran, daß das Kohlenstoffatom im  $\text{CO}_2$ -Kristall zwei sehr nahe angeordnete Sauerstoffnachbaratome besitzt. Auch in allen anderen Fällen sehen wir bei Untersuchung der Struktur eines molekularen Kristalls sogleich, daß sich der Kristall in eng aneinandergelagerte Atomgruppen gliedern läßt.

Wenn der Abstand zwischen Atomen klein ist, so müssen sie durch große Kräfte miteinander verbunden sein. Genauso ist es auch. Überschlägig formuliert, sind die Bindungskräfte zwischen Atomen, die einem Molekül angehören, hundert- und gelegentlich auch tausendfach größer als die zwischen Atomen benachbarter Moleküle wirkenden Kräfte.

Worin besteht eigentlich die intramolekulare Bindung? Es dürfte einleuchten, daß man hier mit Vorstel-

lungen über die wechselseitige Anziehung negativ bzw. positiv geladener Ionen nicht auskommen kann. Es gibt ja auch Moleküle von Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff, die aus gleichartigen Atomen aufgebaut sind. Die Annahme, ein Atom solle ein Elektron verlieren, während das andere ein Elektron dazugewinnt, verbietet sich von selbst. Warum sollte ein Elektron den Aufenthalt in der Nähe nur eines von zwei völlig gleichartigen Atomen vorziehen?

Die Erklärung der innermolekularen Bindung kam erst mit der Quantenmechanik. Wir haben vorhin gerade erläutert, daß die Energie jedes beliebigen Systems gequantelt ist, daß sich auf jeweils einem Energieniveau zwei Elektronen mit gegenläufigem Spin befinden können. Aus den Prinzipien der Quantenmechanik ergibt sich eine interessante Folgerung. Es konnte durch eine strenge mathematische Ableitung (die wir wegen ihrer Kompliziertheit hier nicht anführen) gezeigt werden, daß der niedrigste Energiewert, den ein Elektron anzunehmen vermag, durch die Größe des Gebiets bestimmt wird, in dem sich das Elektron bewegt. Je größer es ist, um so niedriger liegt die Energie dieses „Nullniveaus“.

Stellen wir uns vor, daß sich zwei Wasserstoffatome einander annähern. Vereinigen sie sich zu einem System, dann wird der „Wohnraum“, der jedem Elektron zur Verfügung steht, ungefähr verdoppelt. Zwei Elektronen mit gegenläufigem Spin können in ein und derselben „Wohnung“ friedlich zusammenleben. Diese Art der „Wohngemeinschaft“ hat also Vorteile. Der Existenzbereich für beide Elektronen ist größer geworden. Also verringerte sich die Gesamtenergie des Systems nach Vereinigung zweier Atome zu einem Ganzen. Andererseits ist uns bekannt, daß jedes System bestrebt ist — sofern dafür nur eine Möglichkeit besteht —, in den energieärmsten Zustand überzugehen. Aus dem gleichen Grund rollt eine Kugel den Berg hinunter.

Die Ausbildung einer chemischen Bindung bedeutet also eine Vergesellschaftung der Elektronen. Wir haben eine gewisse Anzahl von Elektronen (die als innere Elektronen bezeichnet werden), die um die Atomkerne umlaufen, während einige Elektronen (sie werden als äußere Elektronen bezeichnet) in ihrer Bewegung zumindest ein Paar nächstbenachbarter Atome umfassen oder gelegentlich auch durch sämtliche Atome eines Moleküls „vagabundieren“.

Einen aus Molekülen aufgebauten Stoff erkennen wir an seinen elektrischen Eigenschaften. Die Lösung eines derartigen Stoffs leitet den Strom nicht. Seine Moleküle zerfallen nicht, und das Molekül als Ganzes ist elektrisch neutral. Auch im flüssigen bzw. gasförmigen Zustand behalten die Moleküle ihre Struktur bei: Die gesamte Atomgruppe bewegt sich wie ein Ganzes, egal, ob es sich um eine translatorische oder eine rotierende Bewegung handelt. Die jeweils einem Molekül angehörenden Atome sind nur imstande, um ihre Gleichgewichtslagen zu schwingen.

Ein neutrales Molekül trägt keine elektrische Ladung. Schlußfolgern Sie daraus aber bitte nicht voreilig, daß ein neutrales Molekül kein elektrisches Feld erzeugt. Wenn das Molekül nämlich asymmetrisch ist, fallen die Schwerpunkte seiner positiven und seiner negativen Ladung gewiß nicht zusammen. Intuitiv leuchtet ein, daß ein Zusammenfallen der Ladungsschwerpunkte beider Vorzeichen in solchen Molekülen wie denen des Sauerstoffs oder des Stickstoffs stattfindet, die aus zwei gleichartigen Atomen bestehen. Es leuchtet ein, daß die Ladungsschwerpunkte in einem Molekül wie beispielsweise CO, also dem Kohlenmonoxidmolekül, relativ zueinander verschoben sein können. Existiert diese Verschiebung, sagt man von dem betreffenden Molekül, es habe ein Dipolmoment.

Dieser Terminus hat folgenden Ursprung: Ein „Dipol“-

Molekül verhält sich wie ein System zweier Punktladungen (der eine Punkt ist dabei der Ladungsschwerpunkt der negativen und der andere der Ladungsschwerpunkt der positiven Ladungen). Ein Dipol ist durch den Ladungsbetrag und den Mittelpunktsabstand der Ladungen gekennzeichnet.

Verlangen Sie jedoch nicht von mir den Beweis, daß ein asymmetrisches Molekül ein elektrisches Dipolmoment besitzt. Wir brauchen für theoretische Überlegungen keine Zeit zu verlieren, weil das Vorhandensein eines konstanten (oder permanenten) Dipolmoments leicht experimentell nachgewiesen werden kann.

### **Molekülstruktur und die Zahl Acht**

Wir wollen nun zwei Möglichkeiten durch Bildung aus Atomen etwas ausführlicher betrachten. Die erste Möglichkeit bestand darin, daß sich zwei Atome berühren, ungleichnamig aufladen und gegenseitig anziehen. Damit dies geschieht, muß das eine Atom dem anderen ein Elektron abtreten. Stellen wir uns vor, ein Natriumatom und ein Chloratom hätten sich einander angenähert. (Bild 2.1a.) Das elfte Elektron des Natriums, das auf der äußersten Elektronenschale sitzt, ist nur sehr schwach an sein Atom „gebunden“. Es reißt sich vom Natriumatom los und wechselt zum Chloratom über. So entsteht ein einfach positiv geladenes Natriumion (das ein Elektron abgegeben hat) und ein einfach negativ geladenes Chlorion (das ein Elektron erhalten hat). Da die entstandenen Ionen ungleichnamige Ladungen tragen, ziehen sie sich gegenseitig an und bilden ein Molekül Natriumchlorid. Untersucht man nun alle möglichen Verbindungen von Atomen, so läßt sich feststellen, daß die Atome dann geneigt sind, Elektronen der Außenschale abzugeben, wenn diese Schale „dünn besiedelt“ ist, d. h. ein, zwei oder drei Elektronen trägt. Umgekehrt zeigen

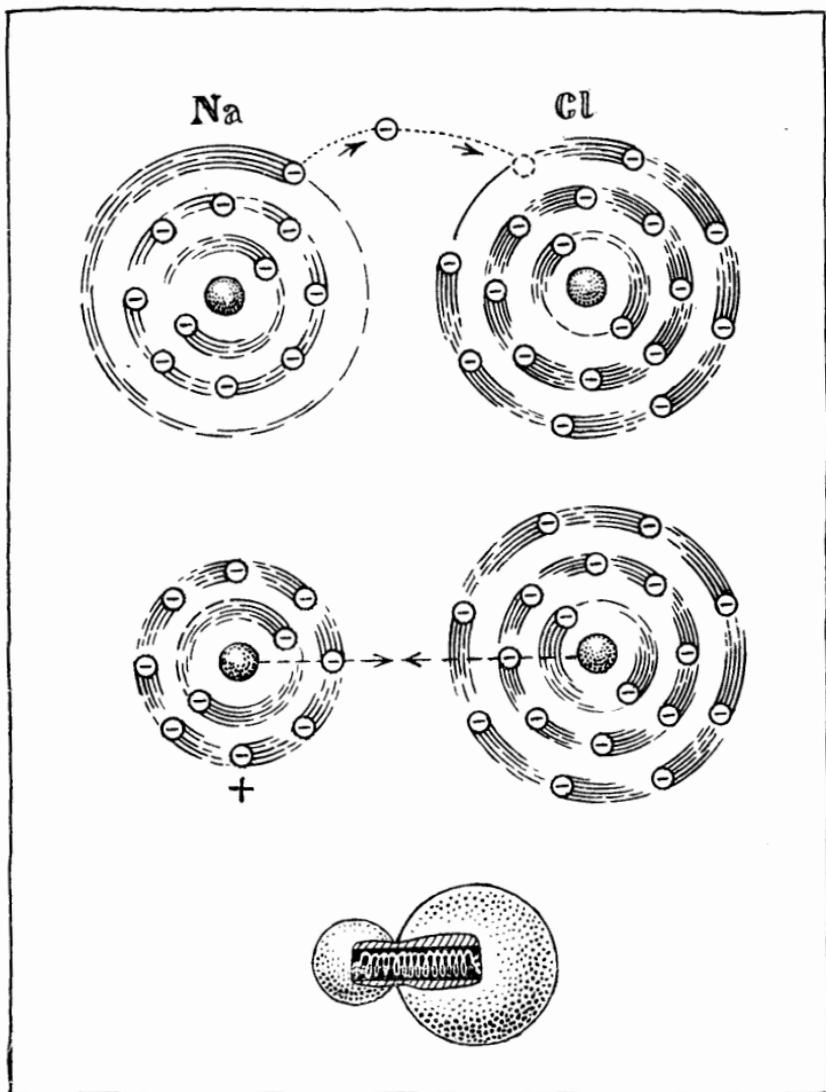


Bild 2.1a.

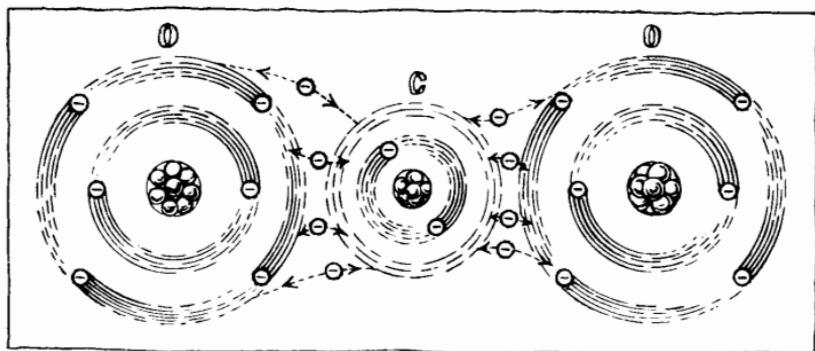


Bild 2.1b.

Atome eine Tendenz zur Aufnahme von Elektronen, wenn ihnen in der Außenschale ein bis drei Elektronen an einer Gesamtelektronenzahl von acht fehlen. Beim Chloratom sind die beiden ersten Elektronenschalen der Hülle vollständig aufgefüllt, während sich in der dritten Schale sieben Elektronen befinden; daher ist das Chloratom bestrebt, ein Elektron aufzunehmen. Beim Sauerstoffatom ist die erste Elektronenschale der Hülle vollständig besetzt, während die zweite Schale sechs Elektronen enthält; das Sauerstoffatom ist daher bestrebt, zwei Elektronen aufzunehmen.

Lassen Sie uns nun die zweite Möglichkeit der Molekülbildung betrachten, die in einer Vergesellschaftung von Elektronen besteht. Hier tritt der Fall ein, daß bei wechselseitiger Annäherung zweier oder mehrerer Atome einzelne auf den Außenschalen befindliche Elektronen nicht länger mehr nur einem ganz bestimmten Atom angehören, sondern an zwei Atome gebunden erscheinen. Die inneren Elektronen hingegen verbleiben unverändert in der Verfügungsgewalt jedes der beiden betrachteten Atome. So wird beispielsweise ein CO<sub>2</sub>-Molekül gebildet. (Bild 2.1b.) Dieses Molekül besteht aus einem Kohlen-

stoffatom und zwei Sauerstoffatomen. Das Kohlenstoffatom besitzt insgesamt vier Elektronen, das Sauerstoffatom acht. Die Molekülbildung geschieht wie folgt.

Das Kohlenstoffatom behält nur zwei Elektronen zur „individuellen Nutzung“; mit Hilfe des zweiten Elektronenpaares geht es eine Bindung mit einem der beiden Sauerstoffatome ein, und mit Hilfe des dritten Elektronenpaares eine Bindung mit dem anderen Sauerstoffatom. Der Sauerstoff seinerseits „zahlt“ zwei Elektronen ein und behält sechs Elektronen für sich. An jeder Kohlenstoff-Sauerstoff-Bindung sind demzufolge zwei Elektronenpaare beteiligt.

Nachdem Sauerstoff und Kohlenstoff diese Bindung eingegangen sind, bewegen sich im Molekül zehn Elektronen um den Sauerstoffkern und ebenso viele Elektronen um den Kohlenstoffkern. Anders ausgedrückt, besitzt jedes der Atome eine vollbesetzte Schale (denken Sie daran, daß die erste Schale zwei Elektronen enthält), und überdies „halten sich“ noch weitere acht Elektronen an jedem der betrachteten Atome „auf“.

Da ist also wieder die Zahl Acht, der wir bereits begegnet sind!

Wir merken uns das und betrachten ein weiteres Beispiel.

Wasser besteht aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen. Der Wasserstoff ist das erste Element im Periodensystem und besitzt ein Elektron. Beim Sauerstoffatom ist die erste Schale der Elektronenhülle besetzt, während sich in der zweiten Schale sechs Elektronen befinden. Beim Aufbau der Bindung behält der Sauerstoff von seinen sechs Elektronen vier für sich; von den beiden verbleibenden Elektronen wird eins für die Bindung des einen Wasserstoffatoms und das andere für die Bindung des anderen verwendet. Der Wasserstoff seinerseits gibt sein einziges Elektron zur gemeinsamen Nutzung, d. h. gemeinsam mit dem Sauerstoff

frei. Im Ergebnis wird jede *Sauerstoff-Wasserstoff-Bindung* durch ein Elektronenpaar realisiert. So kommt das Wasserstoffatom zu zwei Elektronen, während es am Sauerstoff zehn sind: zwei auf der ersten Schale und außerdem acht weitere Elektronen.

Schon wieder begegnet uns die Zahl Acht!

Wir wollen auf weitere Beispiele verzichten. Bei vielen chemischen Verbindungen spielt die Zahl Acht hinsichtlich der Außenelektronen eine entscheidende Rolle. Die Atome zeigen ein ausgeprägtes Streben, acht Außenelektronen zu erhalten.

Der Unterschied zwischen den beiden hier geschilderten Möglichkeiten besteht lediglich darin, daß es den Atomen im zuerst geschilderten Fall gelingt, acht Elektronen „anzuschaffen“, die jeweils nur an einem Atom kreisen, während sich die Atome im zweiten Fall der Molekülbildung mit gemeinsam benutzten Elektronen zufriedengeben müssen. Aber immerhin halten sich auch in diesem Fall an jedem Atom acht Elektronen auf.

Wie läßt sich die „Neigung“ der Atome erklären, beim Eingehen einer Bindung die Achterschale zu erreichen?

Die Achterschale erwies sich als besonders stabil. Eindrucksvoll zeigt sich dies am Periodensystem. Hier sind in der nullten Gruppe die gasförmigen chemischen Elemente Helium (Ordnungszahl 2), Neon (Ordnungszahl 10), Argon (Ordnungszahl 18), Krypton (Ordnungszahl 36), Xenon (Ordnungszahl 54) und Radon (Ordnungszahl 86) zusammengefaßt.

Alle diese Gase werden unter der Bezeichnung *Edelgas* zusammengefaßt, weil sie in der Regel keinerlei chemische Reaktionen — mit welchen Stoffen auch immer — eingehen.

Worin liegt das Geheimnis ihrer Reaktionsträgheit? Darin, daß die äußere Elektronenschale bei den Elektronen dieser Gase entweder vollständig aufgefüllt ist oder außerhalb der letzten vollständig aufgefüllten Schale

acht Elektronen enthält. Der Kern des Heliumatoms ist tatsächlich von einer vollständig besetzten Schale umgeben; am Neonkern sind es zwei vollständig besetzte Schalen, wobei die äußere Schale acht Elektronen enthält; der Argonkern ist von zwei vollständig besetzten Schalen sowie von weiteren acht Elektronen auf der Außenschale umgeben; am Kryptonkern sind es drei vollständig besetzte Schalen und wiederum acht weitere Elektronen ( $2 + 8 + 18 + 8 = 36$ ); auch Xenon und Radon besitzen je acht Elektronen in der Außenschale.

Alle Beispiele zeugen von der besonderen Stabilität der sogenannten Achterkonfiguration.

Auch die Tatsache, daß nicht nur Atome verschiedener Elemente Moleküle bilden, sondern daß wir auch bei Atomen ein und desselben Elements Molekülbildung beobachten können (die in der Luft enthaltenen Gase Stickstoff und Sauerstoff beispielsweise liegen nicht etwa in Form einzelner Atome, sondern in Gestalt zweiatomiger Moleküle vor), erklärt sich aus dem Bestreben, die stabile Achterkonfiguration zu erreichen. Wenn beispielsweise bei der Verbindung zweier Atome für jedes Atom eine Achterschale möglich ist, bildet das betreffende chemische Element zwangsläufig die entsprechenden Moleküle aus. Einem einzelnen Sauerstoffatom fehlen zwei Elektronen zur Achterschale. Verbinden sich jedoch zwei Sauerstoffatome und benutzen vier Elektronen gemeinsam (je zwei Elektronen von jedem Sauerstoffatom), dann haben beide Atome eine Achterschale.

Unter diesem Aspekt wird auch verständlich, warum beispielsweise Argon keine Moleküle bildet: Das Argonatom hat bereits eine Achterschale und verbindet sich deshalb nicht mit einem weiteren Argonatom.

Die in diesem Kapitel gegebene Darstellung ist natürlich keineswegs eine erschöpfende Erklärung der Molekülbildung. Das wahrheitsgemäße Bild ist weitaus komplizierter als unsere vereinfachte Darstellung.

## Dielektrika

Zwischen die Begriffe Dielektrikum, elektrischer Nichtleiter bzw. Isolator dürfen Gleichheitszeichen gesetzt werden.

Zu den Dielektrika gehören molekulare Gase, molekulare Flüssigkeiten sowie Lösungen von Festkörpern, die aus Molekülen aufgebaut sind. Feste Dielektrika sind sowohl organische als auch anorganische Gläser (Silikatgläser, Boratgläser u. ä.), aus Makromolekülen aufgebaute Polymere, Plaste, Molekularkristalle sowie Ionenkristalle.

Wir hatten im ersten Kapitel erwähnt, daß die Kapazität eines Kondensators zunimmt, sobald man ein Dielektrikum zwischen die Kondensatorplatten bringt. Schließen wir nun einen Kondensator an eine Gleichstromquelle an. Durch das Dielektrikum ist die Kapazität gestiegen, die Spannung jedoch blieb unverändert. Demnach ist zusätzliche Ladung auf die Kondensatorbelegungen gelangt. Man könnte denken, daß dabei die Feldstärke zunehmen muß. Doch die Feldstärke hat sich nicht geändert, denn sie ist gleich dem Quotienten aus der Spannung dividiert durch den Plattenabstand. Wie läßt sich dieser Widerspruch klären? Es gibt nur eine Erklärung: Im Isolator ist ein elektrisches Feld gegenläufiger Richtung entstanden. Diese Erscheinung heißt Polarisation des Dielektrikums.

Was sind das nun für besondere Ladungen, die im Innern des Dielektrikums entstehen? Wie ist der Mißerfolg aller Versuche zu begreifen, die Ladung des Dielektrikums zur Erde „abzuleiten“? Auch ohne jegliche Kenntnis von der elektrischen Struktur des Stoffs können wir sagen, daß diese Ladungen „gebunden“ und nicht frei wie in Metall sind. Kennen wir jedoch den Molekülaufbau, können wir das Wesen der Polarisation ebenso erklären wie den Entstehungsmechanismus des „Gegen-

feldes“, das bei sonst gleichen Bedingungen um so stärker ist, je größer auch  $\epsilon$  ist.

Vor allem muß eine Antwort auf die Frage gefunden werden, was das elektrische Feld mit einem Atom bzw. einem Molekül „anstellen“ kann. Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes können die Elektronen eines neutralen Atoms oder eines Ions entgegengesetzt zum Feld verschoben werden. Das Atom bzw. Ion wird zum Dipol und erzeugt ein Feld entgegengesetzter Richtung. Die Polarisation des Stoffs wird also durch die Polarisation der Atome, Ionen oder Moleküle bewirkt, aus denen der Stoff aufgebaut ist.

Der Polarisationsmechanismus, den wir soeben beschrieben haben, heißt induzierte Polarisierung. Ist kein Feld vorhanden, dann gibt es auch keine Dipole. Je stärker das Feld ist, um so größer ist die Verschiebung des Ladungsschwerpunkts der Elektronen sowie das „induzierte“ Dipolmoment und um so stärker ist die Polarisation.

Die Bildung induzierter Dipole muß temperaturunabhängig sein. Der Versuch zeigt, daß es temperaturunabhängige Dielektrika gibt. Für sie trifft der beschriebene Mechanismus demnach zu.

Was aber, wenn eine deutliche Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten von der Temperatur besteht? Die aufmerksame Untersuchung der Beziehung zwischen der Molekülstruktur und dem Verhalten des Stoffs im elektrischen Feld sowie der Charakter der Temperaturabhängigkeit von  $\epsilon$  (die Polarisation fällt mit wachsender Temperatur stets ab) führt uns zu folgendem Gedanken: Wenn Moleküle, die auch ohne elektrisches Feld ein Dipolmoment besitzen (permanente Dipole), ihre Orientierung ändern könnten, dann würde dies die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten erklären.

Tatsächlich sind die Moleküle bei Abwesenheit eines (äußeren) Feldes ganz willkürlich angeordnet. Die Di-

polmomente addieren sich geometrisch. Deshalb muß das resultierende Moment für ein Volumen, in dem viele Moleküle enthalten sind, gleich Null sein. Das elektrische Feld „striegelt“ die Moleküle zurecht und veranlaßt sie, vorwiegend in eine Richtung zu „blicken“. Hier stehen zwei Kräfte im Widerstreit: die Wärmebewegung, die Unordnung in die Lage der Moleküle bringt, und die ordnende Wirkung des Feldes. Einleuchtenderweise fällt es dem Feld um so schwerer, die Moleküle „im Zaum zu halten“, je höher die Temperatur ist. Daraus folgt dann auch, daß die Dielektrizitätskonstante solcher Stoffe mit zunehmender Temperatur fallen muß.

Bild 2.2. soll das oben Gesagte veranschaulichen. Das obere Bild zeigt, daß die Polarisation eines Atoms in der Verschiebung und Deformation der Elektronenhüllen besteht. Je weiter das Elektron vom Atomkern entfernt ist, um so stärker manifestiert sich die Wirkung des Feldes. Die in diesen schematischen Darstellungen durch Punkte angedeuteten Schichten symbolisieren den Aufenthaltsort der Elektronen. Das Bild hat natürlich symbolischen Charakter, da die verschiedenen Elektronen in Molekülen Existenzbereiche unterschiedlicher Konfiguration haben (vgl. S. 136—137).

Im mittleren Bild ist das Verhalten eines symmetrischen, zweiatomigen Moleküls dargestellt. Wenn kein Feld vorhanden ist, hat dieses Molekül auch kein Dipolmoment. Das Feld induziert ein Dipolmoment. Abhängig davon, welchen Winkel das Molekül mit dem Feld einschließt, kann der Wert des Dipolmoments unterschiedlich sein. Das Dipolmoment entsteht durch Deformation der Elektronenhülle.

Im unteren Bild schließlich ist das Verhalten eines Moleküls gezeigt, das auch bei Abwesenheit eines Feldes ein Dipolmoment besitzt. In unserer Darstellung hat das Molekül lediglich seine Richtung geändert. Im allgemeinen Fall wirken jedoch bei Stoffen, deren Moleküle

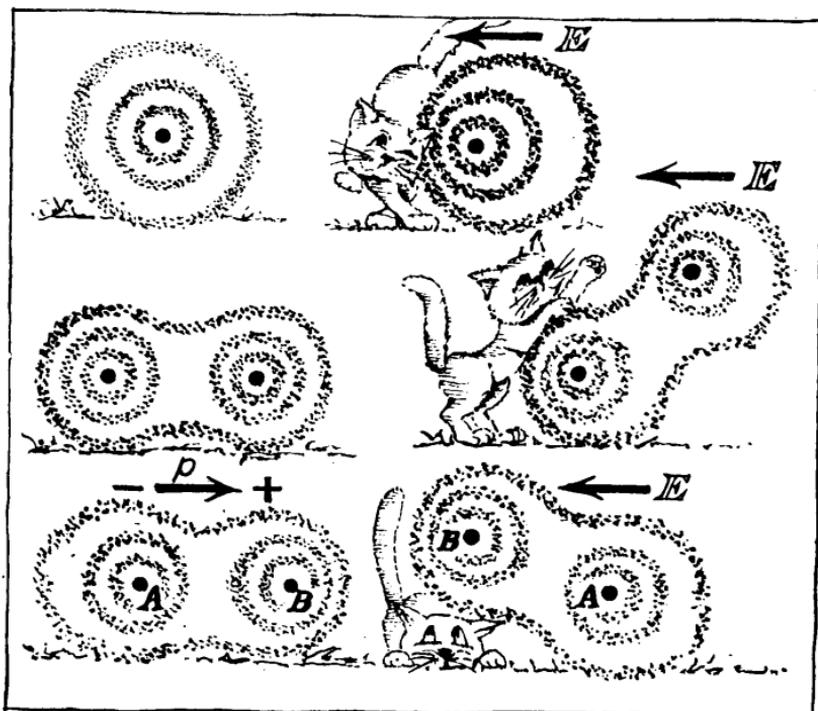


Bild 2.2.

ein permanentes Dipolmoment haben, beide Polarisationsmechanismen: Neben Lageänderungen der Moleküle können auch Elektronenverschiebungen stattfinden. Beide Effekte lassen sich leicht voneinander trennen, indem man Messungen mit sehr niedrigen Temperaturen vornimmt, bei denen der Einfluß der Wärmebewegung praktisch entfällt.

Wenn dieses Modell zutrifft, dürften wir bei Stoffen mit symmetrischen Molekülen, wie z. B. dem Sauerstoff- oder dem Chlormolekül, keine Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante beobachten. Besteht ein

zweiatomiges Molekül dagegen aus zwei verschiedenen Atomen, wie beispielsweise das CO-Molekül, dann muß eine Temperaturabhängigkeit von  $\epsilon$  entstehen. So verhält es sich in der Tat. Zu den Molekülen mit einem beträchtlichen Dipolmoment gehört Nitrobenzol.

Was geschieht mit einem gewöhnlichen Dielektrikum bei Erhöhung der elektrischen Feldstärke  $E$ ? Offenbar muß die Polarisierung des Stoffs zunehmen. Dies geschieht auf Kosten einer Streckung der Dipole: Im Fall eines Atoms handelt es sich um eine Verschiebung der Elektronenwolke relativ zum Kern, während es sich bei einem Molekül um ein Auseinanderrücken zweier Ionen handelt. Hier drängt sich natürlich die Frage auf, wie lange ein Elektron, das durch das Feld weit vom Kern weggezogen wird, noch immer ein Elektron dieses Atoms ist bzw. wie lange zwei bereits relativ weit voneinander entfernte Ionen noch immer ein Molekül bilden. Hier muß es ohne Zweifel eine Grenze geben, und bei einer ausreichenden Feldstärke  $E$  kommt es zum sogenannten Durchschlag des Dielektrikums. Die Größenordnung der Feldstärke beträgt einige tausend Kilovolt je Meter. Ein Durchschlag ist stets mit der Freisetzung von Elektronen bzw. Ionen verknüpft, d. h. mit der Erzeugung freier Ladungsträger. Das Dielektrikum hört auf, ein Dielektrikum zu sein und wird jetzt von einem elektrischen Strom durchflossen.

Mit einem Durchschlag haben wir es meist dann zu tun, wenn im Fernseh- oder Rundfunkempfänger ein Kondensator ausfällt. Wir kennen aber auch andere Beispiele für einen Durchschlag, nämlich elektrische Entladungen in Gasen. Die elektrische Entladung in Gasen werden wir gesondert behandeln. Nun aber wollen wir zwei wichtige Vertreter aus der Familie der Dielektrika kennenlernen, die Piezoelektrika und die Seignettelektrika.

Hauptvertreter der Klasse der Dielektrika ist der

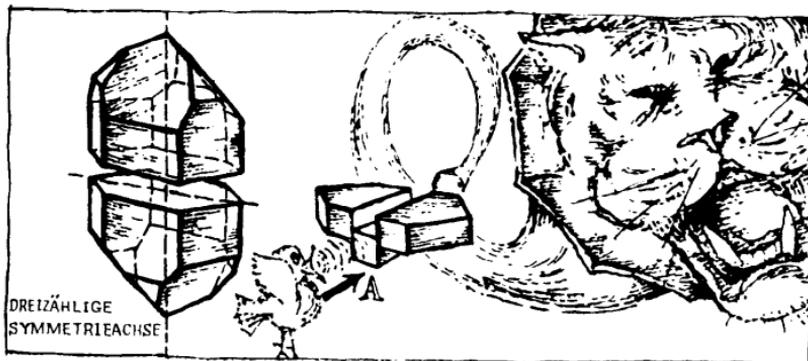


Bild 2.3.

Quarz. Die Angehörigen dieser Klasse (zu der außer Quarz beispielsweise auch Zucker und Turmalin gehören) müssen eine bestimmte Symmetrie aufweisen. In Bild 2.3. ist ein Kristallquarz dargestellt. Die Hauptachse dieses Kristalls ist eine dreizählige Symmetrieachse. In der senkrechten Ebene liegen drei zweizählige Achsen.

Aus dem Kristall wird, wie im Bild angedeutet, ein Plättchen von etwa 2 cm Dicke herausgeschnitten. Wir sehen, daß dieses Plättchen senkrecht zur Hauptachse angeordnet ist, während die zweizähligen Achsen in der Ebene dieses Plättchens liegen. Aus diesem verhältnismäßig dicken Plättchen schneidet man dann senkrecht zu einer der zweizähligen Achsen ein dünnes Plättchen von etwa 0,5 mm Dicke heraus. Mit dem so erhaltenen dünnen piezoelektrischen Plättchen (es ist im rechten Teil des Bildes ein wenig nach unten verschoben) lassen sich interessante Versuche anstellen.

An die Seitenflächen des Plättchens wird ein Elektrometer angeschlossen, d. h. ein Gerät zum Nachweis elektrischer Ladungen (um den erforderlichen elektrischen Kontakt herzustellen, müssen die Flächen vorher versilbert werden); danach drücken wir das Plättchen

in der Richtung  $A$  zusammen. Dabei zeigt sich, daß unter Kompressionseinfluß an den Flächen der Platte ungleichnamige Ladungen auftreten. Läßt man statt einer Druckkraft eine Zugkraft wirken, dann ändern die Ladungen ihr Vorzeichen. Dort, wo beim Zusammendrücken eine positive Ladung entstand, zeigt sich beim Dehnen eine negative Ladung und umgekehrt. Diese Erscheinung nun, also die Entstehung elektrischer Ladungen unter dem Einfluß von Druck bzw. Zug, hat die Bezeichnung Piezoelektrizität erhalten.

Vorrichtungen mit einem Piezoquarz sind außerordentlich empfindlich: Man kann mittels elektrischer Meßgeräte am Quarz entstehende Ladungen messen, selbst wenn die angreifende Kraft so klein ist, daß wir sie mittels anderer Verfahren nicht messen können. Ein Piezoquarz ist auch imstande, sehr rasche Druckänderungen nachzuweisen, was andere Meßgeräte nicht können. Die hier beschriebene Erscheinung hat darum außerordentliche praktische Bedeutung als Verfahren zur elektrischen Aufzeichnung von mechanischen Wirkungen aller Art, darunter auch von Schallschwingungen. Bereits ein leichtes Anhauchen des Piezoquarzes genügt, um das elektrische Meßgerät ansprechen zu lassen.

Piezoquarze werden in der Medizin benutzt, um die Herztöne abzuhören. In der Technik läßt sich mit ihrer Hilfe die Funktionsweise von Maschinen kontrollieren und feststellen, ob Störfaktoren am Werk sind.

Piezoquarze werden auch bei Tonabnehmern von Plattenspielern verwendet. Die Bewegung der Nadel in der Plattenrinne verursacht die Kompression eines Piezokristalls, was seinerseits die Entstehung eines elektrischen Signals bewirkt. Das Signal wird verstärkt und dann über Lautsprecher wieder in ein Schallsignal verwandelt.

Bisher war von Stoffen die Rede, deren elektrische Polarisation durch ein elektrisches Feld sowie (selten)

durch mechanische Deformation erzeugt wird. Sobald die äußere Wirkung wegfällt, wird der Stoff wieder elektrisch neutral. Darüber hinaus kommen aber besondere Körper vor, die auch bei Abwesenheit äußerer Kräfte ein elektrisches Gesamtmoment besitzen. Bei derartigen Körpern kann es sich natürlich weder um Flüssigkeiten noch um Gase handeln, weil die Wärmebewegung, der die ordnende Wirkung des Feldes nicht zu widerstehen vermag, unvermeidlich zur ungeordneten Lage der Dipolmoleküle führt. Man könnte sich jedoch Kristalle vorstellen, in denen die Atome so angeordnet sind, daß die Ladungsschwerpunkte der Anionen und Kationen innerhalb jeder Elementarzelle gleichermaßen verschoben sind. Dann zeigen sämtliche Dipolmomente in die gleiche Richtung. Für diesen Fall lassen sich die maximal mögliche Polarisierung und demzufolge auch ein außerordentlich hoher Wert der Dielektrizitätskonstante erwarten.

Solche Kristalle gibt es in Wirklichkeit. Da die Erscheinung zuerst an Seignettekristallen entdeckt wurde, hat die ganze Stoffklasse die Bezeichnung 'Seignetteelektrika erhalten.

Große praktische Bedeutung innerhalb der Seignetteelektrika hat Bariumtitanat. An seinem Beispiel wollen wir das merkwürdige Verhalten dieser Stoffklasse betrachten.

Bild 2.4. zeigt die Elementarzelle eines Bariumtitanatkristalls. Die Würfecken sind mit Bariumkationen besetzt. Die kleinen hellen Kreise sind Sauerstoffanionen, und der große Kreis in der Mitte des Würfels stellt ein Titankation dar.

Die Zeichnung erweckt den Eindruck, als sei die Elementarzelle würfelförmig. Eine streng würfelförmige Elementarzelle existiert in der Tat, freilich nur bei Temperaturen über 120 °C. Eine streng würfelförmige Elementarzelle wäre symmetrisch und kann logischerweise kein Dipolmoment haben. Oberhalb der genannten

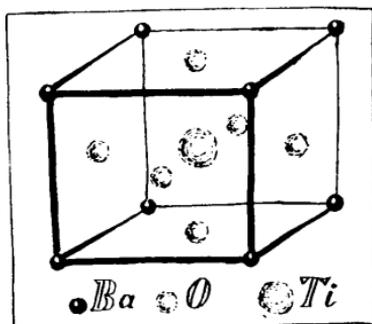


Bild 2.4.

Temperatur, die als Curietemperatur bezeichnet wird, verschwinden die besonderen Eigenschaften von Bariumtitanat. Oberhalb dieser Temperatur verhält es sich wie ein gewöhnliches Dielektrikum.

Beim Absinken der Temperatur unter  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  erfolgt eine Verschiebung der Sauerstoff- und der Titanionen in gegensinniger Richtung um einen Betrag in der Größenordnung von  $0,01\text{ nm}$ . Die Elementarzelle gewinnt ein Dipolmoment.

Richten Sie Ihre Aufmerksamkeit nunmehr auf folgenden überaus wichtigen Umstand! Die genannte Verschiebung kann mit gleichem Erfolg in drei Richtungen, also längs der drei Achsen des Würfels, erfolgen. Verschiebungen bewirken Deformationen der Elementarzellen. Also erweist sich nicht jede beliebige Aufgliederung des Kristalls in Bereiche, innerhalb derer die Dipolmomente ein und dieselbe Richtung haben, vorteilhaft.

In Bild 2.5. sind mögliche Gliederungen des Kristalls in ideal polarisierte Gebiete (sie werden als Domänen bezeichnet) dargestellt. Außer dem Fall, wobei der gesamte Kristall eine einzige Domäne ist — das ist der Fall, der das größtmögliche elektrische Feld zur Folge hat —, sind auch weniger vorteilhafte Varianten möglich,

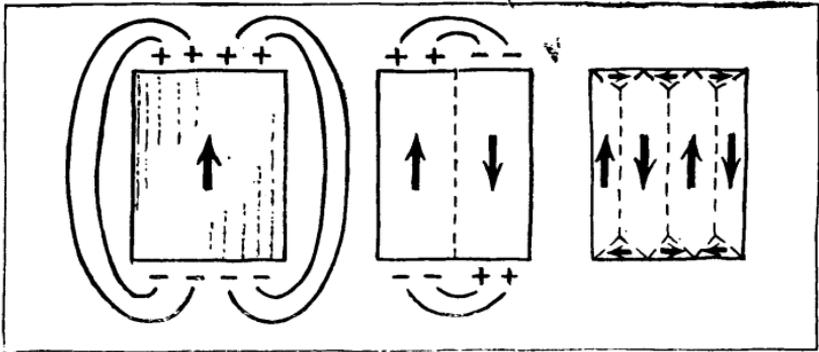


Bild 2.5.

ja schließlich sogar solche Varianten (im Bild rechts außen), bei denen das innere Feld gleich Null ist.

Wie verhält sich ein Seignettelektrikum bei Überlagerung eines äußeren elektrischen Feldes? Der Polarisationsmechanismus besteht, wie sich herausstellt, in der Größenzunahme der in die „erforderliche“ Richtung weisenden Domäne durch Verschiebung ihrer Grenzen. Domänen, deren Moment einen spitzen Winkel mit dem Feld einschließen, „verzehren“ jene Domänen, bei denen der Winkel zwischen dem Moment und dem Feld stumpf ist. Bei sehr großen Feldern läßt sich auch ein „Umdrehen“ der Domänen beobachten.

Bariumtitanat ist das wichtigste industriell genutzte Seignettelektrikum. Es wird durch Glühen eines Gemisches von pulverförmigem Titandioxid und Bariumkarbonat erhalten. Das Ergebnis ist eine Art von Keramik.

Keramische Seignettelektrika haben in der Elektrotechnik und Elektronik weite Verbreitung gefunden. Nicht nur, daß sie die Dielektrizitätskonstante von Kondensatoren sprunghaft ansteigen lassen: Wie uns aus der Beschreibung des Polarisationsmechanismus einleuchtet, nimmt der Wert von  $\epsilon$  bei diesen Stoffen mit steigender elektrischer Feldstärke zu. Der Kondensator wird

zu einem „Varikond“, d.h. zu einem veränderlichen Kondensator, der zur Frequenzmodulation am besten geeignet ist. Frequenzmodulation findet in jedem Rundfunk- und Fernsehempfänger statt.

In vielen Fällen verdrängen seignettekeramische Werkstoffe den Quarz. Mit ihrer Hilfe läßt sich ein stärkerer Schall erzeugen. Auch der Verstärkungsfaktor für Ultraschall ist dabei größer. Jenes Gebiet, wo der Quarz konkurrenzlos ist, betrifft die Stabilisierung von Funkfrequenzen.

Die meisten Darstellungen der Elektrizitätslehre beginnen mit einem Bericht über elektrische Ladungen, die durch Reiben von Glas- oder Hartgummistäben entstehen. Die Erklärung dieser Erscheinung wird gewöhnlich umgangen. Warum wohl?

Zunächst muß unterstrichen werden, daß die Elektrisierung von Dielektrika durch Reiben nicht (jedenfalls nicht unmittelbar) mit der Polarisierung von Isolatoren verknüpft ist, wovon soeben die Rede war. In der Tat besteht die Polarisierung in der Bildung gebundener elektrischer Ladungen, die sich gerade dadurch auszeichnen, daß sie nicht vom Dielektrikum „abgeleitet“ werden können. Ladungen hingegen, die am Glas oder Hartgummi durch Reiben mit einem Katzenfell erzeugt werden, sind zweifellos freie Ladungen, und es handelt sich um nichts anderes als Elektronen.

In allgemeinen Zügen ist das Bild mehr oder weniger klar; das ist aber auch schon alles. Offenbar ist jene geringe Anzahl freier Elektronen im Isolator mit dessen Molekülen durch Kräfte verbunden, die bei den verschiedenen Dielektrika unterschiedlich sind. Bringt man daher zwei Körper in enge Berührung, dann gehen die Elektronen von einem Körper in den anderen über. Es findet eine Elektrisierung statt. „Enge Berührung“ bedeutet aber, Entfernung zwischen den Oberflächen auf die Größenordnung des interatomaren Abstands zu bringen.

Da Oberflächen mit planaren Atomanordnungen in der Natur nicht existieren, trägt Reibung dazu bei, Vorsprünge und Erhöhungen aller Art zu beseitigen und die wahre Berührungsfläche zu vergrößern.

Der Elektronenübergang von einem Körper zu einem anderen findet bei jedem beliebigen Körperpaar statt, ob Metalle, Halbleiter oder Isolatoren. Elektrisieren lassen sich hingegen nur Isolatoren, weil die Ladungen nur hier an den Orten verbleiben, an die sie beim Übergang von einem Körper zum anderen gelangt sind.

Die Erklärung befriedigt mich selbst nicht hundertprozentig. Unklar bleibt, wodurch sich Hartgummi, Glas und Katzenfell besonders auszeichnen. Viele Fragen bleiben offen, und es gibt keine eindeutige Antwort.

### Die Leitfähigkeit der Gase

Füllt man ein Glasrohr mit einem Gas und legt Spannung an die im Glasrohr eingeschmolzenen Elektroden, dann hat man bereits die Versuchsanordnung, mit deren Hilfe sich die Leitfähigkeit von Gasen untersuchen läßt. Man kann die Stoffe variieren, die der Strom durchfließen soll, man kann aber auch den Gasdruck und die Spannung ändern.

Die Erforschung der Leitfähigkeit von Gasen hat für unsere Vorstellungen von der elektrischen Struktur der Materie eine große Rolle gespielt. Die wichtigsten Arbeiten wurden im 19. Jahrhundert ausgeführt.

In Bild 2.6. sind unterschiedlich geformte Röhren gezeigt, mit deren Hilfe die Wissenschaftler jene Erscheinungen untersuchten, denen wir uns nun widmen wollen. Dem Zug der Zeit gehorchend, haben sich die Antiquitätenhändler nun auch der Laborausrüstungen bemächtigt, und man kann heutzutage in westlichen Antiquitätenläden auch eines jener seltenen Exemplare erwerben, die unser Bild zeigt. (Schweigen wir über die Preise.)

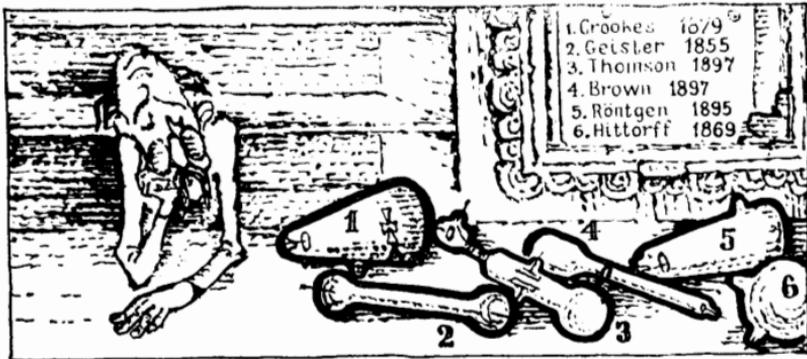


Bild 2.6.

Ursache des Stromflusses in Gasen ist die Tatsache, daß neutrale Moleküle in Anionen und Kationen zerbrechen. Außerdem kann sich auch ein Elektron von Molekülen oder Atomen ablösen. Der Stromfluß wird durch positive Ionen einerseits und negative Ionen sowie Elektronen andererseits bewirkt, deren Bewegung gegenläufig ist.

Damit ein Gas den Strom leitet, müssen die neutralen Moleküle oder Atome in geladene Partikeln verwandelt werden. Das kann unter dem Einfluß einer äußeren Ionisationsquelle, aber auch durch Zusammenprallen der Gasparkeln erfolgen. Zu den äußeren Ionisationsquellen gehören, wie bereits erwähnt, Ultraviolettstrahlung, Röntgenstrahlung, kosmische Strahlung und radioaktive Strahlen. Hohe Temperaturen bewirken ebenfalls eine Ionisation des Gases.

Der Stromdurchgang durch Gase ist häufig von Lichteffekten begleitet. Abhängig von Stoff, Druck und Spannung tritt unterschiedliches Leuchten auf. Auch die Untersuchung dieser Leuchterscheinungen hat in der Entwicklungsgeschichte der Physik eine bedeutende Rolle gespielt und lieferte Angaben über die Energieniveaus

der Atome sowie die Gesetzmäßigkeiten der elektromagnetischen Strahlung.

Die Leitfähigkeit eines Gases gehorcht nicht dem Ohmschen Gesetz. Sie wird durch eine Kurve gekennzeichnet, die die Beziehung zwischen Stromstärke und Spannung angibt. Man bezeichnet diese Kurve (nicht nur für Gase, sondern für beliebige leitende Systeme, die nicht dem Ohmschen Gesetz gehorchen) als Stromspannungskennlinie.

Wir betrachten zunächst die für alle Gase charakteristischen Erscheinungen, die bei Erhöhung der an die Gasentladungsröhre angelegten Spannung stattfinden. Das Verhalten der Gase überdeckt ein breites Druckintervall. Außerhalb unserer Betrachtung bleiben nur so geringe Drücke, bei denen die freie Weglänge eines Moleküls die gleiche Größenordnung erlangt wie die Abmessungen der Gasentladungsröhre. Unberücksichtigt bleiben auch so hohe Drücke, bei denen die Gasdichte der Dichte von Flüssigkeiten nahekommt.

Zunächst legen wir eine kleine Spannung an die Gasentladungsröhre an. Sofern keine Ionisationsquelle vorhanden ist, fließt auch kein Strom durch die Röhre. Erst bei Einsetzen der Ionisierung enthält das Gas geladene Partikeln, d.h. Ionen und Elektronen. Bei Überlagerung eines Feldes werden die Partikeln durch das Feld zu den Elektroden geführt. Die Geschwindigkeit, mit der sich die geladenen Partikeln in Richtung der Elektroden bewegen, hängt von vielen Faktoren, hauptsächlich jedoch von der Feldstärke und dem Gasdruck ab.

Der geordneten Bewegung der Ionen und Elektronen, die unter dem Einfluß einer konstanten elektrischen Kraft erfolgt, ist ihre chaotische Bewegung überlagert. Von einem elektrischen Feld beschleunigte Partikeln legen immer nur eine kleine Entfernung zurück. Am Ende dieser kurzen Wegstrecke erfolgt unvermeidlich ein

Aufprall. Bei kleinen Geschwindigkeiten handelt es sich dabei um elastische Zusammenstöße.

Die mittlere freie Weglänge hängt vor allem vom Gasdruck ab. Je höher der Druck ist, um so kürzer ist auch die freie Weglänge und um so kleiner die mittlere Geschwindigkeit der geordneten Partikelbewegung. Die an der Gasentladungsröhre anliegende Spannung wirkt gegensinnig, d.h., sie vergrößert die mittlere Geschwindigkeit der geordneten Partikelbewegung.

Läge an der Röhre keine Spannung an, würde sich im Gas folgendes abspielen: Die Ionisationsquelle würde Ionen erzeugen, und Ionen unterschiedlichen Vorzeichens würden sich bei Zusammenstößen wieder miteinander vereinigen oder, wie man auch sagt, rekombinieren. Da sich bei Rekombination immer zwei Teilchen (also ein Teilchenpaar) treffen müssen, ist die Rekombinationsgeschwindigkeit dem Quadrat der Teilchenzahl proportional.

Bei gleichbleibender Ionisatorwirkung stellt sich zwischen beiden Vorgängen ein Gleichgewicht ein. So liegen die Dinge in der Ionosphäre, die unseren Erdball umgibt. Abhängig von Tages- und Jahreszeit schwankt die Anzahl ionisierter Partikeln je Kubikzentimeter von einer Million bis hundert Millionen Elektronen und Ionen. Der Ionisationsgrad liegt demzufolge in der Größenordnung eines Prozents. (Erinnern Sie sich daran, wieviel Moleküle sich in einem Kubikzentimeter Luft in großen Höhen befinden.)

Aber kehren wir nun zu dem ionisierten Gas in einer unter Spannung stehenden Röhre zurück. Natürlich wird das Gleichgewicht durch die Spannung gestört, weil ein Teil der Ionen die Elektroden erreicht, ohne daß Rekombination auftritt. In dem Maße, wie die Spannung steigt, erreicht ein immer größer werdender Anteil der in der Zeiteinheit erzeugten Ionen die Elektroden: Der durch das Gas fließende elektrische Strom nimmt zu. Das geht

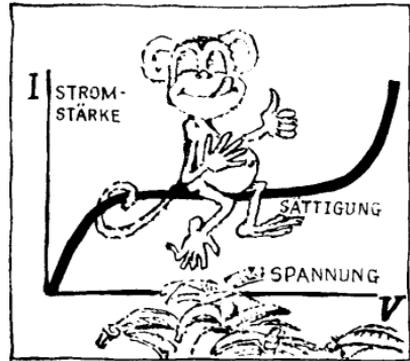


Bild 2.7.

so lange, bis überhaupt keine Zeit mehr für die Rekombination übrig bleibt; alle durch die Ionisationsquellen erzeugten Ionen erreichen die Elektroden. Dann leuchtet ein, daß bei einer weiteren Spannungserhöhung der Strom nicht wächst. (Damit ist der sogenannte Sättigungsstrom erreicht, der in Bild 2.7. durch den waagrecht verlaufenden Kurvenabschnitt dargestellt ist.)

Je geringer die Gasdichte ist, um so kleiner braucht die Feldstärke zu sein, um den Sättigungsstrom zu erreichen.

Die Stärke des Sättigungsstroms ist gleich der Ladung aller durch die Ionisationsquelle je Sekunde im Röhrenvolumen erzeugten Ionen. Sättigungsströme sind in der Regel klein und liegen in der Größenordnung einiger Mikroampere. Natürlich hängt der Betrag des Sättigungsstroms davon ab, wie stark das Gas ionisiert wird.

Wenn man die Versuchsanordnung in dem Bereich der Stromspannungskennlinie betreibt, der nicht über die Grenzen des Sättigungsstroms hinausreicht, erlischt der Stromfluß, sobald man das Gas vor dem Einfluß der äußeren Ionisationsquelle schützt. Man spricht in diesem Fall von einer nichtselbständigen Gasentladung.

Wird die Spannung weiter erhöht, treten neue Erscheinungen auf. Ab einem bestimmten Zeitpunkt wird die

Elektronengeschwindigkeit groß genug, damit diese Elektronen ihrerseits Elektronen aus neutralen Atomen und Molekülen herausschlagen können. Die an der Röhre anliegende Spannung muß dabei einen Wert erreichen, bei dem das Elektron im Verlauf seiner freien Weglänge so viel Energie aufzunehmen vermag, daß sie zur Ionisierung eines Moleküls ausreicht. Die nun einsetzende Stoßionisation wirkt sich auf die Stromspannungskennlinie aus: Der Strom steigt an, weil die Spannungserhöhung auch eine Erhöhung der Elektronengeschwindigkeit bedeutet. Diese Geschwindigkeitserhöhung bringt eine Zunahme der Ionisierungsfähigkeit des Elektrons mit sich; folglich wird eine größere Anzahl von Ionenpaaren erzeugt, und die Stromstärke wächst. Im Vergleich zum Sättigungsstrom erreicht die Stromstärke das Mehrhundert- oder Mehrtausendfache des Sättigungsstromwerts. Das Gas leuchtet auf.

Entfernt man nun die äußere Ionisationsquelle, so hört der Strom nicht auf. Wir haben das Gebiet der selbständigen Entladung erreicht. Die Spannung, bei der diese qualitative Änderung eintritt, heißt Durchschlags- oder Zündspannung der Gasentladung.

Das sprunghafte Ansteigen des Stroms nach Passieren dieser kritischen Grenze erklärt sich aus der lawinenartigen Zunahme der Ladungszahl. Jedes erzeugte Elektron zerstört ein neutrales Molekül und erzeugt zwei Ladungen so großer Energie, daß diese ihrerseits imstande sind, ein anderes Molekülpaar zu zerstören, das ihnen in den Weg kommt. Aus zwei Ladungen werden vier, aus vier acht usw. Der Ausdruck „Lawine“ ist also durchaus berechtigt.

So wurde eine quantitative Theorie entwickelt, die das Aussehen der Stromspannungskennlinien recht gut vorhersagt.

## Die selbständige Entladung

Es gibt viele verschiedene Spielarten dieser Entladung. Wir wollen einige davon behandeln.

**Die Funkenentladung.** Ein Funke, der durch Luft zwischen zwei Elektroden überspringt, läßt sich bei ganz elementaren Versuchen leicht beobachten. Dafür genügt es schon, zwei unter Spannung stehende Leitungen einander hinreichend nahezubringen. Was heißt „hinreichend“? Wenn der Vorgang in Luft ablaufen soll, so bedarf es hierzu einer Feldstärke von 30 000 V/cm. Für die geringe Entfernung von 1 mm genügt eine Potentialdifferenz von 300 V. Kleine Funken kann man im Alltag beobachten, wenn man eine defekte Lichtleitung repariert oder die beiden Anschlußleitungen eines Akkumulators versehentlich zusammenbringt. (Freilich muß man beim Akkumulator beide Leitungen einander auf einen Abstand nähern, der der Dicke einer Rasierklinge entspricht.)

Die Durchschlagsspannung ist von der Gasdichte abhängig. Auch die Form der Elektroden spielt eine Rolle. Der Funke durchschlägt aber nicht nur Gas, sondern auch dielektrische Flüssigkeiten und Festkörper. Ein Elektrotechniker muß die Durchschlagsspannungen aller Werkstoffe kennen, mit denen er umgeht.

Heute weiß jeder, daß der Blitz nichts anderes als ein Funke ist, der zwischen zwei Wolken überspringt, deren Ladungen sich im Vorzeichen unterscheiden. Seinerzeit freilich haben Physiker wie Michail Wassiljewitsch Lomonossow (1711—1765) und Benjamin Franklin (1706—1790) viel Mühe und Kraft auf den Beweis dieser Feststellung verwendet. Und Georg Richmann (1711—1753), der mit Lomonossow zusammenarbeitete, verlor sein Leben beim Versuch, einen Blitz zur Erde abzuleiten; er hatte zu diesem Zweck während eines Gewitters einen Drachen aufsteigen lassen, und die Ableitung des Blitzes sollte über den Schwanz des Dra-

chens erfolgen, der aus einer elektrisch leitenden Schnur bestand.

Für die Funkenentladung in Gestalt eines Blitzes lassen sich interessante Zahlen angeben. Die Spannung zwischen einer Wolke und der Erde beträgt  $10^8$  bis  $10^9$  V, die Stromstärke schwankt von einigen Dutzend bis zu einigen hunderttausend Ampere, und der Durchmesser des leuchtenden Blitzkanals beträgt 10 bis 20 cm. Die Blitzdauer ist gering und liegt in der Größenordnung einer Mikrosekunde. Daraus läßt sich abschätzen, daß die durch den Blitzkanal abfließende Elektrizitätsmenge verhältnismäßig klein ist.

Man hat die „Himmelsfunken“ mit Hilfe von Film-aufnahmen eingehend untersucht. Ein Blitz stellt häufig eine ganze Folge von Funkenentladungen dar. Er hat so etwas wie eine „Vorausabteilung“, die zunächst einmal den bequemsten und stets merkwürdig verästelten Weg für die elektrischen Ladungen bahnt. Oft wurden auch Kugelblitze beobachtet. Leider gelingt es nicht, sie im Labor zu reproduzieren. Es handelt sich dabei um Plasmakugeln von 10 bis 20 cm Durchmesser. Sie bewegen sich langsam vorwärts, stehen aber gelegentlich auch unbeweglich an einer Stelle. Ihre Lebensdauer beträgt einige Sekunden, gelegentlich auch Minuten; danach verschwinden sie im Gefolge einer starken Explosion. Es gibt bis heute keine erschöpfende Erklärung für diese interessante Erscheinung.

**Die Lichtbogenentladung.** Eine Lichtbogenentladung oder, kurz gesagt, einen Lichtbogen hat W.W. Petrow bereits 1802 erzeugt. Zu diesem Zweck brachte er zwei Kohlestücke miteinander in Berührung, deren jedes mit einem Pol einer starken Spannung verbunden war, und entfernte die Elektroden dann wieder voneinander. Dieses Verfahren zur Zündung eines Lichtbogens ist bis zum heutigen Tag bestehengeblieben. Allerdings verwendet man heute Spezialkohlen, die aus Graphitpulver

gepreßt werden. Die positive Kohleelektrode brennt rascher ab als die negative. Deshalb kann man äußerlich erkennen, welche der beiden Kohlen an den positiven Pol angeschlossen ist: An der Spitze dieser Elektrode entsteht eine Vertiefung, ein sogenannter Krater. Die Temperatur dieses Kraters erreicht in Luft bei gewöhnlichem Druck 4000 K, und wenn man den Druck erhöht, so kann die Temperatur des Lichtbogens auf fast 6000 K, d. h. Temperatur der Sonnenoberfläche, gebracht werden. Ein zwischen Metallelektroden erzeugter Lichtbogen hat eine erheblich niedrigere Temperatur.

Zur Unterhaltung der Lichtbogenentladung ist nur eine geringe Spannung von 40 bis 50 Volt notwendig. Die Stromstärke kann einige hundert Ampere erreichen, weil der Widerstand der leuchtenden Gassäule gering ist.

Wie ist nun die große elektrische Leitfähigkeit des Gases bei so geringen Spannungen zu erklären? Die Moleküle werden nur auf geringe Geschwindigkeiten beschleunigt, und ihre Zusammenstöße können bei der Entstehung eines so starken Stroms keine Rolle spielen. Die Erklärung sieht so aus: Im ersten Augenblick findet an der Berührungsstelle beider Elektroden eine starke Erhitzung statt. Dabei setzt die thermische Elektrodenemission ein, d. h., die Katode emittiert eine große Anzahl von Elektronen. Hieraus folgt übrigens, daß nur die Katode eine hohe Temperatur benötigt, die Anode kann kalt sein.

Der Mechanismus dieses Typs einer Lichtbogenentladung ist gänzlich anders als bei einer Funkenentladung.

Es bedarf wohl keiner Erwähnung, welche Bedeutung diese Erscheinung in der Praxis hat. Die Lichtbogenentladung wird beim Schweißen und Schneiden von Metallen sowie in der Elektrometallurgie verwendet.

**Die Glimmentladung.** Auch diese Art einer selbständigen Entladung hat große praktische Bedeutung, da sie

in Leuchtröhren abläuft. Eine gasgefüllte Röhre (in der der Druck erheblich unter dem Atmosphärendruck liegt) wird so konstruiert, daß ihre Betriebsspannung die Zündspannung beträchtlich überschreitet. In Leuchtröhren wird der Stromfluß durch Ionisation von Molekülen mittels Elektronen erzeugt bzw. dadurch, daß aus der Katode der Leuchtröhre Elektronen herausgeschlagen werden. Eine Leuchtröhre zündet nicht sofort. Der Grund dafür ist der, daß der erste Anstoß von jener geringen Anzahl geladener Partikeln ausgehen muß, die stets in jedem beliebigen Gas anwesend sind.

**Die Koronarentladung.** Sie wird bei Atmosphärendruck in einem stark inhomogenen elektrischen Feld, beispielsweise in der Nähe von Drähten oder Spitzen, beobachtet. Die Feldstärken müssen sehr groß sein, und zwar in der Größenordnung von einigen Millionen Volt je Meter. Welcher Pol an der Spitze anliegt, ist gleichgültig. Es kann also sowohl eine positive als auch eine negative Korona geben. Da die Feldstärke mit zunehmender Entfernung von der Spitze abnimmt, verschwindet die Korona bereits in geringer Entfernung. Man könnte sagen, die Koronaentladung sei der unvollständige Durchschlag eines gasgefüllten Zwischenraums. Die Korona entsteht durch Elektronenlawinen, die sich entweder zur Spitze hin bewegen oder von der Spitze aus in den äußeren Raum treten. Natürlich existieren im Koronabereich neben den Elektronen auch negative bzw. positive Ionen, also die Zerstörungsprodukte der in der Luft vorhandenen neutralen Moleküle. Die Korona leuchtet nur in jenem kleinen Raumbereich nahe der Spitze, in dem die Elektronenlawine existiert.

Die Entstehung einer Korona wird durch die atmosphärischen Bedingungen, vor allem durch die Feuchtigkeit der Atmosphäre, beeinflusst.

Ein atmosphärisches elektrisches Feld kann Baum- oder Mastspitzen zum Leuchten bringen. Diese Erschei-

nung hat in alten Zeiten die Bezeichnung „Elmsfeuer“ erhalten. Elmsfeuer galt als ein schlechtes Vorzeichen. Für diesen „Glauben“ läßt sich eine rationelle Erklärung finden. Es ist durchaus möglich, daß die Leuchterscheinung immer dann auftritt, wenn ein Sturm oder ein Orkan im Anzug ist.

Eine lehrreiche Geschichte hat sich erst in jüngster Vergangenheit zugetragen. Das Ehepaar Kirlian — beide „Amateurforscher“ — untersuchte viele Jahre lang folgende Erscheinung: Jemand legt seine an eine Hochspannungsquelle angeschlossene Hand auf einen fotografischen Film, der durch eine Isolierstoffschicht von der anderen Elektrode des gleichen Stromkreises getrennt ist. Bei Anlegen der Spannung wird auf dem Film ein verwaschenes Bild der Handfläche und der Finger erzeugt. Die Entstehung dieser „Aufnahme“ erklärt sich aus der Entstehung einer Koronaentladung. Natürlich muß die Spannung kleiner sein als der Wert, bei dem ein Funken-durchschlag möglich ist.

Die Versuche des Ehepaars zogen die lebhafteste Aufmerksamkeit von Spezialisten der sogenannten Parapsychologie auf sich (von der überwiegenden Mehrzahl der Physiker und Psychologen als Pseudowissenschaft angesehen). Der Grund für die Aufmerksamkeit erklärt sich daraus, daß die Entdecker der Erscheinung und ihre Anhänger das Aussehen der erhaltenen Aufnahme mit dem psychischen Zustand des betreffenden Subjekts in Verbindung brachten.

Die lautstarke Propaganda dieser so extravaganten Interpretation der geschilderten Erscheinung führte dazu, daß sich eine Gruppe von Physikern und Psychologen aus US-Universitäten dazu entschloß, die Versuche sorgfältig zu kontrollieren und die außer Frage stehende Tatsache, daß das Aussehen einer nach diesem Verfahren erhaltenen Aufnahme tatsächlich bei verschiedenen Personen unterschiedlich ist, dieser Umstand sogar bei ein und derselben

Person unter verschiedenen Aufnahmebedingungen eintreten kann, einfacher zu erklären.

Die Wissenschaftler gelangten zu folgendem Schluß: „Nach dem Kirlian-Verfahren erhaltene Fotos zeigen im wesentlichen das Bild einer Koronaentladung, die während der Belichtung stattfindet. Die meisten Unterschiede der Fotos erklären sich aus der Feuchtigkeit der Hand sowie dem Wassergehalt in den Geweben. Während der Belichtung geht Feuchtigkeit in die lichtempfindliche Emulsion des Filmes über und verändert das elektrische Feld sowie das Aussehen der Aufnahme.“

Die Wissenschaftler haben vorgeschlagen, diese Technik, die sie als „Koronaentladungsfotografie“ bezeichnet wissen wollen, zum „Nachweis und zur quantitativen Bestimmung der Feuchtigkeit sowohl in belebten als auch in unbelebten Gegenständen“ zu nutzen.

Dieser in der Dezembernummer 1976 durch die Zeitschrift Scientific American veröffentlichte interessante Sachverhalt erlaubt zwei Schlußfolgerungen. Zum ersten verdient jede reale Erscheinung unsere Aufmerksamkeit, und warum sollte sie sich nicht als praktisch nützlich erweisen? Zum zweiten: Ein Forscher, der Neues entdeckt hat, muß vor allem der Versuchung einer Interpretation widerstehen, die sich nicht in die geltenden wissenschaftlichen Vorstellungen einfügt. Erst nach erschöpfender Untersuchung, ob die bereits existierenden Theorien außerstande sind, die neue Entdeckung zu erklären, kann man sie den Fachleuten vorlegen.

Reale, jedoch falsch interpretierte Tatsachen könnte man in Anlehnung an einen sehr alten Witz als „Küchenschabeneffekt“ bezeichnen: Man reißt einer Küchenschabe alle Beine aus. Den so erhaltenen „Krüppel“ legt man auf einen Tisch, und zwar neben eine „voll funktionsfähige“ zweite Küchenschabe. Nun klopf man auf den Tisch. Die „intakte“ Küchenschabe läuft davon, der „Krüppel“ rührt sich natürlich nicht vom Fleck. Daraus folgt: Bei

der Küchenschabe ist das Gehör in den Beinen lokalisiert.

Jahraus, jahrein werden in der Presse mehrere Artikel veröffentlicht, die „Küchenschabeneffekte“ beschreiben. Man sollte immer daran denken.

### **Stoff im Plasmazustand**

Der Terminus „Plasmazustand“ wurde bereits 1939 erstmals von zwei deutschen Wissenschaftlern vorgeschlagen, deren Arbeit der Verfasser dieser Zeilen seinerzeit für die Zeitschrift „Uspechi fisitscheskich nauk“ (Ergebnisse der physikalischen Wissenschaften) übersetzte. Die Bezeichnung war glücklich gewählt. In der Tat ist Plasma weder ein Festkörper noch eine Flüssigkeit, und es ist auch kein Gas. Es ist ein besonderer Stoffzustand.

Die thermische Ionisation von Gasen, d. h. das Losreißen der Elektronen von den Atomen und das Zerbrechen neutraler Moleküle in Ionen, beginnt oberhalb 5000 bis 6000 K. Lohnt es sich denn überhaupt, dieses Problem zu behandeln? Es gibt ja gar keine Werkstoffe, die einer höheren Temperatur standhalten könnten.

Es lohnt sich zweifellos. Die Mehrzahl der Himmelskörper, darunter auch unsere Sonne, befindet sich im Plasmazustand. Ein anderes Beispiel für Plasma ist die Ionosphäre der Erde. Mit Hilfe magnetischer Felder kann man Plasma auch unter Laborverhältnissen in einem abgegrenzten Volumen, den sogenannten magnetischen Flaschen, festhalten. Und schließlich können wir auch noch über das Plasma der Gasentladung sprechen.

Der Ionisationsgrad eines Gases hängt nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Druck ab. Unter einem Druck in der Größenordnung von 1, 3 mbar ist Wasserstoff bei 30 000 K praktisch vollständig ionisiert.

Unter den genannten Bedingungen entfallen auf ein neutrales Atom 20 000 geladene Partikeln.

Im Plasmazustand stellt Wasserstoff ein Gemisch in ungeordneter Bewegung befindlicher und miteinander zusammenstoßender Partikeln zweier Gase dar: des Protonen„gases“ und des Elektronen„gases“. Ein aus anderen Stoffen entstandenes Plasma ist stets ein Gemisch vieler „Gase“. Wir finden darin Elektronen, ihrer Elektronen beraubte Kerne, verschiedene Ionen sowie eine unbedeutende Anzahl neutraler Teilchen.

Plasma mit einer Temperatur von einigen 10 000 oder 100 000 K wird als kaltes Plasma bezeichnet. Bei einem heißen Plasma sind es einige Millionen Kelvin.

Freilich muß man mit dem Temperaturbegriff im Fall des Plasmas vorsichtig umgehen. Wie Sie wissen, ist die Temperatur eindeutig durch die kinetische Energie der Partikeln definiert. In einem aus schweren und leichten Partikeln bestehenden Gas stellt sich der Gleichgewichtszustand erst dann ein, wenn die leichten und die schweren Partikeln ein und dieselbe mittlere kinetische Energie annehmen. Für ein Gas, das lange Zeit hindurch unter stabilen Verhältnissen existiert hat, heißt das, daß sich die schweren Partikeln langsam, die leichten dagegen schnell bewegen. Die Zeit, in der sich das Gleichgewicht einstellt, hängt davon ab, was „am Anfang“ war. Bei sonst gleichen Bedingungen stellt sich der Gleichgewichtszustand jedoch um so später ein, je größer die Massenunterschiede der Partikeln sind.

Genau diese Situation treffen wir im Plasma an. Die Masse eines Elektrons unterscheidet sich nämlich von der Masse des leichtesten Atomkerns etwa um das Zweitausendfache. Bei jedem Zusammenprall überträgt das Elektron nur einen kleinen Teil seiner Energie auf einen Kern bzw. ein Ion. Erst nach einer sehr großen Anzahl von Begegnungen, d. h. Zusammenstößen, gleichen sich die mittleren kinetischen Energien aller Plasmateilchen

aus. Man spricht dann von einem isothermischen Plasma. Isothermisch ist beispielsweise das Plasma, das sich im Innern der Sonne oder anderer Sterne befindet. In einem heißen Plasma stellt sich das Gleichgewicht innerhalb einiger Sekundenbruchteile bzw. weniger Sekunden ein.

Anders liegen die Dinge im Plasma der Gasentladung (Funken, Lichtbogen usw.). Die Teilchen bewegen sich in diesem Fall nicht mehr ungeordnet, sondern erzeugen auch einen elektrischen Strom. Auf seinem Weg zwischen den Elektroden findet das rasch dahineilende Elektron einfach nicht genügend Zeit, um einen großen Teil seiner Energie an die in ihrer Bewegung trägen Ionen abzugeben. In einer Gasentladung ist die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen daher viel größer als der entsprechende Wert für die Ionen. Man spricht von einem nichtisothermischen Plasma und muß zu seiner Kennzeichnung zwei (und wenn man die neutralen Partikeln berücksichtigt, auch drei) Temperaturen angeben. Natürlich liegt die Elektronentemperatur erheblich über der Ionentemperatur. So beträgt die Elektronentemperatur in einer Lichtbogenentladung einige 10 000 bis 100 000 Kelvin, während die Ionentemperatur bei 1000 K liegt.

Das Partikelverhalten im Plasma läßt sich mit Hilfe der gleichen Größen beschreiben, die in der kinetischen Gastheorie verwendet werden. So hat man viele Verfahren entwickelt, um direkt oder indirekt die freie Weglänge von Partikeln, ihre freie Flugdauer und die Konzentration der verschiedenen Partikelarten zu ermitteln.

Damit Sie sich eine Vorstellung von den beschriebenen Größenordnungen machen können, seien einige Zahlen genannt, die ein Wasserstoffplasma hoher Konzentration ( $10^{20}$  Ionen je Kubikmeter) beschreiben. In einem kalten Plasma (die Temperatur soll 10 000 K betragen) ist die freie Weglänge gleich 0,03 cm, während die freie Flugdauer  $4 \cdot 10^{-10}$  s beträgt. Für das gleiche, jedoch auf

100 Millionen Kelvin aufgeheizte Plasma gelten die Zahlen  $3 \cdot 10^6$  cm bzw.  $4 \cdot 10^{-4}$  s.

Bei derartigen Daten muß man stets ergänzen, von welcher Art von Zusammenstößen die Rede ist. Wir haben hier die Werte für Zusammenstöße zwischen Elektronen und Ionen angegeben.

Es liegt auf der Hand, daß ein Volumen, in dem sich viele Teilchen befinden, insgesamt gesehen elektrisch neutral ist. Nun könnte uns aber das Verhalten des elektrischen Feldes an einem bestimmten Punkt des Raumes interessieren. Das elektrische Feld ändert sich rasch und stark, da der Bereich des betrachteten Punktes einmal von Ionen und ein anderes Mal von Elektronen passiert wird. Man kann die Geschwindigkeit dieser Änderungen ausrechnen und daraus den Mittelwert für das Feld bestimmen. Ein Plasma entspricht mit großer Genauigkeit der Neutralitätsbedingung. Strenggenommen müssen wir allerdings den Begriff „Quasineutralität“, d. h. „Fastneutralität“, verwenden. Was bedeutet „fast“?

Darüber gibt eine einfache Berechnung Auskunft. Wir legen durch das Plasma eine Strecke von 1 cm Länge. Nun zählen wir die Konzentration von Elektronen und Ionen an jedem Punkt dieser Strecke. Quasineutralität bedeutet, daß diese Konzentrationen „fast“ gleich sein müssen. Und jetzt stellen wir uns vor, in einem Kubikzentimeter sei ein „überflüssiger“ Anteil von Elektronen vorhanden, der nicht durch positive Ionen neutralisiert wird. Bei einer Teilchendichte, die der Dichte der Luft an der Erdoberfläche entspricht, würde dann auf der oben betrachteten Strecke ein Feld von etwa 1000 V/cm entstehen, wenn der Konzentrationsunterschied zwischen Ionen und Elektronen dem milliardsten Teil eines Prozents entspräche! Nun wissen wir, was „fast“ bedeutet.

Doch selbst eine so verschwindend geringe Störung der Gleichheit von positiven und negativen Ladungen würde nur einen winzigen Augenblick andauern. Das

entstehende Feld würde die überschüssigen Partikeln ausstoßen. Dieser Automatismus funktioniert bereits für Gebiete, deren Größen einige tausendstel Zentimeter betragen.

Auf Plasma in „magnetischen Flaschen“ kommen wir noch im vierten Band zu sprechen. Sie haben bestimmt schon einmal von Anlagen des Typs „Tokamak“ gehört und vielleicht auch Beschreibungen solcher Anlagen gelesen. An ihrer Verbesserung arbeitet ein ganzes Heer von Wissenschaftlern, um ein Hochtemperaturplasma zu erzeugen, das die Verschmelzung leichter Atomkerne herbeiführen ließe, wobei kolossale Energiemengen frei werden. Diesen Prozeß in Bomben ablaufen zu lassen, haben die Physiker inzwischen gelernt. Ob es aber gelingen wird, ein Plasma zu erzeugen, das hinreichend heiß ist und hinreichend lange existiert, um eine Kettenreaktion in Gang zu setzen — analog den Kettenreaktionen in Kernreaktoren —, auf diese wichtige Frage steht die Antwort noch aus.

## Metalle

Die Einteilung der Festkörper in verschiedene Klassen nach ihrem elektrischen Widerstand beruht auf der Elektronenbeweglichkeit.

Jeder elektrische Strom stellt einen Strom in Bewegung befindlicher geladener Partikeln dar. Wenn es um Ionen- bzw. Elektronenströme geht, können wir den elektrischen Strom buchstäblich „sehen“. Auch beim Durchgang durch Flüssigkeiten tritt der elektrische Strom deutlich in Erscheinung, da an den Elektroden eine Stoffabscheidung erfolgt. Vom Strom in Festkörpern hingegen können wir uns nur ein indirektes Bild machen.

Viele uns bekannte Tatsachen erlauben folgende Feststellung. Die Atomkerne in Festkörpern, gleich welcher Art, führen keine translatorische Bewegung aus,

Der elektrische Strom wird hier von Elektronen erzeugt. Die Elektronen bewegen sich unter dem Einfluß jener Energie, die die Stromquelle liefert. Sie erzeugt im Innern des Festkörpers ein elektrisches Feld.

Die Formel, die Spannung und elektrische Feldstärke miteinander verbindet, bleibt für beliebige Leiter in Kraft. Durch Vereinigung der auf Seite 14 und 18 angegebenen Formeln können wir das Ohmsche Gesetz für den festen Leiter in folgender Form aufschreiben:

$$j = \kappa E.$$

( $\kappa = 1/\rho$  wird als spezifische Leitfähigkeit bezeichnet.)

Die Elektronen in einem Festkörper lassen sich in gebundene und freie Elektronen einteilen. Gebundene Elektronen gehören bestimmten Atomen an; freie Elektronen bilden dagegen eine Art von Elektronengas. Diese Elektronen sind im Festkörper beweglich. Liegt an dem Festkörper keine elektrische Spannung an, dann bewegen sich die freien Elektronen ungeordnet. Je stärker die Bewegung freier Elektronen behindert wird, je häufiger sie mit den in Ruhe befindlichen Atomen und miteinander zusammenstoßen, um so größer ist der elektrische Widerstand des betrachteten Körpers.

In Dielektrika haben fast alle Elektronen ihren „Herrn“, d. h., sie gehören einem Atom oder einem Molekül an. Die Zahl der freien Elektronen ist verschwindend klein.

In Metallen stellt dagegen jedes Atom ein bis zwei Elektronen zur gemeinsamen Nutzung bereit. Dieses Elektronengas bewerkstelligt den Stromfluß.

Ausgehend von dem hier geschilderten groben Modell, können wir die elektrische Leitfähigkeit abschätzen und das Modell überprüfen.

Genau wie bei unseren Überlegungen bezüglich eines aus Molekülen bestehenden Gases wollen wir auch hier annehmen, jedes Elektron wäre imstande, einen bestimm-

ten Weg *l* ohne Zusammenstoß zurückzulegen. Der Abstand zwischen den Atomen eines Metalls beträgt einige zehntel Nanometer. Man nimmt demnach an, daß die freie Weglänge der Elektronen in der Größenordnung eines Nanometers, d. h.  $10^{-7}$  cm, liegt.

Unter dem Einfluß der Beschleunigungskraft  $eE$  beträgt die Bewegungszeit des Elektrons  $l/v$ , worin  $v$  die Geschwindigkeit des Elektrons ist. Unter Verwendung von Daten, die bei Untersuchung der thermischen Elektronenemission gewonnen wurden, läßt sich die Geschwindigkeit der in regelloser Bewegung befindlichen Elektronen abschätzen. Sie liegt in der Größenordnung von  $10^8$  cm/s.

Um die Geschwindigkeit der Elektronen bei geordneter Bewegung, d. h. die Geschwindigkeit jener Bewegung zu ermitteln, die den Stromfluß bewirkt, muß die Beschleunigung  $eE/m$  mit der freien Bewegungsdauer multipliziert werden. Das schließt die Annahme ein, jeder Zusammenstoß beende die Bewegung eines Elektrons, so daß es danach wieder beginne, sich mit zunehmender Geschwindigkeit weiterzubewegen. Wir führen die Multiplikation aus und erhalten die Geschwindigkeit der Elektronen, die den Stromfluß erzeugen:

$$u = \frac{eEl}{mv}.$$

Nun wollen wir den spezifischen Widerstand eines Metalls berechnen. Sollten wir dabei die richtige Größenordnung erhalten, dann hieße das, daß unser Modell „funktioniert“.

Die Stromdichte  $j$  kann als Produkt der Elektronenzahl je Volumeneinheit, der Elektronenladung und der Elektronengeschwindigkeit bei geordneter Bewegung angegeben werden:

$$j = nev.$$

Setzen wir in diese Formel den Ausdruck für die Elektronengeschwindigkeit bei geordneter Bewegung ein, so erhalten wir:

$$j = \frac{ne^2l}{mv} E,$$

d. h., die spezifische elektrische Leitfähigkeit ist gleich:

$$\kappa = \frac{ne^2l}{mv}.$$

Nimmt man an, daß jedes Atom ein Elektron zur gemeinsamen Benutzung zur Verfügung stellt, so ergibt sich ein spezifischer Widerstand des Leiters in der Größenordnung von  $10^{-5}$  Ohm·m. Ein sehr vernünftiger Wert! Er bestätigt sowohl die Richtigkeit unseres groben Modells als auch die Richtigkeit der gewählten Werte für die Parameter unserer „Theorie“. Ich setze das Wort „Theorie“ nur deshalb in Anführungszeichen, weil sie grob und elementar ist. Doch illustriert dieses Beispiel den typisch „physikalischen“ Weg zur Interpretation von Erscheinungen.

Entsprechend den Auffassungen von einem frei beweglichen Elektronengas muß der elektrische Widerstand mit sinkender Temperatur kleiner werden. Nur, versuchen Sie nicht voreilig, diesen Umstand mit der Änderung der Elektronengeschwindigkeit bei chaotischer Bewegung in Verbindung zu bringen. Darum geht es gar nicht. Diese Geschwindigkeit hängt nur wenig von der Temperatur ab. Die Widerstandsverminderung steht mit der Tatsache im Zusammenhang, daß die Schwingungsweite der Atome kleiner wird, wodurch die freie Weglänge der Elektronen zunimmt.

Man kann es auch so ausdrücken: Bei Vergrößerung der Schwingungsamplitude der Atome werden die Elektronen stärker nach allen Richtungen hin gestreut. Natürlich muß deswegen die resultierende Geschwindigkeit in

Stromrichtung abnehmen, d. h., der Widerstand muß wachsen.

Mit der zunehmenden Elektronenstreuung erklärt man auch das Anwachsen des Widerstands von Metallen (und nicht nur von Metallen) mit Fremdstoffzusätzen. In der Tat spielen die Fremdatome die Rolle von Störstellen in der Kristallstruktur und fordern daher die Elektronenstreuung.

Elektrische Energie wird durch Leitungen übertragen. Wegen des elektrischen Widerstands der Leitung geht Energie verloren. Die Verluste sind außerordentlich groß, und ihre Verminderung ist ein sehr wichtiges technisches Problem.

Wir dürfen hoffen, daß dieses Problem gelöst werden kann, weil es die sehr bemerkenswerte Erscheinung der Supraleitfähigkeit gibt.

1911 entdeckte der niederländische Physiker Kamerlingh-Onnes, daß bestimmte Körper bei Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunkts sprunghaft ihren elektrischen Widerstand praktisch vollständig verlieren. Wird in einem ringförmigen Supraleiter ein elektrischer Strom erregt, dann fließt er tagelang ohne Unterbrechung in dem Leiterring. Unter den reinen Metallen hat Niobium die höchste Temperatur, bei der Supraleitung auftritt (9 K). Wie viele Wissenschaftler suchen hartnäckig nach Supraleitern, die diese bemerkenswerte Eigenschaft bereits bei einer höheren Temperatur zeigen! Sonderlich groß sind die Erfolge bislang nicht. Man fand eine Legierung, die, so scheint es, bei einer Temperatur von etwa 20 K supraleitend wird.

Allerdings gibt es Grund zu der Annahme, diesen Grenzwert anheben zu können (vielleicht sogar bis auf Zimmertemperatur). Die Erkundungen sind auf besondere Polymerstoffe sowie komplizierte, schichtförmig aufgebaute Werkstoffe gerichtet, in denen abwechselnd ein Dielektrikum und ein Metall aufeinanderfolgen. Die

Bedeutung dieses Problems ist kaum zu überschätzen. Ich sehe es als eines der wichtigsten Probleme der heutigen Physik überhaupt.

Die Arbeiten zur Erkundung von Supraleitern, die bereits bei hinreichend hohen Temperaturen supraleitend werden, haben nach Entwicklung theoretischer Vorstellungen über diese Erscheinungen einen großen Aufschwung genommen. Die Theorie hat Wege zur Erkundung der notwendigen Werkstoffe gewiesen.

Bezeichnenderweise ist zwischen der Entdeckung der Supraleitfähigkeit und ihrer Erklärung sehr viel Zeit vergangen. Die Theorie wurde 1957 entwickelt. Dazu sei bemerkt, daß die Gesetze der Quantenphysik, mit deren Hilfe die Theorie der Supraleitfähigkeit entwickelt wurde, bereits 1926 bekannt waren. So kompliziert war die Erklärung der Supraleitfähigkeit! Ich kann in diesem Buch nur eine Erklärung geben, die sozusagen mitten in der Geschichte anfängt. In dem Maße, wie sich die Schwingungen des Atomgitters verlangsamen, gelingt es einigen Elektronen, zu Paaren zu kondensieren. Jedes Paar zeigt ein wechselseitig abgestimmtes Verhalten. Werden solche Paare an Atomen gestreut (und gerade die Streuung ist, wie wir weiter oben gesagt haben, die Ursache des Widerstands), dann wird das Abprallen jeweils des einen Partners im Paar durch das Verhalten des anderen Partners kompensiert. Es handelt sich um einen Ausgleich in dem Sinne, daß der Gesamtimpuls des Elektronenpaares unverändert bleibt. Die Elektronenstreuung verschwindet also nicht, beeinflußt aber den Stromdurchgang nicht länger.

Neben den gepaarten Elektronen liegt im Supraleiter auch das gewöhnliche Elektronengas vor. Hier existieren gewissermaßen zwei Flüssigkeiten gleichzeitig nebeneinander, deren eine die üblichen Eigenschaften aufweist, während die andere supraleitend ist. Beginnt die Temperatur eines Supraleiters von Null an zu steigen, dann

zerstört die Wärmebewegung eine immer größere Anzahl von Elektronenpaaren, und der Anteil des gewöhnlichen Elektronengases wächst. Schließlich wird eine kritische Temperatur erreicht, bei der auch die letzten gepaarten Elektronen verschwinden.

Wir haben mit Hilfe des Modells einer gewöhnlichen und einer besonderen Flüssigkeit im zweiten Band die Erscheinung der Suprafluidität erklärt, die im flüssigen Helium beobachtet wird. Diese beiden Erscheinungen sind einander eng verwandt: Die Supraleitfähigkeit ist eine Suprafluidität der Elektronenflüssigkeit.

Elektronenpaare, wie wir sie gerade beschrieben haben, besitzen den Gesamtspin Null. Partikeln, deren Spin gleich Null oder ganzzahlig ist, heißen Bosonen. Unter bestimmten Bedingungen können sich Bosonen in großen Mengen auf ein und demselben Energieniveau ansammeln. In diesem Falle zeigen sie eine ideal abgestimmte Bewegung, und nichts vermag ihre Lageänderung zu behindern. Wir werden diese Erscheinung im vierten Band weiterverfolgen.

## Der Elektronenaustritt bei Metallen

Da sich ein Teil der Elektronen wie ein aus schnellen Partikeln bestehendes Gas verhält, erwartet man naturgemäß, daß Elektronen auch imstande sind, über die Metalloberfläche hinauszugelangen. Damit ein Elektron das Metall verläßt, muß es die Anziehungskräfte der positiven Ionen überwinden. Die zum Erreichen dieses Zieles durch das Elektron aufzuwendende Arbeit heißt Austrittsarbeit.

Je höher die Temperatur eines Metalls ist, um so größer ist auch die Elektronengeschwindigkeit. Bringt man ein Metall zum Glühen, dann kann eine merkliche Anzahl von Elektronen dieses Metall verlassen.

Die Erscheinung der thermischen Elektroemission — so heißt der Elektronenaustritt aus Metallen — läßt sich mit Hilfe eines einfachen Experiments untersuchen. Zu diesem Zweck wird in eine elektrische Glühlampe eine zusätzliche Elektrode eingeschmolzen. Durch ein empfindliches Gerät läßt sich der elektrische Strom messen, der dadurch entsteht, daß ein Teil der „verdampfenden“ Elektronen auf diese Elektrode gelangt. (Dies betrifft einen Teil der Elektronen, aber nicht alle, weil die Elektronen unter verschiedenen Winkeln aus dem Glühfaden der Lampe herausfliegen.)

Um die Austrittsarbeit abzuschätzen, müssen wir die sogenannte Sperrspannung zu Hilfe nehmen, d. h., wir müssen an die eingeschmolzene Elektrode den negativen Pol eines Akkumulators anschließen. Durch allmähliche Spannungserhöhung erreichen wir dann einen Spannungswert, von dem aus die Elektronen unsere zusätzliche Elektrodenschicht besser erreichen können.

Bei Wolfram beträgt die Elektronenaustrittsarbeit ungefähr 5 Elektronenvolt. Durch einen besonderen Überzug kann diese Arbeit, falls erforderlich, auf etwa ein Elektronenvolt herabgesetzt werden.

Elektronenvolt: Was ist das eigentlich für eine Maßeinheit der Arbeit? Aus ihrer Bezeichnung ist leicht zu schließen, daß sie jener Energie entsprechen muß, die ein Elektron beim Zurücklegen eines Wegs unter der Spannung 1 V bewirkt. Ein Elektronenvolt ist gleich  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J.

Obwohl die thermischen Geschwindigkeiten von Elektronen erheblich sind, ist die Masse eines Elektrons sehr klein. Die hier genannte Höhe der Barriere ist darum ganz beträchtlich. Theorie und Experiment zeigen, daß der Elektronenaustritt schroff temperaturabhängig ist. Eine Temperaturerhöhung von 500 auf 2000 K zieht eine Zunahme des Emissionsstroms um das Mehrtausendfache nach sich.

Der Austritt von Elektronen aus einem Metall infolge

der Wärmebewegung ist, wenn man so will, ein natürlicher Prozeß. Man kann das Elektron aber auch aus dem Metall heraus schlagen.

Zum ersten läßt sich dies durch Beschuß des Metalls mit anderen Elektronen tun. Diese Erscheinung heißt sekundäre Elektronenemission. Sie wird zur Elektronenvervielfachung in technischen Geräten genutzt.

Wichtiger aber ist das Herauslösen von Elektronen aus Festkörpern mit Hilfe des Lichts. Diese Erscheinung heißt Fotoeffekt.

### Thermoelektrische Erscheinungen

Vor langer Zeit (für die Evolution der Menschheit nicht mehr als ein Augenblick, für die Entwicklung der Wissenschaft fast eine Ewigkeit), vor über 150 Jahren, wurde eine einfache Tatsache entdeckt. Baut man einen Stromkreis aus je einem Stück Kupfer- und Wismutdraht auf, die an zwei Stellen miteinander verlötet sind, so fließt in diesem Kreis ein Strom — allerdings nur dann, wenn eine Lötstelle eine höhere Temperatur hat als die andere. Man spricht in diesem Zusammenhang von Thermoelektrizität.

Was zwingt die Elektronen, sich in einem derart zusammengesetzten Leiter zu bewegen? Die Frage ist nicht leicht zu beantworten. Die elektromotorische Kraft entsteht sowohl durch das elektrische Kontaktfeld als auch durch das elektrische Temperaturfeld.

Wir haben soeben gesagt, daß für den Austritt eines Elektrons aus Metallen Arbeit erforderlich ist. Die Austrittsarbeit  $W$  ist nicht für alle Metalle gleich. Demnach muß zwischen zwei verlöteten Metallen die Spannung

$$\frac{1}{e} (W_1 - W_2)$$

entstehen.

Von der Existenz dieser Kontaktspannung kann man sich experimentell überzeugen. Sie allein kann in einem geschlossenen Stromkreis freilich nicht die Ursache eines elektrischen Stroms sein. In der Tat, bestünde der geschlossene Kreis aus zwei Lötstellen, so würden sich deren Kontaktspannungen gegenseitig auslöschen. Wieso erzeugt dann aber die Temperaturdifferenz zwischen den Lötstellen eine elektromotorische Kraft? Die Antwort ergibt sich logisch. Offenbar ist die Kontaktspannung temperaturabhängig. Die Erwärmung einer der beiden Lötstellen läßt eine Spannungsdifferenz auftreten und führt zur Entstehung eines Stroms. Allerdings muß man auch eine andere Erscheinung berücksichtigen. Zwischen den Enden eines Leiters besteht ein elektrisches Feld, sofern die Temperatur der Leiterenden unterschiedlich ist. Bei einer höheren Temperatur bewegen sich die Elektronen rascher. In diesem Fall beginnt eine Diffusion der elektrischen Ladungen, die so lange anhält, bis ein elektrisches Feld entstanden ist, das dem Streben nach gleichmäßiger Verteilung die Waage hält.

Die Versuche lassen keinen Zweifel daran, daß beide Erscheinungen gleichzeitig wirken und daß sie bei Entwicklung einer Theorie auch beide berücksichtigt werden müssen.

Die hier auftretenden elektromotorischen Kräfte sind klein und liegen in der Größenordnung einiger Millivolt bei Temperaturdifferenzen von 100 K. Solche Spannungen sind jedoch leicht zu messen. Deshalb benutzt man diesen Effekt zur Temperaturmessung. Schließlich kann man ja ein Glasthermometer nicht in eine Metallschmelze stecken. In solchen Fällen ist ein Thermoelement ein unersetzliches Meßgerät. Das Thermoelement weist aber noch manche anderen Vorzüge auf. Wie wichtig ist es, Temperaturen über große Entfernungen messen zu können! Und die Empfindlichkeit! Elektrische Messungen sind sehr genau, deshalb lassen sich mittels Thermoэле-

menten Temperaturdifferenzen von einigen millionstel Kelvin messen.

Diese hohe Empfindlichkeit ermöglicht den Einsatz von Thermoelementen zur Messung von Wärmeströmen, die von weit entfernten Objekten bei uns eintreffen. Überschlagen Sie einmal selbst die Möglichkeiten des Thermoelements! Nur so viel: Einige  $10^{-8}$  W sind noch nicht die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit.

Ähnlich wie bei Akkumulatoren können auch mehrere Thermoelemente zu einer Batterie zusammengeschaltet werden. Wenn keine allzu große Energie erforderlich ist, läßt sich eine Batterie aus Thermoelementen zur Stromversorgung (z. B. für eine Sende- und Empfangsanlage) verwenden.

## Halbleiter

Viele Stoffe — Elemente ebenso wie chemische Verbindungen — nehmen hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit eine Zwischenstellung zwischen Leitern und Isolatoren ein. Die Existenz solcher Körper ist schon lange bekannt. Aber noch vor 25 Jahren hat kaum jemand geahnt, daß aus der Halbleiterphysik ein Industriezweig entstehen würde, dessen Bedeutung nicht zu unterschätzen ist. Ohne Halbleiter gäbe es keine elektronischen Datenverarbeitungsanlagen, keine Fernsehempfänger und keine Tonbandgeräte! Ohne Halbleiter ist die moderne Elektronik undenkbar.

Die Leitfähigkeit von Isolatoren liegt zwischen  $10^{-8}$  und  $10^{-18}$   $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ; die Leitfähigkeit von Metallen hat Werte zwischen  $10^2$  und  $10^4$   $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Die spezifische Leitfähigkeit von Halbleitern liegt zwischen den beiden genannten Intervallen. Daß wir es mit Halbleitern zu tun haben, erkennen wir allerdings nicht nur aus ihrem Widerstand.

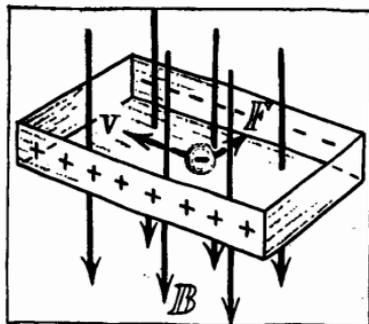


Bild 2.8.

Wie bei den Metallen lassen sich auch bei Halbleitern keinerlei chemische Veränderungen erkennen, wenn sie von Strom durchflossen werden. Also führen die Ionen in Halbleitern, die das Gerüst des Kristallgitters bilden, unter dem Einfluß des Feldes keine translatorische Bewegung aus. Demnach müssen wir die Leitfähigkeit hier, ebenso wie bei den Metallen, auf die Elektronenbewegung zurückführen.

Obwohl diese Schlußfolgerung selbstverständlich schien, beschlossen die Physiker nachzuprüfen, welche Ladungen den Stromtransport bewerkstelligen. Bei Festkörpern kann dies mit Hilfe des Hall-Effekts überprüft werden.

Im nächsten Kapitel seien Sie daran erinnert, daß positive und negative Teilchen unter dem Einfluß eines Magnetfeldes abgelenkt werden, und zwar in verschiedene Richtungen. Hat ein Festkörper, in dem sich Ladungen bewegen, die Form eines Streifens und bringt man ihn in ein entsprechend ausgerichtetes Magnetfeld, dann entsteht zwischen den Kanten der Platte eine Spannung. Die Prinzipdarstellung dieses Versuchs ist in Bild 2.8. dargestellt.

Wie groß war das Erstaunen der Physiker, als sie feststellten, daß es Stoffe gibt, die sich bei Untersuchungen gelegentlich so verhalten, als bewegten sich in dem Strei-

fen positive Partikeln, in anderen Fällen aber so, als hätten die Ladungsträger ein negatives Vorzeichen. Für dieses Verhalten geeignete Bezeichnungen zu finden, ist nicht schwer. Wir werden im ersten Fall von positiver Leitung ( $p$ -Leitung), im zweiten Fall von negativer Leitung ( $n$ -Leitung) sprechen. Aber natürlich geht es nicht um die Bezeichnung, sondern um die Erklärung des Wesens. Keine Frage, daß sich in einem Halbleiter Elektronen bewegen. Wo wäre ein Ausweg aus diesem Widerspruch? Wie ist die positive Leitung zu erklären?

Stellen Sie sich eine Gruppe von Sportlern vor, die in Reih und Glied angetreten sind. Ein Sportler fehlt, sein Platz ist unbesetzt. Auch wenn es nicht fein klingt, wollen wir sagen: Ein „Loch“ ist entstanden. Um die Reihe wieder aufzufüllen, erhält der Sportler, der dem „Loch“ am nächsten steht, die Anweisung, den freien Platz einzunehmen. Es entsteht eine neue leere Stelle. Sie kann ebenfalls aufgefüllt werden, wenn man dem nächsten Sportler in der Reihe den Befehl gibt weiterzurücken. Wird dieser Vorgang nun fortgesetzt und bewegen sich die Sportler dabei von rechts nach links, dann wandert das „Loch“ von links nach rechts. Analog läßt sich die positive Leitung in Halbleitern erklären.

In Halbleitern ist die Konzentration freier Elektronen sehr klein. Schon der Wert für die Leitfähigkeit (denken Sie an die Formel, die wir für die Stromdichte abgeleitet haben) deutet darauf hin, daß die meisten Atome in einem Halbleiter keine Ionen, sondern neutrale Atome sind. Trotzdem ist der Halbleiter kein Isolator. Eine kleine Anzahl von Elektronen sind demzufolge „in Freiheit“. Diese Elektronen werden sich im Halbleiter wie in einem Metall bewegen und eine negative Leitung, d.h. eine Elektronenleitung, erzeugen. Ein von neutralen Atomen umgebenes positives Ion hingegen befindet sich im instabilen Zustand. Sobald dem Festkörper ein elektrisches Feld überlagert wird, ist das positive Ion bestrebt, ein Elek-

tron von seinem Nachbarn zum „Überlaufen“ zu bewegen; das gleiche Verhalten wird im Anschluß daran das betroffene Nachbaratom zeigen. Ein positives Ion ist dem „Loch“ in unserer obengegebenen Darstellung durchaus analog. Das gegenseitige Wegfangen von Elektronen kann im Vergleich zur Bewegung freier Elektronen das Übergewicht erlangen. So entsteht die positive Leitung bzw. die Leerstellenleitung.

Sollte Ihnen dieses Modell nicht gefallen, kann ich Ihnen ein anderes anbieten. Wie bereits gesagt, ist die Energie von Partikeln gequantelt. Es ist eins der Grundgesetze der Natur. Alle Erscheinungen, die in Halbleitern ablaufen, lassen sich ausgezeichnet erklären, wenn man annimmt, daß die Elektronen — ebenso wie am Atom — auch im Festkörper auf Energieniveaus verteilt sind. Da es im Festkörper jedoch sehr viele Elektronen gibt, verschmelzen die Niveaus gewissermaßen zu Energiebändern oder, wie man auch sagt, Energiezonen.

Ist die Wechselwirkung der Elektronen miteinander schwach, dann ist die Bandbreite sehr gering. Darum bleiben die inneren Elektronen praktisch unbeeinflusst davon, daß ihre Atome Bestandteile seines Festkörpers sind.

Bei den Außenelektronen liegen die Dinge anders. Die Energieniveaus bilden die Energiebänder. Bei den verschiedenen Körpern sind die Breiten dieser Bänder und die „Abstände“ zwischen ihnen unterschiedlich.

Bild 2.9. erklärt die Einteilung der Festkörper nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit in Metalle, Halbleiter und Isolatoren. Ist ein Band vollständig mit Elektronen besetzt und der Abstand zum nächsthöheren unbesetzten Band groß, so heißt der Stoff Isolator. Ist das äußere Band nur zum Teil mit Elektronen besetzt, so nennt man einen solchen Körper Metall, weil jedes noch so kleine elektrische Feld die Elektronen auf ein etwas höheres Energieniveau anheben kann. Halbleiter sind schließlich dadurch gekennzeichnet, daß ihr oberstes Energieband vom unmit-

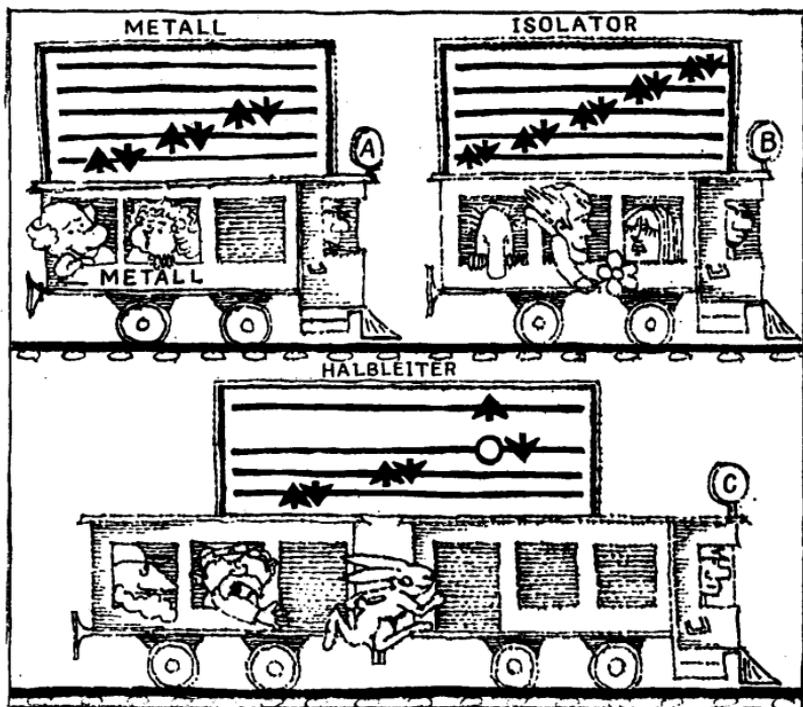


Bild 2.9.

telbar darunterliegenden nur durch einen kleinen Abstand getrennt ist. Anders als bei Isolatoren und Metallen vermag die Wärmebewegung bei Halbleitern Elektronen aus einem Band in das andere zu überführen. Solange kein Feld vorhanden ist, ist die Anzahl derartiger Übergänge „nach oben“ und „nach unten“ gleich. Eine Erhöhung der Temperatur führt nur dazu, daß die Elektronenkonzentration im oberen Band wächst.

Was aber geschieht, wenn man dem Halbleiter ein Feld überlagert?

Ein freies, im oberen Energieband befindliches Elektron setzt sich nun in Bewegung und leistet seinen Beitrag

zur negativen Leitung. Das Gleichgewicht von Übergängen „nach unten“ und „nach oben“ ist jedoch gestört. Im unteren Band entsteht nämlich ein „Loch“, das sich unter der Einwirkung des Feldes in der entgegengesetzten Richtung bewegt. Man spricht hier von Halbleitern mit Mischleitung (*p-n*-Leitung).

Das Bändermodell liefert eine geschlossene Darstellung. Man darf nicht glauben, das hier beschriebene Modell sei künstlich und spekulativ. Es erklärt einfach und deutlich den Hauptunterschied zwischen Metall und Halbleitern, also ihre Verhaltensbesonderheiten bei Temperaturänderung. Wie wir weiter oben gesagt haben, sinkt die elektrische Leitfähigkeit der Metalle mit steigender Temperatur, weil die Elektronen häufiger auf Hindernisse stoßen. In Halbleitern führt ein Temperaturanstieg zur Vergrößerung der Anzahl von Elektronen und Leerstellen, d.h. zur Steigerung der Leitfähigkeit. Wie man rechnerisch nachweisen kann, übersteigt dieser Effekt wesentlich die Abnahme der Leitfähigkeit infolge von Zusammenstoßen mit Hindernissen.

Von entscheidender Bedeutung für die Technik sind allerdings Halbleiter mit sogenannten Dotierungen. Durch Dotierung gelingt die Herstellung von Körpern, die entweder nur *p*- oder nur *n*-Leitung aufweisen. Der Grundgedanke ist äußerst einfach.

Die verbreitetsten Halbleiter sind Germanium und Silizium, sie sind vierwertig. Jedes Atom ist mit vier seiner Nachbarn verbunden. Ideal reines Germanium ist ein Halbleiter mit gemischter Leitung. Die Anzahl von Leerstellen und Elektronen je  $1 \text{ cm}^3$  ist sehr klein und beträgt  $2,5 \cdot 10^{13} \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Das entspricht etwa einem freien Elektron und einer Leerstelle auf eine Milliarde Atome.

Nun ersetzen wir eins der Germaniumatome durch ein Arsenatom, Arsen ist fünfwertig. Vier seiner Elektronen werden zur Bindung mit Germaniumatomen aufgewen-

det; das fünfte bleibt übrig. Der Werkstoff zeigt nun Elektronenüberschußleitung ( $n$ -Leitung), weil die Einführung des Arsenatoms natürlich nicht die Entstehung einer Leerstelle zur Folge hat.

Bereits ein geringfügiger Arsenzusatz — ein Arsenatom auf eine Million Siliziumatome — bewirkt eine Vertausendfachung der Leitfähigkeit des Germaniums.

Es liegt auf der Hand, was getan werden muß, um Germanium in einen  $p$ -Leiter zu verwandeln. Einige Germaniumatome müssen gegen dreiwertige Atome, also z.B. gegen Indiumatome, ausgetauscht werden.

Nun haben wir folgende Situation: Eins der dem „Eindringling“ benachbarten Germaniumatome wandelt sich jetzt in ein positives Ion, da es — ob es nun will oder nicht — eine Bindung mit dem Indiumatom ausbilden muß, dem ein Elektron fehlt. Wir wissen aber bereits, daß ein positives Ion die Rolle einer Leerstelle spielt. Unter dem Einfluß des Feldes wird das „Loch“ wandern, während eine Bewegung freier Elektronen nicht auftritt.

Man braucht sich nicht zu wundern, daß die Halbleiterindustrie einen außerordentlichen Einfluß auf die Züchtung reiner Kristalle genommen hat. Wie hätte es denn anders sein können, wenn Fremdstoffanteile im Verhältnis 1 : 1 000 000 die entscheidende Rolle spielen!

Es wäre falsch zu glauben, daß in  $n$ -Leitern keine Leerstellenleitung auftritt. Leerstellen sind auch hier vorhanden, doch ist ihre Anzahl wesentlich kleiner als die Zahl freier Elektronen. Bei  $n$ -Leitern sind Elektronen die Hauptladungsträger, während die nur als Minderheit repräsentierten Leerstellen als Nebenladungsträger bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu sind bei  $p$ -Leitern die Leerstellen die Hauptladungsträger, und die Elektronen bilden die Nebenladungsträger.

### Der $p$ - $n$ -Übergang

Nachdem wir uns Klarheit über  $p$ - und  $n$ -Halbleiter verschafft haben, wollen wir uns einem interessanten Effekt widmen, der für die Elektronik von heute eine große Rolle spielt. Der Effekt entsteht im Bereich des Übergangs zwischen den fest miteinander verbundenen  $p$ - und  $n$ -Halbleitern ( $p$ - $n$ -Übergang). Das englische Wort *transition* (Übergang) wurde zum Taufpaten für eine ganze Klasse von Halbleiterbauelementen, deren Funktion auf dem  $p$ - $n$ -Übergang beruht. Was passiert, wenn man zwei Stäbe gleichen Querschnitts mit glattgeschliffenen Stirnseiten hernimmt (einer aus Germanium mit einem Indiumzusatz —  $p$ -Halbleiter —, der andere aus Germanium mit einem Arsenzusatz), beide Stäbe mit den Stirnseiten aneinanderlegt und fest zusammenpreßt? Faktisch entsteht ein Germaniumhalbleiter; in der einen Hälfte hat er einen Überschuß an freien Elektronen, in der anderen einen Überschuß an Leerstellen.

Zur Vereinfachung der Erklärung wollen wir die Nebenladungsträger außer acht lassen. Zu Beginn unserer Betrachtung (s. Bild 2.10. oben) sind beide Hälften des Kristalls elektrisch neutral. Im  $n$ -Teil existiert jedoch (ungeachtet der Tatsache, daß dieser Teil elektrisch neutral ist) eine „überschüssige“ Anzahl von Elektronen (die durch schwarze Punkte angedeutet sind), und im rechten, d.h.  $p$ -Teil, gibt es „überschüssige“ Leerstellen (durch Kreise dargestellt).

Sowohl die Elektronen als auch die Leerstellen können die Grenzfläche ungehindert passieren. Die Ursache solcher Übergänge ist die gleiche wie im Fall der Vermischung zweier Gase, die sich in zwei verschiedenen, aber miteinander verbundenen Gefäßen befinden. Anders jedoch als Gasmoleküle haben Elektronen und Leerstellen die Fähigkeit zur Rekombination.

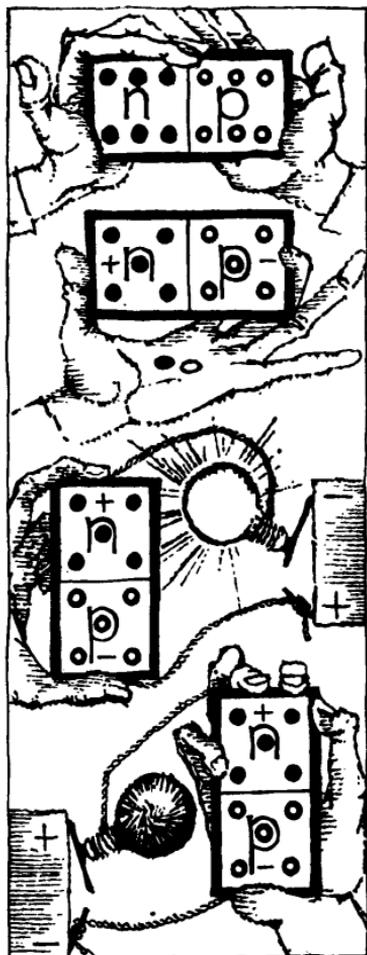


Bild 2.10.

Wir hatten zunächst sechs schwarze Punkte links und sechs Kreise rechts. Ein Kreis und ein Punkt hatten sich dann gegenseitig „vernichtet“. In der folgenden Prinzipdarstellung ist gezeigt, daß im linken Teil weniger Elektronen verblieben sind als nötig wären, damit diese Hälfte elektrisch neutral ist. Im rechten Teil fehlt ein Kreis.

Indem wir der linken Hälfte ein Elektron entzogen, haben wir sie positiv aufgeladen; aus dem gleichen Grund hat die rechte Hälfte eine negative Ladung.

Der Grenzübergang der nächsten Leerstellen und Elektronen ist nun bereits erschwert. Sie müssen sich gegen das entstandene elektrische Feld bewegen. Der Übergang dauert noch so lange an, bis die Wärmebewegung imstande ist, die immer höher werdende energetische Barriere zu überwinden. Schließlich wird ein dynamisches Gleichgewicht erreicht.

Was geschieht, wenn man an unsere  $p$ - $n$ -Kombination eine Spannung analog der dritten Prinzipdarstellung anlegt? Es liegt auf der Hand, daß wir den Ladungsträgern dadurch zusätzliche Energie zuführen, die es ihnen erlaubt, die Barriere zu überwinden.

Legen wir dagegen den positiven Pol an den  $n$ -Teil, dann bleibt ein Übergang von Leerstellen und Elektronen durch die Barriere hindurch weiterhin ausgeschlossen.

Wir sehen, daß ein  $p$ - $n$ -Übergang Gleichrichterwirkung zeigt.

Heute werden in den verschiedensten Bereichen der Technik Gleichrichter (Ventile, Dioden usw. sind im Grunde nur Synonyme dafür) verwendet, deren Funktionsprinzip wir soeben erklärt haben.

Unsere Darstellung ist extrem vereinfacht. Wir haben alle Einzelheiten im Verhalten der Leerstellen und Elektronen vernachlässigt, die befähigt sind, die Grenzfläche ohne Rekombination zu überwinden, desgleichen den Strom der Nebenladungsträger, der dazu führt, daß die Gleichrichtung an einem  $p$ - $n$ -Übergang unvollständig ist. Bei Anlegen einer Spannung entsprechend der untersten Prinzipdarstellung fließt nämlich trotzdem ein schwacher Strom.

Was aber findet an der Grenzfläche statt, wenn sich ein dynamisches Gleichgewicht eingestellt hat?

Wir verzichten jetzt auf jegliche Vereinfachung und kommen auf die Nebenladungsträger zurück.

Die Einstellung des dynamischen Gleichgewichts zeigt folgendes Bild: Der in der Tiefe des  $p$ -Kristalls entstehende Leerstellenstrom wächst in dem Maße an, wie wir uns der Grenzfläche nähern. Einen Anteil zu diesem Strom liefern diejenigen Leerstellen, die den  $p$ - $n$ -Übergang erreichen und passieren, ohne sich mit Elektronen zu rekombinieren. Natürlich müssen diese Leerstellen außerdem eine hinreichende Energie besitzen, um den Potentialwall zu überspringen.

Nach Passieren des Übergangsbereichs klingt dieser Strom wegen der Rekombination mit den Elektronen allmählich ab. Gleichzeitig entsteht in der Tiefe des  $n$ -Teils ein zunehmender Leerstellenstrom in entgegengesetzter Richtung. Es gibt in diesem Gebiet sehr viel weniger Leerstellen, dafür aber muß keine Barriere überwunden werden, um in das  $p$ -Gebiet zu gelangen. Man könnte sagen, die Barriere stellt sich so ein, daß sich Hin- und Rückstrom gegenseitig kompensieren.

Das bisher Gesagte gilt auch für den Elektronenstrom. Dem Betrag nach können sich Leerstellen- und Elektronenstrom freilich wesentlich voneinander unterscheiden, weil das  $p$ - und das  $n$ -Gebiet unterschiedliche Fremdstoffgehalte und infolgedessen auch unterschiedliche Mengen freier Ladungsträger aufweisen. Gibt es beispielsweise im  $p$ -Gebiet wesentlich mehr Leerstellen als Elektronen im  $n$ -Gebiet, dann ist der Leerstellenstrom beträchtlich größer als der Elektronenstrom. Man bezeichnet das  $p$ -Gebiet in diesem Fall als Emitter, d.h. Strahler der freien Ladungsträger und das  $n$ -Gebiet als Basis. Angesichts dieser ausführlicheren Beschreibung der Ereignisse am  $p$ - $n$ -Übergang ist einzusehen, daß die Gleichrichtung des Stroms nicht vollständig sein kann.

In der Tat: Legt man den positiven Pol an den  $p$ -Kristall, dann wird die Barriere niedriger. Die Spannung

beschleunigt die Elektronen. Liegt der positive Pol am  $n$ -Teil, dann fällt das von der Spannungsquelle erzeugte elektrische Feld mit der Richtung des Feldes der Barriere zusammen. Das Feld wird am Übergang stärker. Damit wird die Anzahl der Elektronen, die zur Überwindung der Barriere imstande sind, kleiner, ebenso wie die Anzahl der Leerstellen, die den Übergang in umgekehrter Richtung vollziehen können. Daher rührt auch die Zunahme des Widerstands im Übergangsbereich, die eine sogenannte asymmetrische Stromspannungskennlinie zur Folge hat.

Die tiefergehende Betrachtung läßt also deutlich erkennen, aus welchem Grund die in der Übergangsschicht stattfindende Gleichrichtung unvollständig bleibt.

# 3. Elektromagnetismus

## Das Maß des Magnetfeldes

Die Wechselwirkung von Stäben und Zeigern aus bestimmten Eisenerzen ist schon seit langem bekannt. Diese Gegenstände zeichneten sich durch die Eigenschaft aus, mit einem Ende stets nach Norden zu zeigen. Man konnte einem derartigen Zeiger also zwei Pole — einen Nordpol und einen Südpol — zuordnen. Leicht zu beweisen war auch die Tatsache, daß sich gleichnamige Pole abstoßen, ungleichnamige dagegen anziehen.

Eine sorgfältige Untersuchung des Verhaltens solcher besonderer Körper, die inzwischen die Bezeichnung Magnete erhalten hatten, erfolgte durch William Gilbert (1540—1603). Man erkundete sowohl die Gesetzmäßigkeiten ihres Verhaltens an verschiedenen Orten des Erdballs als auch die Regeln ihrer Wechselwirkung untereinander.

Am 21. Juli 1820 veröffentlichte der dänische Physiker Ørsted seine Arbeit mit dem seltsamen Titel „Versuche über die Wirkung des elektrischen Konflikts auf die Magnetnadel“ und rührte zugleich kräftig die Reklame-trommel für sein Werk. In der kurzen, nur vier Seiten umfassenden Arbeit wurde dem Leser mitgeteilt, daß Ørsted (genaugenommen nicht Ørsted, sondern einer seiner Zuhörer während einer Vorlesung) bemerkt hatte, daß eine Magnetnadel abgelenkt wird, wenn man sie in die Nähe eines stromdurchflossenen Leiters bringt.

Unmittelbar an diese Entdeckung schloß sich eine weitere an. Der französische Physiker André Marie Ampère

(1775—1836) fand, daß elektrische Ströme miteinander in Wechselwirkung treten.

Magnete beeinflussen also andere Magnete sowie Ströme, und Ströme beeinflussen andere Ströme sowie Magnete.

Zur Beschreibung dieser sowie zur Beschreibung elektrischer Wechselwirkungen ist die Einführung des Feldbegriffs vorteilhaft. Wir sagen, daß elektrische Ströme sowie natürliche und künstliche Magnete Magnetfelder erzeugen.

Es sei unterstrichen, daß die reale Existenz des elektrischen und magnetischen Feldes — mit anderen Worten die Tatsache, daß das Feld eine Form der Materie ist — nur durch Untersuchungen von Wechselfeldern bewiesen wird. Vorläufig ist das Feld für uns lediglich ein bequemer Begriff — nicht mehr. In der Tat könnte man die Quellen eines Magnetfeldes hinter einem Schirm verbergen; ihre Anwesenheit im Raum ließe sich anhand der Wirkungen erkennen, die sie erzeugen.

Auf die Anwesenheit eines Magnetfeldes reagieren die gleichen Systeme, die ihrerseits ein Magnetfeld erzeugen, d.h., ein Magnetfeld beeinflußt Magnetnadeln und elektrische Ströme. Die erste Aufgabe, der sich ein Forscher bei der Untersuchung des Magnetismus gegenüberstellt, ist das „Abtasten“ des Raums, in dem ein Magnetfeld existiert. Zur Kennzeichnung eines elektrischen Feldes haben wir an jedem Punkt des Feldes jene Kraft ermittelt, die auf eine Einheitsladung wirkt. Wie müßten wir verfahren, um das Magnetfeld zu beschreiben?

Im allgemeinen Fall zeigt eine kleine Magnetnadel ein kompliziertes Verhalten. Zuweilen wird sie nur eine bestimmte Schwenk-, gelegentlich aber auch eine translatorische Bewegung ausführen. Um das Magnetfeld zu kennzeichnen, darf man dem Zeiger nicht die Möglichkeit zu translatorischer Bewegung geben. In erster Linie ist festzustellen, in welche Richtung der Nordpol unserer Ma-

gnetnadel weist (d.h. das Ende der Magnetnadel, das bei Abwesenheit von Strömen und magnetischen Gegenständen nach Norden zeigt).

Wir haben weiter oben erklärt, daß ein bequemes grafisches Verfahren zur Beschreibung des elektrischen Feldes in der Einführung der sogenannten Kraftlinien besteht. Die Richtung der elektrischen Kraftlinien gibt an, wohin eine positive Ladung abgelenkt wird. Die Dichte der Kraftlinien entspricht dem Wert der Kraft. Analog können wir auch bei Beschreibung des Magnetfeldes verfahren. Das Ende einer frei drehbaren Magnetnadel gibt die Richtung der Kraftlinien an.

Was aber könnte man als Maß der „Intensität“ des Magnetfeldes wählen? Natürlich ließe sich mit Hilfe einer einfachen Vorrichtung das Kraftmoment bestimmen, das an der Magnetnadel angreift. Wir sollten aber nach einem anderen Verfahren suchen, denn die Magnetnadel ist so ein „Ding an sich“. Wenn wir unsere Versuche mit der Magnetnadel durchführen, müssen wir zur gleichen Zeit ein „Maß für die Intensität“ des Magnetfeldes und ein weiteres für die Nadel suchen. Solche Situationen werden von Physikern wohlweislich vermieden.

Wir behalten für die Magnetnadel einstweilen die Funktion der Bestimmung des grafischen Bildes der Kraftlinien bei. Zur Einführung eines quantitativen Maßes der „Intensität“ des Magnetfeldes nehmen wir einen Versuch von Ampère zu Hilfe, der bereits 1820 entdeckte, daß ein Stromkreis (im Modell durch eine Leiterschleife dargestellt) und eine Magnetnadel ähnliches Verhalten zeigen. Eine Leiterschleife, durch die ein Strom fließt (Stromkreis), stellt sich nämlich im Magnetfeld so ein, daß die Normale der von der Leiterschleife umschlossenen Fläche in die gleiche Richtung wie eine Magnetnadel zeigt. Die Rolle des Nordpols übernimmt dabei jene Seite des Stromkreises, die in der Draufsicht einen Stromlauf im Gegenurzeigersinn zeigt.

Anders als die Magnetnadel jedoch ist ein Stromkreis keineswegs ein Objekt, von dem wir nicht wüßten, wie es zu kennzeichnen wäre. Die Eigenschaften des Stromkreises sind eindeutig durch die Stromstärke, die Fläche und ihre Normalenrichtung definiert. Wir dürfen annehmen, daß der beschriebene Stromkreis zum Abtasten eines Magnetfeldes recht gut geeignet ist.

Wir entschließen uns also, als Maß der „Intensität“ des Magnetfeldes jenes Drehmoment zu wählen, das am Stromkreis angreift. Sie dürfen nicht glauben, ein derartiges Gerät sei weniger bequem als eine Magnetnadel. Ein guter Experimentator ist sehr wohl imstande, eine stromdurchflossene Leiterschleife (Stromkreis) mit einer winzigen Fläche anzufertigen und sich ein einfaches Verfahren zum Ausgleich der geringen Drehbewegung auszudenken, die das Feld verursacht. Er könnte beispielsweise eine geeichte Feder benutzen.

Zunächst einmal müssen wir das Verhalten verschiedener Probestromkreise (Leiterschleifen, die verschiedene Flächen umschließen) an einem bestimmten Punkt eines konstanten Magnetfeldes klären.

Dabei erhalten wir folgendes Untersuchungsergebnis: Das Kraftmoment ist dem Produkt aus Stromstärke und Fläche proportional. Der Probestromkreis wird also nicht durch die Stromstärke und die Fläche jeweils für sich allein gekennzeichnet, sondern durch deren Produkt.

Außer diesem Produkt müssen wir wissen, welche Lage die Normale des Stromkreises bezüglich der Richtung des Feldes hat. Der Stromkreis verhält sich ja wie eine Magnetnadel. Stellt man ihn so ein, daß seine positive Normale (d.h. der Vektor, der an der Nordseite austritt) dem Kraftlinienverlauf folgt, dann verbleibt der Stromkreis auch in dieser Lage (das Kraftmoment ist gleich Null). (Bild 3.1. unten.) Ordnet man den Stromkreis so an, daß seine Normale senkrecht zu Kraftlinien verläuft, dann erreicht das Kraftmoment sein Maximum. (Bild 3.1. oben.)

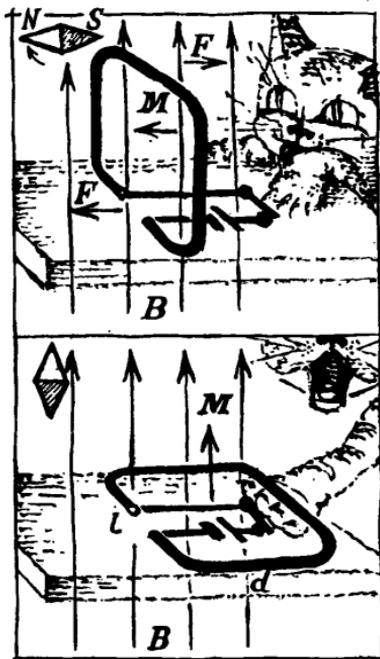


Bild 3.1.

Es ist an der Zeit, einen neuen Begriff einzuführen, einen sehr wichtigen, wie wir gleich sehen werden. Wir wollen den Stromkreis durch den Vektor  $M$  kennzeichnen, den wir magnetisches Moment nennen. (Bild 3.1.) Das Magnetmoment wird gleich dem Produkt aus der Stromstärke  $I$  und der Fläche des Stromkreises  $S = l \cdot d$  gesetzt:

$$M = IS.$$

Der Vektor  $S$  erhält die Richtung der positiven Normalen relativ zur Ebene des Stromkreises.

So haben wir nun ein Gerät, mit dessen Hilfe das Feld gemessen werden kann. Am bequemsten ist es, das maximale, auf den Probestromkreis einwirkende Feld zu messen.

Indem wir nun von einem Punkt des Feldes zu einem anderen gehen oder auf das Feld durch Lageänderung seiner Quellen bzw. auch durch Änderung der Stromstärken, die das Feld erzeugen, einwirken, erhalten wir immer wieder andere Werte für das Moment des Kräftepaars  $F$ , das auf den Probestromkreis Einfluß nimmt. Der Maximalwert des Kraftmoments kann wie folgt aufgeschrieben werden:

$$N = BM;$$

darin ist  $B$  die Größe, die wir als Maß für das Feld annehmen wollen. Sie heißt magnetische Induktion. Die magnetische Induktion ist also gleich dem maximalen Kraftmoment, das auf einen Probestromkreis mit dem magnetischen Moment vom Betrag eins wirkt.

Die Dichte der Kraftlinien, d.h. jene Kraftlinienzahl, die auf die Einheit der Fläche entfällt, wählen wir proportional dem Wert von  $B$ . Der Vektor  $B$  hat die gleiche Richtung wie die Kraftlinien.

Das magnetische Moment, die magnetische Induktion und unser alter Bekannter, das Kraftmoment, sind Vektoren. Allerdings erkennen wir, daß sich diese Vektoren von den Verschiebungs-, Geschwindigkeits-, Beschleunigungs-, Kraftvektoren usw. unterscheiden. In der Tat gibt ein Vektor, etwa der Geschwindigkeitsvektor eines Körpers, an, in welche Richtung sich der Körper bewegt; Beschleunigungs- und Kraftvektoren zeigen, welche Richtung die Anziehung oder Abstoßung hat. Der Pfeil, der einen Vektor symbolisiert, hat in allen diesen Beispielen einen durchaus objektiven und realen Sinn. Was hingegen unsere neuen Bekannten sowie das Kraftmoment betreffen, so verhalten sich hier die Dinge anders. Die Vektoren liegen auf der Drehachse. Sie sind nur symbolisch aufzufassen. Wir müssen uns aber unbedingt über die Richtung eines Vektors einigen. Der Pfeil am „Ende“ der Drehachse hat keinen Sinn. Einen objektiven Sinn

hingegen hat die Drehrichtung, sie müssen wir kennzeichnen. Man einigt sich in der Weise, daß der Pfeil an der Drehachse so angebracht wird, daß man bei Draufsicht auf den Vektor die Drehung entweder im Uhrzeigersinn oder im Gegenuhrzeigersinn ablaufen sieht. Die Physiker haben sich an die zweite Variante gewöhnt.

Die beiden erwähnten Vektorentypen haben glücklich gewählte Bezeichnungen, die für sich selbst sprechen; sie heißen Polar- bzw. Axialvektoren.

Die Messung von Feldern verschiedener Systeme führt uns zu folgenden Regeln: An Magneten lassen sich stets zwei Pole nachweisen: der Nordpol, aus dem die Kraftlinien austreten, und der Südpol, in den sie münden. Was mit den Kraftlinien im Innern des Magneten geschieht, können wir bei diesem Versuch naturgemäß nicht herausfinden.

Was die Magnetfelder der Ströme betrifft (Bild. 3.2.), so zeigt sich hier folgende Gesetzmäßigkeit: Die magnetischen Kraftlinien fließen „um den Strom herum“. Blickt man dabei in die Flußrichtung des Stroms, so verlaufen die Kraftlinien im Uhrzeigersinn. Der Punkt bzw. das Kreuz in den Bildern bedeuten (diese Darstellung ist allgemein üblich), daß der Strom auf den Betrachter zu- bzw. vom Betrachter wegfließt.

Das magnetische Moment wird, wie aus der Formel hervorgeht, in Ampere, multipliziert mit  $m^2$ , gemessen.

Die Einheit der magnetischen Induktion ist das Tesla. Ein Tesla entspricht  $1 \text{ kg A}^{-1} \text{ und } s^{-2}$ .

Magnetische Felder werden von Strömen und von Permanentmagneten erzeugt. Sie beeinflussen Ströme und Permanentmagneten. Wer auf den Begriff des Magnetfeldes verzichten möchte, kann alle Wechselwirkungsarten, an denen magnetische Felder beteiligt sind, in vier Gruppen gliedern: magnetische Wechselwirkungen, d.h. die Beeinflussung eines Magneten durch einen anderen Magneten, elektromagnetische Wechselwir-

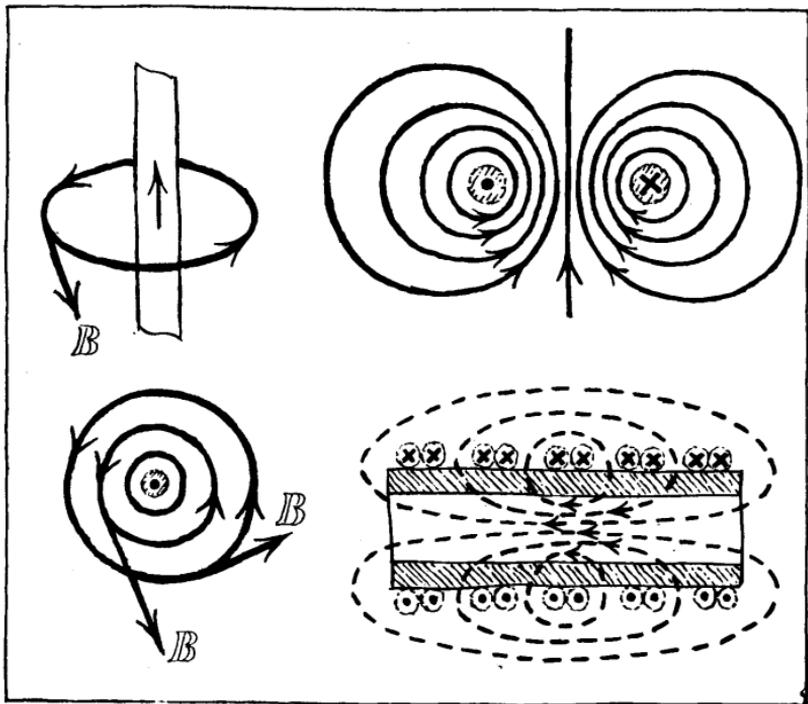


Bild 3.2.

kungen, d.h. die Wirkung von Strömen auf einen Magneten, magnetelektrische Wechselwirkungen, d.h. die Wirkungen eines Magneten auf einen Strom, und schließlich elektrodynamische Wechselwirkungen, d.h. die Wirkungen eines Stroms auf einen anderen Strom.

Vor allem Techniker gebrauchen diese Terminologie. So bezeichnen sie ein Gerät beispielsweise als magnetelektrisch, wenn der Magnet fest steht und der stromdurchflossene Rahmen beweglich ist.

Elektrodynamische Wechselwirkungen sind auch der modernen Definition der Einheit der Stromstärke zugrunde

gelegt. Diese Definition lautet: Das Ampere ist die Stärke eines konstanten Stroms, der zwei parallele geradlinige unendlich lange Leiter von verschwindend kleinem kreisförmigem Querschnitt durchfließt, die im Abstand von einem Meter im Vakuum angeordnet sind und der zwischen diesen beiden Leitern die Kraft von  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton auf einem Meter Länge verursacht.

Im heute allgemein eingeführten SI ist die Einheit der Stromstärke die Basiseinheit. Dementsprechend ist das Coulomb als Amperesekunde definiert. Ich gestehe, daß mir ein Einheitssystem mehr zusagen würde, worin die Einheit der Elektrizitätsmenge die Basiseinheit wäre, ausgedrückt durch die Masse des bei der Elektrolyse abgeschiedenen Silbers. Offenbar hat aber die obenangegebene Definition gewisse praktische Vorzüge, obwohl mir scheint, daß die praktische Messung der elektrodynamischen Kraft mit großer Genauigkeit alles andere als einfach ist.

Nachdem Sie nun wissen, wie die Richtung des Magnetfeldes zu bestimmen ist und welche Vorschriften für die Ermittlung der Richtung jener Kraft gelten, die von seiten des Magnetfeldes auf den Strom wirkt (wovon noch die Rede sein wird), werden Sie erkennen, daß sich parallelfließende Ströme anziehen, während sich gegensinnig gerichtete Ströme abstoßen.

### **Wirkungen des homogenen Magnetfeldes**

Homogen heißt ein Magnetfeld dann, wenn seine Wirkung auf beliebige Feldindikatoren an verschiedenen Orten gleich ist.

Ein Feld dieser Art kann zwischen den Polen eines Magneten erzeugt werden. Je näher die Pole relativ zueinander angeordnet sind und je größer die ebene Fläche der Magnetstirnseiten ist, um so homogener ist das Feld.

Über die Wirkung des homogenen Magnetfeldes auf eine Magnetnadel bzw. einen Stromkreis wissen wir be-

reits: Sofern keine Ausgleichsfeder vorhanden ist, stellen sich beide im Feld so ein, daß ihr magnetisches Moment mit der Feldrichtung übereinstimmt. Der „Nordpol“ schaut auf den „Südpol“ des Magneten. Anders formuliert: Das magnetische Moment stellt sich in Richtung der Kraftlinien des Magnetfeldes ein.

Untersuchen wir nun die Wirkung des magnetischen Feldes auf bewegte Ladungen.

Von der Existenz und Größe dieser Wirkung kann man sich auf einfache Weise überzeugen: Es genügt ein gewöhnlicher Hufeisenmagnet, der an den Elektronenstrahl einer Elektronenstrahlröhre gebracht wird, der Leuchtfleck auf dem Bildschirm wird abgelenkt und ändert seine Lage in Abhängigkeit von der Lage des Magneten.

Geht man nun von der qualitativen Demonstration der Erscheinung zur quantitativen Untersuchung über, so zeigt sich, daß die Kraft  $B$ , die von seiten des Magnetfeldes auf ein rechtwinklig zu den Kraftlinien im Feld mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegtes Elektron wirkt, gleich

$$F = evB$$

ist. Darin gibt  $e$  die Ladung der Partikel an. (Natürlich gilt dieses Gesetz nicht nur für Elektronen, sondern für beliebige geladene Partikeln.)

Bewegt sich die Partikel jedoch im Kraftlinienverlauf des Magnetfeldes, dann wird sie vom Feld nicht beeinflußt. Wer die Trigonometrie beherrscht, erkennt, wie der Ausdruck der Kraft für den Fall einer Bewegung unter einem bestimmten Winkel relativ zum Feld aussehen muß. Wir wollen den Text jedoch nicht mit Formeln überhäufen, die wir dann später doch nicht brauchen.

Vorläufig haben wir aber noch nichts über die Richtung der Kraft gesagt, was jedoch äußerst wichtig ist. Das Experiment zeigt, daß die Kraft sowohl senkrecht auf der Bewegungsrichtung der Partikel als auch auf der Induktionsrichtung steht. Anders ausgedrückt: Sie ver-

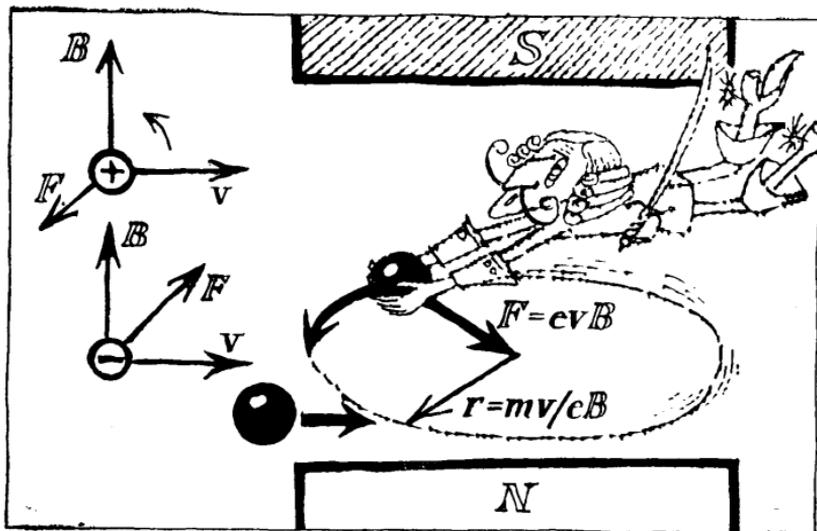


Bild 3.3.

läuft senkrecht zu der Ebene, die durch die Vektoren  $v$  und  $B$  geht. Damit ist aber noch nicht alles gesagt. Jede Medaille hat zwei Seiten. Worin unterscheiden sie sich? In der Richtung der Drehung, die den einen Vektor mit dem anderen zur Deckung bringt. Sehen wir die Drehung des Vektors  $v$  zum Vektor  $B$  um einen Winkel kleiner als  $180^\circ$  im Gegenuhrzeigersinn ablaufen, dann heißt die betreffende Seite positiv.

Die auf der linken Seite von Bild 3.3. gezeigten einfachen Vektordarstellungen geben an, daß eine positiv geladene Partikel in Richtung der positiven Normalen abgelenkt wird. Das Elektron wird in die Gegenrichtung abgelenkt.

Und nun sehen wir uns einmal an, zu welchem interessanten Ergebnis diese Gesetzmäßigkeit für den Fall eines Elektrons föhrt, das rechtwinklig in ein konstantes Magnetfeld hineinfliegt. (Bild 3.3. rechts.) Überlegen Sie bitte,

welche Bahn das Elektron beschreiben muß. Eine Kreisbahn! Die Kraft des Magnetfeldes ist eine Zentripetalkraft, und den Radius der Kreisbahn können wir sofort ausrechnen, indem wir  $mv^2/r$  und  $e v B$  gleichsetzen. Der Bahnradius ist somit gleich

$$r = \frac{mv}{eB}.$$

Beachten Sie bitte, daß sich aus dem Verhalten einer Partikel deren Eigenschaften berechnen lassen. Aber es ist wieder die gleiche Geschichte wie mit der Bewegung einer Partikel im elektrischen Feld. Es gelingt nicht, die elektrische Ladung und die Masse der Partikel jeweils für sich zu bestimmen! Das Experiment führt uns auch in diesem Fall zu dem Verhältnis  $e/m$ .

Die Partikel beschreibt also eine Kreisbahn, wenn ihre Bewegungsrichtung einen rechten Winkel mit dem Magnetfeld einschließt. Bewegt sich die Partikel in Richtung des Magnetfeldes, dann folgt ihre Bewegung der Trägheit. Was aber gilt für den allgemeinen Fall? Natürlich haben Sie die Antwort schon parat. Die Partikel bewegt sich spiralförmig, wobei die Achse der Spirale eine Kraftlinie ist. Abhängig vom Eintrittswinkel des Elektrons in das Magnetfeld besteht diese Spirale aus dicht oder weniger dicht aufeinanderfolgenden Windungen.

Wenn das Magnetfeld eine bewegte Partikel beeinflußt, dann muß es auch auf jeden stromdurchflossenen Leiterabschnitt eine Kraft ausüben. Betrachten wir einmal einen Elektronenstrahl, „abschnitt“ der Länge  $l$ . Wir wollen annehmen, daß auf diesem Abschnitt  $n$  Partikeln Platz finden. Die Kraft, die auf einen Leiter der gleichen Länge wirkt, in dem sich ebensoviele Partikeln mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen, ist dann gleich  $nevB$ . Die Stromstärke ist gleich der Gesamtladung, die den Leiter in der Zeiteinheit passiert. Die Zeit  $t$ , in der die betrachteten Elektronen den Weg  $l$  zurücklegen, ist

gleich

$$t = \frac{l}{v}.$$

Man kann die Stromstärke demnach wie folgt angeben:

$$I = \frac{ne}{t} = \frac{nev}{l}.$$

Durch Einsetzen der aus diesem Ausdruck erhaltenen Geschwindigkeit

$$v = \frac{Il}{ne}$$

in die Formel für die Kraft, die auf einen Elektronenstrahl, „abschnitt“ wirkt, erhalten wir auch die Kraft, die auf einen Leiter der Länge  $l$  wirkt:

$$F = IlB.$$

Die Formel gilt nur für den Fall, daß der Leiter senkrecht zum Feld verläuft.

Die Richtung, in die ein stromdurchflossener Leiter ausgelenkt wird, läßt sich mit Hilfe der in Bild 3.3. angegebenen Prinzipdarstellung ermitteln.

Zu Ehren der Forscher des 19. Jahrhunderts führe ich Bild 3.4. an, das nicht nur von akademischem Interesse ist. Es erleichtert das Einprägen der Regel für die Auslenkung von Strömen. Das Bild zeigt, wie sich das eigene Feld des (vom Betrachter wegführenden) Stroms mit dem äußeren Feld addiert. Das Ergebnis der Addition ist rechts dargestellt. Denkt man sich die Kraftlinien als Spannungen im Äther (weitverbreitete Auffassung im vorigen Jahrhundert), dann erhält die Verschiebungsrichtung des Leiters eine anschauliche Interpretation: Der Leiter wird schlicht und einfach aus dem Feld hinausgedrängt.

Wir wollen nun zeigen, daß die Wirkung des Magnetfeldes auf eine bewegte Ladung oder auf einen „Strom-

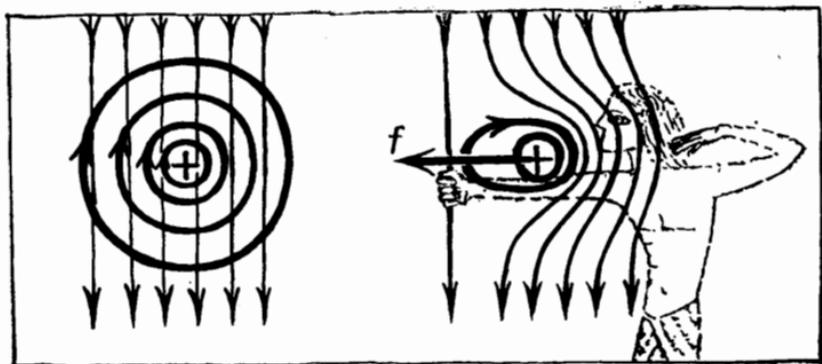


Bild 3.4.

abschnitt“ die gleiche Erscheinung ist, mit der wir unsere Betrachtung der Wirkungen des magnetischen Feldes begonnen haben.

Kehren wir noch einmal zu Bild 3.1. zurück. Dort sind die Kräfte dargestellt, die auf einen Stromkreis wirken. An den Abschnitten des Leiters, die in Richtung der Kraftlinien verlaufen, greifen keine Kräfte an; auf die anderen beiden Abschnitte wirkt ein Kräftepaar, und aus dem Bild geht hervor, daß das Kraftmoment dieses Paares dem Produkt aus Kraft und Kraftarm entspricht:

$$N = IlBd = ISB = MB.$$

Der Ausdruck für das Kraftmoment als Produkt des magnetischen Moments des Stromkreises und der magnetischen Induktion fließt somit unmittelbar aus der Formel für die an der Ladung angreifende Kraft.

Bei dieser Gelegenheit sei bemerkt, daß die Kraft  $F$ , die durch die Formel  $F = evB$  beschrieben wird, Lorentz-Kraft heißt (nach Hendrik Anton Lorentz, 1853–1928, holländischer Physiker, der diese Formel 1895 abgeleitet hat).

### Wirkungen des inhomogenen Magnetfeldes

Ein inhomogenes magnetisches Feld läßt sich einfach erzeugen. Man kann beispielsweise den Polen eines Magneten eine gekrümmte Form geben. (Bild 3.5.) Dann haben die Kraftlinien den im Bild gezeigten Verlauf.

Wir wollen annehmen, daß die Pole genügend weit voneinander entfernt sind, und bringen eine Magnetnadel in die Nähe eines der beiden Pole. Wie wir bereits erwähnt haben, führt die Magnetnadel im allgemeinen nicht nur Drehbewegungen, sondern auch translatorische Bewegungen aus. Nur wenn das Feld homogen ist, läßt sich die ausschließliche Drehbewegung einer Magnetnadel (bzw. eines Stromkreises) beobachten. Im inhomogenen Feld hingegen finden beide Bewegungen statt. Die Nadel dreht sich zunächst so, daß ihre Richtung dem Kraftlinienverlauf entspricht, wird in der Folge jedoch von einem der Pole angezogen. (Bild 3.5.) Die Nadel wird in

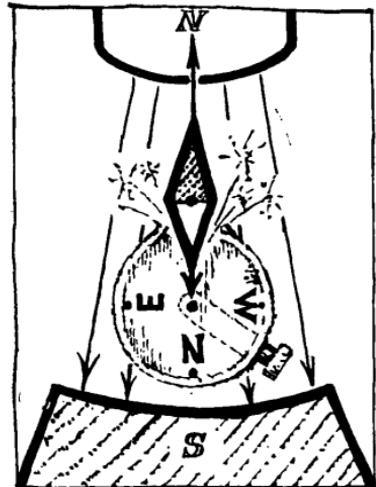


Bild 3.5.

den Bereich hineingezogen, in dem das Feld stärker ist. (Der Grafiker hat hier des Guten zuviel getan; auch ein starkes Feld dürfte einen Kompaß kaum zu Bruch gehen lassen.)

Was ist die Ursache dieses Verhaltens? Offenbar ist die Magnetnadel im inhomogenen Feld nicht nur einem Kräftepaar ausgesetzt. Die „Kräfte“, die am Nord- bzw. Südpol einer im inhomogenen Feld befindlichen Magnetnadel angreifen, sind nicht identisch. Das Ende, das sich in einem stärkeren Feld befindet, ist der Wirkung einer größeren Kraft ausgesetzt. Nach erfolgter Drehbewegung bieten die Kräfte das hier dargestellte Bild: Die in Richtung des stärkeren Feldes wirkende Kraft behält die Oberhand.

Natürlich wird auch ein dünn ausgeführter Stromkreis das gleiche Verhalten zeigen. Wenn ich hier also das Modell einer Magnetnadel mit zwei „Polen“ verwendet habe, so ist dies nur meinen Bemühungen um Anschaulichkeit zuzuschreiben.

Aber wie ist nun das Naturgesetz beschaffen, wie groß ist die Kraft? Experiment und Berechnung zeigen, daß diese Kraft für jedes System mit dem magnetischen Moment  $M$  gleich dem Produkt aus dem Moment des Systems und der Steilheit des Feldanstiegs ist.

Angenommen, die Magnetnadel habe sich längs einer Kraftlinie eingestellt. Die Werte des Feldes an den Stellen, wo sich der Nord- bzw. der Südpol der Magnetnadel befinden, unterscheiden sich voneinander. Wir zeichnen nun eine Kurve des Feldes im Verlauf der Linie, die durch beide Pole geht. Der Einfachheit halber ersetzen wir den Abschnitt der tatsächlichen Feldkurve zwischen den Polen durch eine gerade Linie, was man mit um so größerer Genauigkeit tun kann, je kleiner die Magnetnadel ist, d.h. je näher sich ihre beiden Pole relativ zueinander befinden. Der Anstieg, d.h. der Tangens des Winkels, der von der Geraden in unserem Diagramm und

der waagerechten Achse eingeschlossen wird, ergibt sich als Quotient der Differenz der Felder, dividiert durch die Länge der Magnetnadel. Die entsprechende Formel lautet:

$$F = \frac{M(B_N - B_S)}{l}.$$

Darin ist  $l$  die Länge der Magnetnadel, und  $B_N$  bzw.  $B_S$  sind die Werte des Feldes am nördlichen bzw. südlichen Ende der Magnetnadel. (Wundern Sie sich bitte nicht, daß der Tangens des Winkels eine dimensionsbehaftete Größe ist.)

Setzen wir anstelle des obengeschriebenen Bruchs den Wert für den Tangens des Winkels der Tangente an der den Feldverlauf darstellenden Kurve, und zwar in dem Punkt, wo sich die uns interessierende Partikel befindet, dann „verschwinden die Pole“, und die Formel ist nun für jede beliebige Partikel bzw. für jedes System von Partikeln geeignet.

Fassen wir zusammen: In einem inhomogenen Feld wird ein System bzw. eine Partikel — sofern sie ein magnetisches Moment besitzen — von den Polen eines Magneten angezogen bzw. abgestoßen, je nachdem, welche Richtung das magnetische Moment hat: parallel oder senkrecht zu den Kraftlinien.

Aber kann sich das Magnetmoment senkrecht zur Feldrichtung einstellen? In welchen Fällen dies möglich ist, erfahren Sie weiter unten.

## Amperesche Ströme

Bis zum 19. Jahrhundert war es nicht schwer, physikalische Theorien zu entwickeln. Ein Körper hat sich erwärmt — also enthält er mehr „Wärmestoff“. Das Arzneimittel läßt den Patienten rascher einschlafen — also enthält es „schlafmachende Kraft“. Kleine Stäbe aus Eisenerz

zeigen nach Norden — merkwürdig, aber diese Stäbe bzw. Pfeile haben eben eine „magnetische Seele“. Bekanntlich haben Magnetnadeln schon von altersher den Seefahrern gute Dienste geleistet. Manchmal freilich spielten sie auch verrückt. Aber die Erklärung ist einfach: Die bösen Geister sind schuld! Ebensovienig ist es verwunderlich, daß sich Eisen, Stahl und einige andere Legierungen magnetisieren ließen. Es handelt sich dabei um Körper, denen leichterdings eine magnetische Seele eingehaucht werden kann.

Nach den Entdeckungen Ørstedts und Ampères war offensichtlich geworden, daß sich zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen eine Brücke schlagen läßt. Eine Zeitlang waren zwei Theorien gleichermaßen verbreitet. Einesteils nahm man an, daß sich ein von elektrischem Fluidum durchflossener Leiter in einen Magneten verwandelt. Die andere Auffassung geht auf Ampère zurück, der sagte, daß die magnetische Seele von Eisenerzen aus mikroskopisch kleinen elektrischen Strömen besteht.

Ampères Standpunkt schien vielen der logischere zu sein. Allerdings maß man dieser Theorie keine ernst zu nehmende Bedeutung bei, weil in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts niemand es für möglich hielt, diese Ströme real nachzuweisen. Man zweifelte ja auch an der Existenz von Molekülen und Atomen.

Erst nachdem die Physiker im 20. Jahrhundert experimentell nachgewiesen hatten, daß die uns umgebende Welt tatsächlich aus Atomen aufgebaut ist und diese wiederum aus Elektronen und Atomkernen bestehen, erkannte man die Ampereschen Ströme an, mit deren Hilfe man die magnetischen Eigenschaften des Stoffs zu erklären versuchen könne. Die Mehrzahl der Wissenschaftler war sich einig, daß die von Ampère erdachten „molekularen Ströme“ durch die Bewegung der Elektronen um die Atomkerne erzeugt werden.

Es schien, als würde es mit Hilfe dieser Vorstellungen gelingen, die magnetischen Erscheinungen zu erklären. In der Tat läßt sich ein um den Atomkern kreisendes Elektron als elektrischer Strom auffassen, und wir haben das Recht, diesem System ein magnetisches Moment zuzuschreiben und es mit dem Impulsmoment eines in Bewegung befindlichen geladenen Teilchens in Verbindung zu bringen.

Letzteres läßt sich denkbar einfach beweisen.

Angenommen, das Elektron beschreibt eine Kreisbahn mit dem Radius  $r$ . Da die Stromstärke gleich der je Zeiteinheit transportierten Ladung ist, kann man ein rotierendes Elektron als einen Strom auffassen, dessen Stärke gleich  $I = ne$  ist, worin  $n$  die Anzahl der Umläufe je Sekunde darstellt. Die Geschwindigkeit der Partikel läßt sich mit der Anzahl von Umläufen durch das Verhältnis  $v = n \cdot 2\pi r$  verknüpfen; demnach ist die Stromstärke gleich

$$I = \frac{ve}{2\pi r}.$$

Das magnetische Moment eines Elektrons, das sich um den Atomkern bewegt, läßt sich ganz zwanglos als Bahnmoment bezeichnen. Es ist gleich

$$M = IS = \frac{ve}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{1}{2} evr.$$

Wenn wir daran denken (vgl. 1. Band), daß das Impulsmoment eines Teilchens gleich  $L = mvr$  ist, so erkennen wir, daß zwischen dem Impulsmoment und dem magnetischen Moment folgende, für die Atomphysik sehr wichtige Beziehung gilt:

$$M = \frac{e}{2m} L.$$

Hieraus folgt, daß Atome magnetische Momente besitzen müssen.

Mittels verschiedener Verfahren, auf die wir hier im einzelnen verzichten, lassen sich atomare Gase der unterschiedlichsten Stoffe darstellen. Mit Hilfe zweier Spalte in einem gasgefüllten Raum werden Bündel neutraler Atome von Wasserstoff, Lithium, Beryllium usw. erzeugt. Diese kann man durch ein inhomogenes Magnetfeld treten lassen und den Strahl auf einem Schirm sichtbar machen. Die Frage an die Natur lautet: Werden solche aus Atomen bestehenden Ströme vom geraden Weg abgelenkt und wenn ja, wie?

Das Atom besitzt ein Bahnmoment und verhält sich demzufolge ähnlich wie eine Magnetnadel. Stimmt die Richtung des magnetischen Moments mit der Richtung des Feldes überein, dann muß das Atom in den Bereich des starken Feldes abgelenkt werden; bei antiparalleler Anordnung muß die Ablenkung in das Gebiet des schwachen Feldes erfolgen. Der Betrag der Ablenkung läßt sich mit Hilfe einer Formel berechnen, die dem auf S. 130 angegebenen Ausdruck für diejenige Kraft ähnlich ist, die auf eine Magnetnadel einwirkt.

In diesem Zusammenhang erinnern wir uns sofort, daß die magnetischen Momente der Atome regellos angeordnet sind. Demnach müßten wir erwarten, daß das Bild des Strahls auf dem Bildschirm verwaschen erscheint.

Das Experiment lieferte freilich andere Ergebnisse. Der aus Atomen bestehende Strahl erzeugt niemals ein verwaschenes Bild; vielmehr erfolgt seine Aufspaltung in zwei, drei oder noch mehr Bestandteile, je nachdem, mit welcher Art von Atomen wir es zu tun haben. Die Aufspaltung erfolgt stets symmetrisch. In einigen Fällen ist unter den Bestandteilen eines Strahls auch ein nicht abgelenkter Strahl zugegen, gelegentlich fehlt der nicht abgelenkte Strahl, und schließlich kommt es auch vor, daß ein Strahlenbündel überhaupt nicht aufgespalten wird.

Aus diesem Experiment, das zweifellos eins der wichtigsten physikalischen Experimente überhaupt ist, folgt

zum ersten, daß man die Umlaufbewegungen der Elektronen um den Atomkern tatsächlich als geschlossenen elektrischen Stromkreis auffassen kann. Dabei erfolgt diese Gleichsetzung in einem engen und wohldefinierten Sinn: Ebenso wie geschlossenen Stromkreisen kann man den Atomen ein magnetisches Moment zuordnen. Und weiter: Die magnetischen Momente von Atomen können nur bestimmte diskrete Winkel mit der Richtung des Vektors der magnetischen Induktion einschließen. Mit anderen Worten, die Projektionen der magnetischen Momente auf diese Richtungen sind gequantelt.

Ein großer Sieg der theoretischen Physik bestand darin, daß sie alle diese Einzelheiten vorhergesagt hatte. Aus der Theorie folgt, daß sowohl das Drehmoment als auch das magnetische Moment eines Elektrons auf die Bewegung der einem Atom zugehörenden Elektronen im Feld des Atomkerns zurückgehen (die Momente sind antiparallel zueinander). Man bezeichnet diese Momente als Bahnmomente. Diese Bezeichnung hat sich aus historischen Gründen eingebürgert. Die Atomtheorie ging ja von der Annahme aus, daß das Atom dem Sonnensystem ähneln solle. Die Projektionen des Drehmoments  $L_z$  und des magnetischen Moments  $M_z$  auf die Feldrichtungen lassen sich wie folgt ausdrücken:

$$L_z = m \frac{h}{2\pi} \text{ und } M_z = m\mu.$$

Hierin ist  $m$  eine ganze Zahl, die die Werte 0, 1, 2, 3, . . . annehmen kann;  $h/2\pi$  ist der kleinste Wert der Projektion des Impulsmoments,  $\mu$  ist der kleinste Wert der Projektion des magnetischen Moments. Die Größen  $h$  und  $\mu$  werden experimentell ermittelt:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s} \text{ und } \mu = 0,93 \cdot 10^{-20} \text{ erg/Gs.}$$

Diese für die Physik so bedeutsamen Konstanten tragen die Namen zweier großer Gelehrter, die die Grundlā-

gen der Quantenphysik schufen:  $h$  wird als Plancksches Wirkungsquantum und  $\mu$  als Bohrsches Magneton bezeichnet.

Die Postulate der Quantenmechanik reichten jedoch nicht aus, um Klarheit in den unterschiedlichen Charakter der Aufspaltung von Atombündeln verschiedener Elemente zu bringen. Selbst die einfachsten Atome — die Wasserstoffatome — zeigten ein unerwartetes Verhalten. Man mußte die Gesetze der Quantenmechanik durch eine wichtige Annahme ergänzen, die wir bereits im Vorübergehen erwähnten. Dem Elektron (später zeigte sich, daß dies für jedes Elementarteilchen gilt) muß ein eigenes Impulsmoment (ein Spin) zugeordnet werden und dementsprechend auch ein eigenes magnetisches Moment. Um jedoch die Unvermeidlichkeit der Gleichsetzung von Elektron und Magnetnadel einzusehen, müssen wir uns zunächst ausführlicher mit dem Charakter der Bewegung von Elektronen am Atomkern bekannt machen.

### Die Elektronenwolke des Atoms

Die Bewegung eines Elektrons ist nicht sichtbar. Wir müssen auch alle Hoffnungen aufgeben, der wissenschaftliche Fortschritt könne uns eines Tages ein Elektron sehen lassen. Die Ursache ist hinreichend einfach. Um etwas „zu sehen“, muß man es „beleuchten“. „Beleuchten“ wiederum heißt, das Elektron mit der Energie eines wie auch immer gearteten Strahls zu beeinflussen. Das Elektron aber ist so klein und hat eine so verschwindend geringe Masse, daß jeder Eingriff von seiten des „Betrachtungsgertes“ unvermeidlich dazu führt, daß das Elektron seinen Platz verläßt.

Nicht nur die bescheidenen Angaben über den Aufbau der Atome, die gleich folgen werden, sondern die gesamte geschlossene Lehre von der Elektronenstruktur des Stoffs sind das Ergebnis der Theorie, nicht des Experiments.

Die Richtigkeit der Theorie wird von einer Vielzahl von Experimenten bestätigt, die sich durch streng logische Überlegungen aus der Theorie herleiten lassen. Das Bild des Elektronenaufbaus, das wir nicht unmittelbar sehen können, ergibt sich mit dem gleichen Sicherheitsgrad, mit dem Sherlock Holmes anhand von Spuren das Verbrechen rekonstruierte.

Welches Vertrauen verdient die Theorie, wenn man bedenkt, daß das Bild der Elektronenstruktur mit Hilfe der gleichen Gesetze der Quantenphysik vorhergesagt wurde, die aufgrund anderer Experimente ermittelt wurden!

Wir haben bereits berichtet, daß die Ordnungszahl eines chemischen Elements im Periodensystem nichts anderes ist als die Kernladung des betreffenden Elements, oder, was dasselbe ist, die Anzahl der einem neutralen Atom angehörenden Elektronen. Das Wasserstoffatom hat ein Elektron, Helium zwei, Lithium drei, Beryllium vier usw.

Wie bewegen sich nun alle diese Elektronen? Die Antwort ist alles andere als einfach und hat lediglich Näherungscharakter. Das Problem ist deshalb so schwierig, weil die Elektronen nicht nur mit dem Kern, sondern auch miteinander wechselwirken. Glücklicherweise zeigt sich, daß die wechselseitige Abstoßung der Elektronen im Vergleich zu jener Bewegung eine geringere Rolle spielt, die auf die Wechselwirkung des Elektrons mit dem Kern zurückgeht. Diesem Umstand allein ist es zu danken, daß wir Schlußfolgerungen über den Charakter der Elektronenbewegungen in verschiedenen Atomen ziehen können.

Jedem Elektron ist von der Natur ein bestimmter räumlicher Bereich zugewiesen, in dessen Grenzen es sich bewegt. Nach der Form dieser Bereiche gliedert man die Elektronen in Kategorien mit den lateinischen Buchstaben *s*, *p*, *d* und *f*.

Am einfachsten ist die „Wohnung“ des  $s$ -Elektrons beschaffen. Sie stellt eine Kugelschale dar. Die Theorie besagt, daß sich das Elektron meist im Mittelpunkt der Kugelschale aufhält. Es ist daher grob vereinfacht, wenn man sagt, das  $s$ -Elektron beschreibe eine Kreisbahn.

Der Raumbereich, in dem das  $p$ -Elektron wandert, sieht ganz anders aus. Er ist hantelförmig. Die anderen Elektronenkategorien haben noch kompliziertere Existenzbereiche.

Für jedes Atom im Periodensystem der Elemente vermag die Theorie (freilich unter Hinzuziehung experimentell gewonnener Daten) vorherzusagen, wieviel Elektronen der einen oder anderen Art es enthält.

Hat diese Elektronenverteilung nach Bewegungstypen eine Beziehung zu ihrer Verteilung auf die mit  $K$ ,  $L$ ,  $M$  usw. bezeichneten Energieniveaus, von denen im vorhergehenden Kapitel die Rede war? In der Tat, hier besteht eine unmittelbare Beziehung. Theorie und Experiment zeigten, daß es sich bei Elektronen des  $K$ -Niveaus nur um  $s$ -Elektronen handelt; auf dem  $L$ -Niveau befinden sich  $s$ - und  $p$ -Elektronen, auf dem  $M$ -Niveau  $s$ -,  $p$ - und  $d$ -Elektronen usw.

Wir werden die Elektronenstruktur von Atomen an dieser Stelle nicht ausführlich betrachten und beschränken uns lediglich auf eine Aufzählung der Elektronenstruktur der ersten fünf Elemente des Periodensystems. Wasserstoff-, Helium-, Lithium- und Berylliumatome besitzen nur  $s$ -Elektronen, das Boratom hat vier  $s$ -Elektronen und ein  $p$ -Elektron.

Die Kugelsymmetrie des Raumbereichs, in dem sich das  $s$ -Elektron bewegt, macht unsere Überlegungen über das magnetische Moment eines Atoms, das nur ein Elektron besitzt, zweifelhaft. In der Tat, wenn das Drehmoment gleiche und mit gleicher Wahrscheinlichkeit nach allen Richtungen weisende Werte annehmen kann, muß das mittlere Drehmoment und also auch das magnetische

Moment eines derartigen Systems gleich Null sein. Zu diesem naheliegenden Schluß führt auch die Quantenphysik: Atome, die nur s-Elektronen enthalten, können kein magnetisches Moment besitzen.

Wenn dem aber so ist, dürften die Atome der ersten vier Elemente im Periodensystem im homogenen Magnetfeld nicht abgelenkt werden. Und wie ist es in Wirklichkeit? Die Vorhersage für Wasserstoff- und Lithiumatome wird nicht erfüllt. Aus Atomen der genannten Elemente bestehende Bündel verhalten sich äußerst seltsam. In beiden Fällen wird der aus Atomen bestehende Strom in zwei Komponenten aufgespalten, die relativ zur ursprünglichen Richtung gleich weit, aber jeweils nach der anderen Seite, abgelenkt werden. Nicht einzusehen!?

### **Die magnetischen Momente von Partikeln**

Der Elektronenspin wurde 1925 aus der Taufe gehoben. Die Notwendigkeit seiner Einführung zeigten Abraham Goudsmit und Georg Uhlenbeck. Mit der Annahme, daß das Elektron ein eigenes Drehmoment besitzt, fanden diese beiden Wissenschaftler für alle Unklarheiten in der Interpretation der Atomspektren eine ganz natürliche Lösung.

Die Versuche zur Aufspaltung von Atombündeln wurden wenig später durchgeführt. Es stellte sich heraus, daß auch hier nur mit Hilfe des Spinbegriffs eine erschöpfende Erklärung der beobachteten Tatsachen gelingt. Erst danach faßten alle Physiker Vertrauen zum Spinbegriff.

Einige Zeit ging noch ins Land, bis klar war, daß ein eigenes Drehmoment, also ein Spin, nicht nur dem Elektron, sondern allen Elementarteilchen eigen ist.

Wir haben bereits gesagt, daß die Bezeichnung Spin auf einen menschlichen Hang zur Anschaulichkeit zurückgeht. Da das Drehmoment zur Kennzeichnung eines

rotierenden Festkörpers in die Physik eingegangen ist, nahmen viele Physiker, nachdem sie festgestellt hatten, daß man den Elementarteilchen zur „Rettung“ des Erhaltungssatzes einen bestimmten Drehmomentwert zuordnen müsse, sogleich ihre Zuflucht zu dem anschaulichen Bild einer Rotation der Partikel um ihre eigene Achse. Diese naive Vorstellung hält keiner Kritik stand. Wir sind genausowenig berechtigt, von einer Rotation der Elementarteilchen um ihre eigenen Achsen zu sprechen, als Überlegungen zur Rotation eines mathematischen Punkts um seine Achse anzustellen. Ein mathematischer Punkt ist ja ausdehnungslos!

Die Anhänger der Anschaulichkeit vermochten aufgrund einiger indirekter Überlegungen die Größe des Elektrons abzuschätzen; mehr noch, sie konnten feststellen, daß die Größe des Elektrons geringer sein müsse als der ermittelte Wert, wenn dieser Begriff auch auf das Elektron anwendbar sei. Der Wert des Spins ist uns bekannt. Nimmt man an, daß das Elektron eine bestimmte Form hat, läßt sich ausrechnen, mit welcher Geschwindigkeit die „Punkte an seiner Oberfläche“ rotieren. Diese Geschwindigkeit müßte größer als die Lichtgeschwindigkeit sein. Wer nun noch auf diesem Standpunkt hätte beharren wollen, hätte zugleich auch der Relativitätstheorie ade sagen müssen.

Doch der wohl schlagendste Beweis contra jegliche Anschaulichkeit besteht darin, daß das Neutron, das keine elektrische Ladung trägt, einen Spin besitzt. Warum wohl ist dieser Beweis so entscheidend? Urteilen Sie selbst!

Stellt man sich ein Teilchen in Gestalt einer geladenen Kugel vor, so führt die Annahme einer Rotation um die eigene Achse zu einem Metall von der Art der Ampere'schen Ströme. Was passiert bei einem elektrisch neutralen Teilchen? Das Neutron besitzt sowohl ein Drehmoment als eben auch ein magnetisches Moment. Ein Mo-

dell von der Art der Ampereschen Ströme versagt hier also zur anschaulichen Erklärung. (Über die Eigenschaften des Neutrons wird im 4. Band die Rede sein.) Prothezeiungen über die Unmöglichkeit, den Spin und das magnetische Moment von Elementarteilchen von einem allgemeineren, bislang noch nicht entdeckten Gesetz aus zu erklären, hatten wohl keinen Sinn. (Zum Teil wird dieses Problem durch die Theorie des englischen Physikers Paul Dirac gelöst, die jedoch zu abstrakt ist, um an dieser Stelle darauf einzugehen.) Gegenwärtig jedoch müssen wir die „Pfeile“, die den Drehimpuls und das magnetische Moment einer Partikel angeben, als primäre Begriffe ansehen.

Vor rund 50 Jahren gingen die meisten Physiker mit Einstein konform, der meinte, daß jede physikalische Theorie so beschaffen sein muß, daß man sie, abgesehen von irgendwelchen Berechnungen, durch einfachste Bilder illustrieren kann. Die Auffassung dieses großen Mannes hat sich leider nicht bestätigt. Schon viele Jahre operieren die Physiker seelenruhig mit Theorien, in denen Meßgrößen ohne jede bildliche Entsprechung auftreten.

Weder das Elektron noch die anderen Elementarteilchen besitzen „Pole“. In einer Reihe von Fällen betrachten wir diese Partikeln ganz zweifelsfrei als punktförmig und stimmen darin überein, daß der Begriff einer Form auf Elementarteilchen nicht anwendbar ist, und doch sind wir dessenungeachtet gezwungen, den Teilchen zwei vektorielle Eigenschaften zuzuschreiben: den Drehimpuls (den Spin) und das magnetische Moment. Diese beiden Vektoren liegen stets auf einer Linie. Einmal verlaufen sie parallel, ein anderes Mal antiparallel.

Der Versuch zeigt, daß die allgemeinen Formeln für die Projektionen des Drehimpulses und des magnetischen Moments, die wir auf S. 134 angeführt haben, auch für die eigentlichen Momente zutreffen. Alle Experimente,

ob es sich nun um Spektraluntersuchungen oder um Versuche zur Aufspaltung von Atombündeln im inhomogenen Magnetfeld handelt, lassen sich einwandfrei interpretieren, wenn man im Fall des Elektrons für die Zahl  $m$  in der Formel für die Projektion des Impulsmoments zwei Werte zuläßt, nämlich  $\pm 1/2$ . Was die Formel für die Projektion des magnetischen Moments angeht, so kann die Zahl  $m$  ebenfalls zwei Werte annehmen, nämlich  $\pm 1$ .

Der Elektronenspin hat den Zahlenwert  $1/2 \hbar/2\pi$  und kann nur zwei Richtungen einnehmen: gleich- und gegensinnig zum Feld. Was das magnetische Moment des Elektrons betrifft, kann es wie der Spin nur zwei Orientierungen im Feld annehmen, und sein Zahlenwert ist gleich einem Bohrschen Magneton.

Gehen wir nun zur Erklärung der Versuchsergebnisse über, die mit Atombündeln erhalten wurden. Wir wollen zeigen, wie leicht sich mit Hilfe des Spinbegriffs alle Besonderheiten der Aufspaltung von Atombündeln erklären lassen.

In der Tat, wie könnte man erklären, daß Bündel von Helium- und Berylliumatomen nicht aufgespalten werden? Sehr einfach, die Elektronen dieser Atome besitzen kein Bahnmoment, weil sie zu den  $s$ -Elektronen gehören. Was die Elektronenspins betrifft, so weisen sie entgegengesetzte Richtungen auf. Im Grunde genommen läßt sich diese Feststellung nicht ableiten, obwohl sie intuitiv durchaus natürlich erscheint. Das Prinzip, wonach sich ein Elektronenpaar im Atom so „einrichtet“, daß die Spins der beiden Elektronen gegenläufig sind, ist das sogenannte Pauli-Prinzip (nach Wolfgang Pauli, 1900—1958).

Unzählige Hypothesen! Gewiß, ihre Zahl ist nicht klein. Doch alle zusammengenommen bilden das eindrucksvolle Gebäude der Quantenphysik, aus der sich so viele Folgerungen herleiten lassen, daß kein Zweifel an der Feststellung übrigbleibt, daß man dem Elektron

einen Spin zuordnen muß, daß der Wert des Spins gleich  $1/2 h/2\pi$  sein muß und daß die Spins von Elektronenpaaren dem Pauli-Prinzip gehorchen müssen. Kein einziger Physiker hat auch nur noch den Schatten eines Zweifels. Die Summe dieser Hypothesen widerspiegelt die Struktur der Mikrowelt.

Kehren wir zu unseren Atombündeln zurück. Wir haben erklärt, warum sich Bündel von Helium- und Berylliumatomen nicht aufspalten.

Wie aber verhalten sich Wasserstoff und Lithium?

Der Wasserstoff besitzt ein Elektron. Sein Bahnmoment ist gleich Null, weil es sich dabei um ein s-Elektron handelt. Die Projektion des Elektronenspins kann nur zwei Werte annehmen: plus  $1/2$  und minus  $1/2$ , d. h., der Spin kann sich gleich- oder gegensinnig zum Magnetfeld einstellen. Das ist der Grund, warum sich ein Strom derartiger Atome in zwei Komponenten aufspaltet. Das gleiche geschieht auch mit den Lithiumatomen, weil zwei Elektronen ihre Spins „kompensieren“, während sich das dritte Elektron genauso wie das einzige Elektron am Wasserstoffatom verhält.

Das gleiche Verhalten zeigen auch die Atome anderer Elemente, die in der äußersten Schale ein ungepaartes Elektron enthalten.

Ich müßte hier noch einige weitere Sätze ohne Beweis anführen, die durch die Quantenphysik bewiesen werden, um für die Atome anderer Elemente ihre Aufspaltung in eine große Anzahl von Komponenten zu erklären. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß nur s-Elektronen kein Bahnmoment besitzen und daß sich der Spin eines Elektrons nur in dem Fall bemerkbar macht, wo sich ein Elektron allein auf seinem Energieniveau befindet, waren die Physiker imstande, das Verhalten von Atombündeln aller Art vollständig zu erklären. Beim Studium dieses außerordentlich interessanten Kapitels der Physik gelangt auch der größte Skeptiker zu der Über-

zeugung, daß alle unbewiesenen Annahmen, die in der Quantenphysik gelten, allgemeingültige Naturgesetze sind.

Ich fürchte, vielen meiner Leser werden diese Sätze nicht genügen. Gewiß, die Versuche zur Ablenkung von Atombündeln im inhomogenen Magnetfeld allein sind unzureichend, um einen so seltsamen Begriff wie den Spin einzuführen. Leider ist der Umfang unseres Buchs zu klein, als daß ich jene ungeheure Vielzahl von Fakten anführen könnte, die die Anerkennung der „Bürgerrechte des Spins“ fordern.

Welche Bedeutung hat allein die Erscheinung der magnetischen Resonanz, die mit unserem bisherigen Bericht nichts gemeinsam hat! Funkwellen im Zentimeterbereich werden vom Stoff absorbiert, wenn sie den Spin umkehren müssen. Die Wechselwirkungsenergie des magnetischen Moments eines Elektrons im konstanten Magnetfeld, in das bei Experimenten zur magnetischen Resonanz Stoff eingebracht wird, und damit auch die Differenz zweier Energien (bei paralleler und antiparalleler Anordnung) lassen sich ohne Mühe berechnen. Diese Differenz ist gleich einem Quant der absorbierten elektromagnetischen Welle. Mit größter Genauigkeit läßt sich der Wert für die Frequenz experimentell bestimmen, und wir können uns von der absoluten Übereinstimmung dieses Werts mit dem Wert überzeugen, den wir bei Kenntnis der Induktion des Feldes und des magnetischen Moments des Elektrons errechnen.

Diese Erscheinung liegt einem großen Wissensgebiet, der Lehre von der Elektronenresonanz, zugrunde. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die gleichen Ereignisse, nur natürlich in einem anderen Wellenlängenbereich, auch bei Atomkernen beobachtet werden. Die magnetische Kernresonanz ist eins der wichtigsten Verfahren zur Ermittlung des chemischen Aufbaus von Stoffen.

Bevor wir weitergehen, wollen wir eine Zusammenfassung aller Tatsachen vornehmen, die Systeme betreffen,

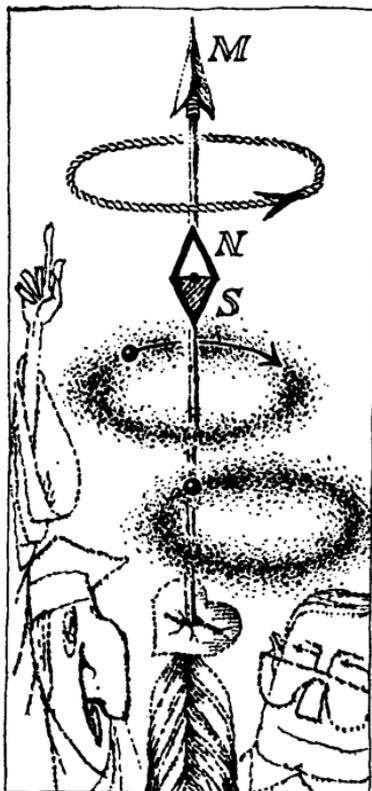


Bild 3.6.

welche magnetische Felder erzeugen bzw. auf die Gegenwart eines magnetischen Feldes reagieren.

Es sei nochmals unterstrichen, daß Ampères Hypothese nur teilweise richtig war: Magnetische Felder werden nicht nur von bewegten elektrischen Ladungen erzeugt. Eine andere Ursache des Magnetfeldes sind Elementarteilchen und hier in erster Linie Elektronen, die ein eigenes magnetisches Moment besitzen. Die technische Klassifikation der Wechselwirkungen, wie wir sie auf S. 120 angeführt haben, erweist sich als unvollkommen. Magnetfelder werden von natürlichen und künstlichen Magneten,

von elektrischen Strömen (darunter auch Strömen elektrisch geladener Partikeln im Vakuum) sowie von Elementarteilchen erzeugt. Die gleichen Systeme und Partikeln unterliegen auch der Wirkung des Magnetfeldes.

Die wichtigste Größe, die das Magnetfeld und seine Wirkungen kennzeichnet, ist der Vektor des magnetischen Moments. Im Fall von Strömen wird dieser Vektor durch die Form des Stromkreises definiert. Das Moment einer Magnetnadel ist auf komplizierte Weise mit der atomaren Struktur des Stoffs verknüpft, läßt sich jedoch leicht messen. Elektronen, die sich im Feld des Atomkerns bewegen, besitzen ein magnetisches „Bahn“moment, als würde (beachten Sie bitte den Konjunktiv!) ihr Umlauf um den Kern einen elektrischen Strom erzeugen. Und schließlich ist das eigene magnetische Moment eine der primären Eigenschaften, die Elementarteilchen auszeichnen.

Zur besseren Einprägung dieser grundsätzlichen Angaben schauen Sie sich Bild 3.6. an. Es ist die Zusammenfassung unseres heutigen Kenntnisstandes über die „magnetische Seele“ oder auch das „magnetische Herz“. Auf französisch heißt Magnet aimant (nach dem Verb aimer, lieben). Das Bild unterstreicht, daß der makroskopische Strom, ein Stabmagnet, die Bahnbewegung eines Elektrons und das Elektron selbst durch einen physikalischen Begriff gekennzeichnet werden.

### Die elektromagnetische Induktion

Das Experiment zeigt, daß ein Elektronenbündel bei Bewegung im magnetischen Feld aus seiner geradlinig verlaufenden Bahn abgelenkt wird. Wie auf S. 123 gesagt wurde, steht diese Kraft (Lorentz-Kraft) senkrecht auf den magnetischen Kraftlinien und dem Geschwindigkeitsvektor der Elektronen. Ihr Betrag wird durch die Formel  $F = evB$  angegeben. Diese einfachste Formel für die

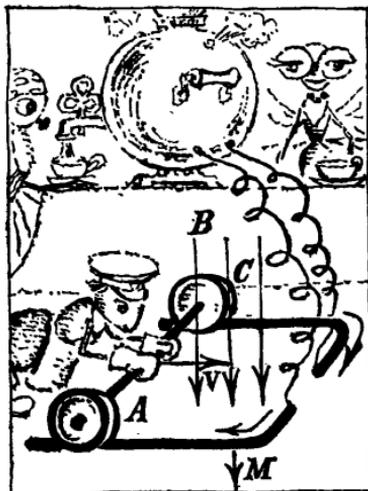


Bild 3.7.

Lorentz-Kraft gilt, wenn der Geschwindigkeitsvektor der Elektronen und die Richtung des Magnetfeldes einen rechten Winkel bilden.

Berücksichtigt man, daß in einem metallischen Leiter freie Elektronen vorhanden sind, so gelangt man zu dem Schluß, daß bei bestimmten Bewegungen von Leitern im Magnetfeld in diesen Leitern ein elektrischer Strom entstehen muß.

Diese Erscheinung, die der gesamten modernen Technik zugrunde liegt, heißt elektromagnetische Induktion. Leiten wir das entsprechende Gesetz ab.

In Bild 3.7. ist ein Leiterkreis dargestellt, der aus dem Stab  $AC$  (mit der Länge  $l$ ) besteht, auf zwei Metalldrähten rollt und sich zwischen den Polen eines Magneten bewegen kann, ohne den Leiterkreis zu unterbrechen. Bewegt sich der Stab senkrecht zu den Kraftlinien, dann greift an den im Leiter befindlichen Elektronen eine Kraft an, und im Leiterkreis beginnt ein elektrischer Strom zu fließen.

So gelangen wir zu einer außerordentlich wichtigen Feststellung: In einem geschlossenen Leiter kann auch dann ein elektrischer Strom entstehen, wenn der Leiterkreis weder einen Akkumulator noch eine andere Stromquelle enthält.

Lassen Sie uns nun die EMK berechnen, d. h. die Kraft, die erforderlich ist, um eine Elementarladung durch den geschlossenen Leiterkreis fließen zu lassen. Die Arbeit ist gleich dem Produkt aus Kraft mal Weg. Sie wird nur auf dem Abschnitt verrichtet, der sich im Feld bewegt. Die Länge des Wegs ist gleich  $l$  und die Kraft je Ladungseinheit gleich  $vB$ .

Man bezeichnet die entstehende elektromotorische Kraft als Induktions-EMK. Ihr Wert ergibt sich aus der Formel

$$E_{\text{ind}} = vBl.$$

Es wäre wünschenswert, diese Formel so zu verallgemeinern, daß sie für jede Bewegung beliebiger Leiterkreise anwendbar ist. Diese Verallgemeinerung können wir wie folgt vornehmen: Hat der Leiterstab während der Zeit  $t$  die Strecke  $x$  zurückgelegt, so betrug die Geschwindigkeit  $v$  in diesem Fall  $x/t$ . Die Fläche des Leiterkreises nahm dabei um den Betrag  $S = xl$  ab. Die Formel für die Induktions-EMK erhält dann die Form

$$E_{\text{ind.}} = \frac{BS}{t}.$$

Welchen Sinn hat jedoch der Zähler in dieser Formel? Die Antwort liegt auf der Hand.  $BS$  ist der Betrag, um den sich der magnetische Fluß, d. h. die Anzahl der Kraftlinien, die den Leiterkreis durchdringen, vermindert hat.

Natürlich haben wir unseren Beweis für einen sehr einfachen Fall erbracht. Ich muß meine Leser bitten, mir „aufs Wort“ zu glauben, daß sich dieser Beweis auch für jedes andere Beispiel mit völliger Strenge führen

läßt. Die erhaltene Formel ist absolut allgemeingültig, und das Gesetz der elektromagnetischen Induktion läßt sich wie folgt formulieren: Eine Induktions-EMK tritt immer dann auf, wenn sich die Zahl der Kraftlinien ändert, die den Stromkreis durchdringen. Dabei entspricht die Induktions-EMK zahlenmäßig der Änderung des magnetischen Flusses in der Zeiteinheit.

Es gibt auch Lageänderungen des Stromkreises im Magnetfeld, bei denen kein Strom entsteht. Es fließt kein Strom, wenn sich der Stromkreis in einem homogenen Feld parallel zu den Kraftlinien bewegt. Dreht man den Stromkreis dagegen im homogenen Magnetfeld, so entsteht ein Strom, auch dann, wenn man die Entfernung zwischen dem Stromkreis und dem Pol eines Stabmagneten verringert oder vergrößert.

Das Experiment zeigt jedoch, daß unsere Verallgemeinerung noch weitergeht. Vorläufig war nur die Rede von Fällen, in denen der Stromkreis und die Quelle des Magnetfeldes ihre wechselseitige Lage änderten. Die zuletzt abgeleitete Formel sagt nichts über Bewegungen aus. Es geht nur um Änderungen des magnetischen Flusses. Doch eine Änderung des magnetischen Flusses, der den Leiterkreis durchdringt, erfordert nicht unbedingt eine Lageänderung.

In der Tat kann man als Quelle des Magnetfeldes statt eines Permanentmagneten auch einen Stromkreis oder, noch besser, eine Spule nehmen, durch die man Strom aus einer beliebigen anderen Stromquelle fließen läßt. Mit Hilfe eines Regelwiderstandes oder auf beliebige andere Weise ändert man nun die Stromstärke in dieser Primärspule, die die Quelle des magnetischen Feldes ist. Nun ändert sich der magnetische Fluß, der den Leiterkreis durchdringt, bei unveränderter Lage der Quelle des Magnetfeldes und des Leiterkreises. (Bild 3.8.)

Gilt unsere Verallgemeinerung auch in diesem Fall? Das Experiment führt zu einer positiven Antwort. Auf

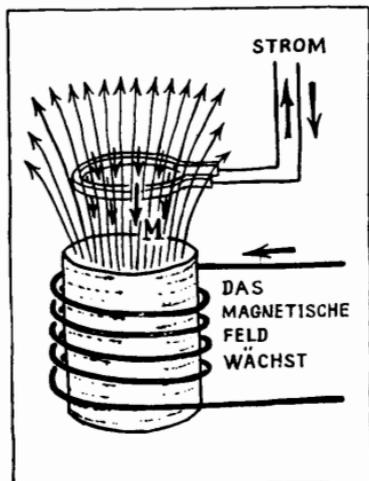


Bild 3.8.

welche Weise man die Anzahl der Kraftlinien auch ändert, die eben abgeleitete Formel für die EMK bleibt in Kraft.

### Die Richtung des Induktionsstroms

Wir werden sogleich zeigen, daß eine einfache und universell gültige Regel existiert, nach der sich die Richtungen induzierter Ströme ermitteln lassen. Wir betrachten zunächst einige Beispiele, um daraus einen allgemeingültigen Schluß zu ziehen.

Wir sehen uns noch einmal Bild 3.7. an und beachten folgendes: Bei Verringerung der Fläche des Stromkreises nimmt der magnetische Fluß, der diesen Stromkreis durchdringt, ab. Die im Bild gezeigte Stromrichtung ist so angegeben, daß das magnetische Moment des entstehenden Stroms in die Richtung der Kraftlinien zeigt. Das bedeutet aber, daß das eigene Feld des induzierten Stroms so ausgerichtet ist, daß es die Verminderung des magnetischen Feldes „behindert“.

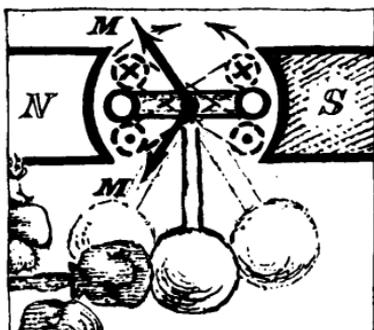


Bild 3.9.

Zum gleichen Schluß gelangen wir auch im umgekehrten Fall. Wird die Fläche des Stromkreises größer, nimmt auch der Fluß, der den Stromkreis durchdringt, zu. Doch das magnetische Moment des Stromkreises hat jetzt relativ zu den Kraftlinien eine gegensinnige Richtung, d. h. also, daß das Feld des entstandenen Induktionsstroms wiederum jene Wirkung beeinträchtigt, durch die es selbst hervorgerufen worden ist.

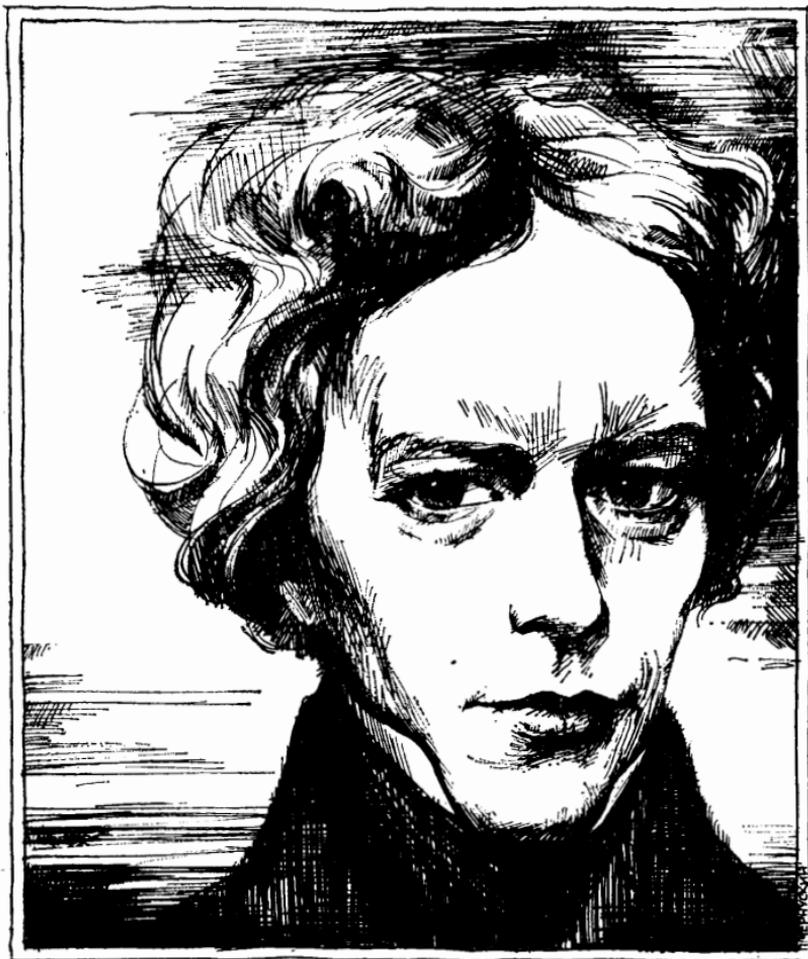
Noch ein Beispiel: Wir wollen annehmen, ein Stromkreis sei zwischen den beiden Polen eines Magneten so angeordnet, daß der magnetische Fluß, der ihn durchdringt, gleich Null ist. Nun drehen wir den Stromkreis einmal im Uhrzeigersinn und einmal im Gegenuhrzeigersinn. Beide Fälle sind in Bild 3.9. dargestellt. Durch eine ausgezogene Linie ist die Projektion des Stromkreises im Anfangszustand dargestellt, während die Strichlinie die Projektionen des Stromkreises nach erfolgter Drehbewegung zeigt, also dann, wenn ein elektrischer Strom entstanden ist. Mit Hilfe der Linken-Hand-Regel ermitteln wir die Richtung der in beiden Fällen entstandenen Induktionsströme. In unserem Bild ist der Nordpol links eingezeichnet. Bei Drehung im Uhrzeigersinn zeigt das magnetische Moment des induzierten Stroms deshalb nach unten und bei Drehung im Gegenuhrzeiger-

sinn nach oben. In dem Maße, wie der Drehwinkel zunimmt, vermindert das eigene Magnetfeld der Stromkreise dasjenige Feld immer stärker, das die Ursache der Induktion ist. Wir sehen, daß auch hier wieder die gleiche Regel zutrifft.

Nun schauen wir uns einmal an, wie sich Stromkreise in inhomogenen Feldern verhalten. Wir setzen voraus, die Stromstärke des Elektromagneten wäre konstant, und sind gespannt, was bei einer Lageänderung des Stromkreises passiert. Nähert man den Stromkreis dem Nordpol, dann ist die Richtung des Magnetmoments der Richtung der Kraftlinien entgegengesetzt. Würde sich der Stromkreis vom Nordpol entfernen, dann würde das eigene Feld des induzierten Stroms das Feld verstärken. Man kann dieses Verhalten unter Anwendung der Linken-Hand-Regel beweisen.

Wie aber liegen die Dinge bei Magnetfeldern, die von Wechselströmen erzeugt werden? Eine Vergrößerung oder Verkleinerung der Stromstärke in der Primärspule hat eine Änderung des Flusses zur Folge. Im Stromkreis (Bild 3.8.) entsteht eine EMK.

Aber wie ist die Stromrichtung zu ermitteln? Die Linke-Hand-Regel läßt sich nicht mehr benutzen, da keine Bewegung vorliegt. Aber gerade hier kommt uns unsere Verallgemeinerung zugute. Es zeigt sich nämlich, daß die Richtung des Induktionsstroms, der infolge Zu- oder Abnahme der Anzahl von Kraftlinien, die den Stromkreis durchdringen, auch in diesem Fall der Regel gehorcht, wonach der induzierte Strom stets ein Feld erzeugt, das gewissermaßen „bemüht“ ist, die Änderung des Magnetfeldes auszugleichen, das die Ursache der Induktion ist.



**Michael Faraday (1791—1867)** — bedeutender englischer Physiker. Er entdeckte die elektromagnetische Induktion (1831). Diese Entdeckung gelang Faraday nicht zufällig, sondern war das Ergebnis zielstrebigem Forschens. Die Gesetze der elektromagnetischen Induktion wurden zur Grundlage der Elektrotechnik. Auch die Bedeutung der von Faraday entdeckten Gesetze der Elektrolyse ist nicht hoch genug einzuschätzen. Heute so alltäglich

### Zur Entdeckungsgeschichte des Gesetzes der elektromagnetischen Induktion

Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion gehört zu jenen Ereignissen, die man an der Hand abzählen kann und die entscheidenden Einfluß auf den Fortschritt der Menschheit hatten. Es wäre daher unverzeihlich, wollten wir hier nicht auch die Entdeckungsgeschichte der elektromagnetischen Induktion zu Wort kommen lassen. Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion erfolgte lange, bevor man das Verhalten des Elektronenstrahls im Magnetfeld untersucht hatte, und der historische Ablauf der Ereignisse stimmt absolut nicht mit der Darstellung überein, die wir im vorangegangenen Abschnitt gewählt haben: Logik und Konsequenz des Denkens müssen keineswegs parallel zum historischen Gang der Ereignisse verlaufen.

Zu dem Zeitpunkt, als Faraday Versuche durchführte, die schließlich zur Entdeckung der elektromagnetischen Induktion führten, befand sich die Lehre von den elektrischen und magnetischen Feldern in folgender Situation:

Die Erzeugung von Gleichstrom und die Gesetzmäßigkeiten seines Verhaltens in Stromkreisen waren für die Physiker bereits kein schwieriges Problem mehr. Die Wirkung des Stroms auf einen permanenten Magneten und die Wechselwirkung von Strömen untereinander waren

---

erscheinende Termini wie Anode, Katode, Anion, Kation, Ion und Elektrolyt wurden von diesem bedeutenden Gelehrten geprägt. Faraday wies nach, daß elektrische Wechselwirkungen vom Medium, in dem sie anlaufen, beeinflußt werden. Nicht unerwähnt bleiben darf die Entdeckung der magnetischen Drehung der Polarisations ebene. Faraday fand auch, daß sämtliche Körper paramagnetisch oder diamagnetisch sind. Nie gab es einen bedeutenderen Experimentalphysiker als Michael Faraday.

bereits bekannt. Es war auch bekannt, daß der Gleichstrom in seiner Umgebung ein Magnetfeld erzeugt, das sich sowohl mit Hilfe eines Magneten als auch mit Hilfe eines anderen Stroms messen läßt. Sollte nicht vielleicht auch die umgekehrte Erscheinung existieren? Könnte ein Magnetfeld nicht möglicherweise in einem Leiter Strom erzeugen?

1821 macht Faraday in seinem Tagebuch folgende Eintragung: „Umwandlung von Magnetismus in Elektrizität“. Zehn Jahre benötigte der große Gelehrte, um zum Erfolg zu gelangen. Seine mehrjährigen Mißerfolge erklären sich aus seinem Versuch, einen Stromfluß zu erzielen, indem er einen Leiter in ein konstantes Feld brachte. 1831 wurden die hartnäckigen Bemühungen des Wissenschaftlers von Erfolg gekrönt. Das im Anschluß hieran abgedruckte Zitat aus Faradays 1831 veröffentlichter Arbeit ist die erste Beschreibung der entdeckten Erscheinung.

„Auf eine breite Holzspule wurde Kupferdraht von 203 foot Länge gewickelt, zwischen den Windungen dieses Kupferdrahts lagen Windungen eines Kupferdrahts der gleichen Länge, der jedoch durch eine Baumwollumspinnung gegen jenen isoliert war. Eine dieser Spiralen war mit einem Galvanometer, die andere mit einer starken Batterie verbunden ... Wurde der Stromkreis geschlossen, so konnte man eine plötzliche, aber recht schwache Wirkung am Galvanometer erkennen, und das gleiche war auch bei der Unterbrechung des Stroms festzustellen. Solange der Strom ununterbrochen durch eine der Spiralen floß, war weder eine Wirkung auf das Galvanometer noch überhaupt irgendeine Wirkung auf die andere Spirale zu erkennen, ungeachtet der Tatsache, daß die Erhitzung der ganzen, mit der Batterie verbundenen Spirale und die Helligkeit des zwischen den Polen überspringenden Funkens die Stärke der Batterie bezeugten.“

Die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion

durch Faraday war die erste Etappe einer zwanzig Jahre dauernden Arbeit mit dem Ziel, eine Verbindung zwischen allen elektrischen und magnetischen Erscheinungen herzustellen.

Im Zusammenhang mit der elektromagnetischen Induktion sollen auch die Namen anderer hervorragender Physiker nicht unerwähnt bleiben. Der Engländer Joseph Henry (1797—1878) entdeckte die Selbstinduktion. Wenn sich der Strom, der durch eine Spule fließt, ändert, dann ändert sich das durch diesen Strom erzeugte Magnetfeld; es ändert sich auch der Fluß des Magnetfeldes, das eben diese Spule durchdringt, und im „eigenen“ Stromkreis wird eine EMK induziert.

Wer aber entdeckte die „Vorschriften“, nach denen sich die Richtung der Induktions-EMK regelt? Die vollständigste Antwort auf diese Frage kann man in den Arbeiten von Lentz finden. Die Lentzsche Regel definiert die Richtung des Induktionsstroms. „Wenn sich ein metallischer Leiter in der Nähe eines Stroms oder eines Magneten bewegt, so entsteht in ihm ein galvanischer Strom. Die Richtung dieses Stroms ist so beschaffen, daß ein ruhender Leiter durch den Strom in eine Bewegung versetzt würde, die der tatsächlichen Bewegung genau entgegengesetzt ist. Es wird angenommen, daß sich der Leiter in Richtung der tatsächlichen Bewegung oder gerade in der umgekehrten Richtung bewegen kann.“

Nach 1840 entsteht Schritt für Schritt das einheitliche Bild des Elektromagnetismus. Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen bildete den letzten und wohl leuchtkräftigsten Farbtupfer auf diesem Bild.

### **Induzierte Wirbelströme**

Wenn induzierte Ströme in drahtförmigen Leitern entstehen können, so können sie auch in massiven, durchgängigen Metallbrocken auftreten. Jeder Metallbrocken enthält

freie Elektronen. Bewegt sich das Metall in einem konstanten Magnetfeld, dann sind seine freien Elektronen der Wirkung der Lorentz-Kraft ausgesetzt. Die Elektronen beschreiben Kreisbahnen, d. h. bilden Wirbelströme. Diese Erscheinung entdeckte 1855 der französische Physiker Léon Foucault (1810—1868).

Ob sich der magnetische Fluß infolge einer Relativbewegung von Metall und der Quelle des Feldes ändert, oder ob diese Änderung des Magnetfeldes ihre Ursache in einer Änderung jenes elektrischen Stroms hat, der das Feld erzeugt — die Gesetze der elektromagnetischen Induktion gelten in jedem Fall gleichermaßen. Deshalb machen sich die Foucaultschen Ströme nicht nur dort bemerkbar, wo eine Relativbewegung stattfindet, sondern auch dann, wenn sich das Magnetfeld in der Zeit verändert. Der eindrucksvollste Versuch besteht darin, daß man eine Münze zwischen den Polen eines starken Magneten fallen läßt; sie fällt dabei nicht mit gewöhnlicher Beschleunigung, sondern wie in dickflüssigem Öl. Der Sinn dieses Versuchs liegt auf der Hand. In der Münze entstehen Foucaultsche Ströme, deren Richtung entsprechend der Lenzschen Regel so beschaffen ist, daß die Wechselwirkung der Ströme mit dem primären magnetischen Feld jene Bewegung bremst, die ihrerseits die Induktion verursacht hat.

Von den Nutzenwendungen der Foucaultschen Ströme sollen hier drei genannt werden. Zum einen werden Foucaultsche Ströme in sogenannten Induktionsöfen verwendet, um Metalle stark aufzuheizen bzw. zu schmelzen, zum anderen wirken sie in vielen Meßwerken als sogenannte Wirbelstromdämpfung zur Beruhigung von Zeigerschwingungen. Eine dritte scharfsinnige „Erfindung“ ist der „Stromzähler“. Wie Sie sicher schon gesehen haben, hat dieser als wichtigstes Bauteil eine rotierende Scheibe. Je mehr Glühlampen oder Kochplatten Sie eingeschaltet haben, um so rascher rotiert die Scheibe.

Das Funktionsprinzip des Zählers besteht darin, daß zwei Ströme erzeugt werden. Der eine fließt in einem parallel zur Last geschalteten Kreis, der andere dagegen im Laststromkreis. Beide Ströme fließen durch zwei Spulen, die auf Eisenkernen sitzen; man bezeichnet sie auch als „Voltspule“ bzw. „Amperespule“. Der Wechselstrom bewirkt die Magnetisierung der Eisenkerne. Da es sich um einen Wechselstrom handelt, wechseln die Pole von Elektromagneten ständig ihre Lage. Zwischen ihnen „läuft“ gewissermaßen das magnetische Feld. Die Spulen werden so angeordnet, daß das von beiden Spulen erzeugte „laufende“ magnetische Feld im Körper der Scheibe Wirbelströme erzeugt. Die Richtung dieser Wirbelströme ist dabei von der Art, daß das „laufende“ magnetische Feld die Scheibe „mitzieht“.

Die Rotationsgeschwindigkeit hängt von der Stromstärke in beiden Spulen ab. Wie man durch exakte Berechnung nachweisen kann, ist die Rotationsgeschwindigkeit dem Produkt aus Stromstärke, Spannung sowie dem Kosinus der Phasenverschiebung proportional, mit anderen Worten, der Leistungsaufnahme. Auf eine Beschreibung der einfachen mechanischen Verfahren, mit deren Hilfe man die rotierende Scheibe mit der numerischen Anzeigevorrichtung koppelt, sei hier verzichtet.

In den meisten Fällen freilich ist man bemüht, die Foucaultschen Ströme zu vermeiden, unter anderem müssen sich die Konstrukteure aller möglichen elektrischen Maschinen darum kümmern, denn wie andere Ströme auch, verbrauchen Wirbelströme Energie. Die entstehenden Energieverluste können dabei so beträchtlich sein, daß man zu allen möglichen Kunstgriffen Zuflucht nehmen muß. Das einfachste Verfahren zur Bekämpfung der Foucaultschen Ströme besteht darin, massive durchgängige Metallstücke in elektrischen Maschinen durch Bleche zu ersetzen. Die Wirbelströme können sich dann nicht „breitmachen“, und ihre Stärke nimmt

erheblich ab. Dadurch sinken die Wärmeverluste erheblich.

Sie haben schon bemerkt, daß Transformatoren sich erhitzen. Die Erwärmung von Transformatoren hat zur Hälfte ihre Ursache in Wirbelströmen.

### Der Induktionsstoß

Unter Ausnutzung der elektromagnetischen Induktion lassen sich ausgezeichnete Verfahren zur Messung des magnetischen Feldes entwickeln. Wir haben bisher gesagt, man könne dafür eine Magnetnadel oder eine Leiterschleife nehmen, die von einem konstanten elektrischen Strom bekannter Stärke durchflossen wird. Die magnetische Induktion ergab sich dann aus dem Kraftmoment, das am Leiterkreis bzw. an der Magnetnadel angriff, deren magnetisches Moment gleich Eins gesetzt wurde.

Wir wollen nun anders verfahren. Wir schließen eine winzige Leiterschleife an ein Meßgerät an. Zunächst stellen wir die Schleife so ein, daß die Kraftlinien senkrecht dazu verlaufen; dann drehen wir sie rasch um  $90^\circ$ . Während des Schwenkvorgangs wird die Schleife von einem Induktionsstrom durchflossen; dabei handelt es sich um eine wohldefinierte Elektrizitätsmenge  $Q$ , die man messen kann. Welche Verbindung besteht nun zwischen dieser Elektrizitätsmenge und der Feldstärke an dem Punkt, wo wir die Leiterschleife angebracht haben?

Die Berechnung ist nicht allzu kompliziert. Die Stromstärke  $I$  ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz als Quotient der Induktions-EMK, dividiert durch den Widerstand, d. h.,

$$I = \frac{1}{R} E_{\text{ind.}}$$

Substituiert man  $E_{\text{ind}}$  durch  $BS/t$  und berücksichtigt weiterhin, daß  $Q = It$  ist, dann erhält man für die

magnetische Induktion

$$B = \frac{E_{\text{ind.}} \cdot t}{S} = \frac{ItR}{S} = \frac{QR}{S}.$$

Natürlich gilt diese Formel — und das sei nochmals wiederholt — nur für den Fall, daß die Leiterschleife in ihrer Endstellung nicht von Kraftlinien durchdrungen wird, während sie in der Anfangsstellung senkrecht auf dem Windungsquerschnitt auftreffen. Dabei ist es völlig gleichgültig, welches die End- bzw. Anfangsstellung der Leiterschleife ist. Wenn wir beide miteinander vertauschen, so ändert sich nur die Stromrichtung, nicht jedoch die Elektrizitätsmenge, die den Kreis durchfließt.

Die Empfindlichkeit dieses Meßverfahrens steigt um den Faktor  $n$ , wenn man statt einer einzelnen Windung eine Spule mit  $n$  Windungen nimmt. Die Elektrizitätsmenge ist der Windungszahl  $n$  proportional. Gute Experimentatoren schaffen es, winzige Spulen von nur einem Millimeter Größe anzufertigen. Das Feld läßt sich also nach diesem Verfahren detailliert abtasten.

Die größte Bedeutung hat das hier geschilderte Verfahren jedoch für die Messung der magnetischen Permeabilität von Körpern aus Eisen. Über diese wichtige Eigenschaft des Eisens wollen wir uns jetzt unterhalten.

### Die magnetische Suszeptibilität von Eisen

Wie wir im vorangegangenen Kapitel feststellten, haben Atome magnetische Eigenschaften. Einzelelektronen besitzen ein magnetisches Moment, und infolge der Bewegungen von Elektronen um den Atomkern werden magnetische Bahnmomente erzeugt. Atomkerne haben ebenfalls magnetische Momente. Deshalb muß das Einbringen von Körpern in ein Magnetfeld Einfluß auf die Gestalt des Feldes haben, und umgekehrt muß sich das Vor-

handensein eines Magnetfeldes in dem einen oder anderen Maße auf das Verhalten fester, flüssiger bzw. gasförmiger Stoffe auswirken.

Hervorstechende magnetische Eigenschaften haben Eisen, bestimmte Eisenlegierungen sowie einige dem Eisen verwandte Stoffe. Diese kleine Stoffklasse wird unter der Bezeichnung Ferromagnetika zusammengefaßt. Man kann z. B. folgenden Versuch anstellen: Kleine Stäbe von Streichholzgröße werden an dünnen Fäden aufgehängt. Anschließend bringt man einen Magneten in ihre Nähe. Aus welchen Stoffen diese Proben auch immer sind — sei es Holz, Glas, Plast, Kupfer, Aluminium usw. —, die Heranführung eines Magneten an kleine Stäbe vermag uns keinen Aufschluß über deren magnetische Eigenschaften zu geben. Um das Vorhandensein magnetischer Eigenschaften nachzuweisen, müssen genaue und sorgfältige Experimente durchgeführt werden, von denen gleich die Rede sein soll.

Kleine Eisenpartikeln verhalten sich dagegen ganz anders. Sie folgen gehorsam jedem noch so schwachen Stabmagneten.

Damit Sie eine Vorstellung haben, wie empfindlich Eisenpartikeln auf die Anwesenheit eines magnetischen Feldes reagieren, will ich Ihnen eine in jeder Beziehung lehrreiche Geschichte erzählen, deren Hauptperson ich selbst gewesen bin.

Es ist schon einige Jahre her, als man mich bat, meine Aufmerksamkeit den Versuchen eines tschechischen „Zauberers“ zu widmen, der Weltruhm erlangt hatte und von sensationslüsternen amerikanischen Reportern der „tschechische Merlin“ getauft worden war. Dieser Zauberkünstler hatte einige Dutzend Versuche in seinem Repertoire, für die es angeblich keine rationale Erklärung gab. Der „tschechische Merlin“ schrieb die im Verlauf dieser Versuche erzielten Ergebnisse seiner eigenen hypnotischen Kraft zu.

Eine seiner Glanznummern bestand im Magnetisieren eines Streichholzes. Dabei zeigte er zunächst, daß ein an einem Faden aufgehängtes Streichholz durch einen Magneten nicht abgelenkt wird. Danach begann er unter geheimnisvollen Gebärden das Streichholz zu „hypnotisieren“. Ein stets wiederkehrendes Element dieses Hokuspokus bestand in der Berührung des Streichholzes mit einem metallischen „Idol“, das, wie Merlin erklärte, den Empfänger für eine psychische Energie darstellte.

Ein paar Wochen genügten, und ich konnte zeigen, daß ausnahmslos alle Versuche des Zauberkünstlers eine rationale Erklärung haben. Aber wie gelang es ihm, ein Streichholz zu magnetisieren? Wie konnte er erreichen, daß das Streichholz nach all dem geheimnisvollen Brimborium plötzlich gehorsam dem Magneten folgte?

Folgendes stellte sich heraus: Bei der Berührung mit dem metallischen „Idol“ wurde eine verschwindend geringe Menge von Eisenstaub auf das betreffende Ende des Streichholzes übertragen. Ich zeigte, daß ein dreißigmillionstel Gramm Eisen genügt, um dem Streichholz merkliche magnetische Eigenschaften zu verleihen. Sie haben es hier mit einem „Küchenschabenversuch“ zu tun.

Das Beispiel zeigt recht eindrucksvoll, daß man erstens nie an „Wunder“ glauben sollte und daß zweitens — und das ist es, was uns jetzt interessiert — Eisen außerordentliche magnetische Eigenschaften besitzt.

Der klassische Versuch, mit dessen Hilfe man die magnetischen Eigenschaften von Eisen charakterisiert, wird wie folgt durchgeführt: Man baut einen Stromkreis auf, der aus zwei übereinandergesteckten Spulen besteht. Die Primärspule ist mit einem Akkumulator verbunden, die Sekundärspule dagegen an ein Gerät angeschlossen, das die Elektrizitätsmenge mißt. Schließt man den Primärstromkreis, dann ändert sich der magnetische Fluß, der die Sekundärspule durchdringt, von Null auf einen bestimmten Grenzwert  $\Phi_0$ . Der magnetische Fluß kann

nach dem Stoßinduktionsverfahren mit großer Genauigkeit gemessen werden.

Mit Hilfe der hier beschriebenen Einrichtung untersucht man nun die magnetischen Eigenschaften von Stoffen. Man fertigt aus den zu untersuchenden Stoffen Stäbe, die in die Spule eingeführt werden. Danach vergleicht man die Meßergebnisse, die mit bzw. ohne Stab erhalten werden. Besteht der Stab aus Eisen oder anderen ferromagnetischen Stoffen, so steigt die gemessene Elektrizitätsmenge auf das Mehrtausendfache.

Als Parameter der magnetischen Eigenschaften eines Werkstoffs kann man das Verhältnis der magnetischen Flüsse wählen, die mit bzw. ohne Stab gemessen wurden. Dieses Verhältnis  $\mu = \Phi/\Phi_0$  heißt magnetische Suszeptibilität des betreffenden Stoffs.

Ein Körper aus Eisen vergrößert also den Kraftlinienfluß sprunghaft. Dafür gibt es nur eine einzige Erklärung: Der Eisenkörper selbst muß das Magnetfeld des elektrischen Stroms in der Primärspule durch sein eigenes Magnetfeld vergrößern.

Die Differenz  $\Phi - \Phi_0$  wird gewöhnlich mit dem Buchstaben  $J$  bezeichnet. Also ist  $J = (\mu - 1) \Phi_0$  der zusätzliche magnetische Fluß, der von dem betreffenden Stoff erzeugt wird.

Nachdem wir den Versuch zur Messung der magnetischen Suszeptibilität abgeschlossen und den Stab aus der Spule herausgenommen haben, stellen wir fest, daß der Eisenstab eine Magnetisierung besitzt. Sie ist kleiner als  $J$ , aber trotzdem beträchtlich.

Man kann den Restmagnetismus des Eisenstabs beseitigen. Dazu braucht man ihn nur erneut in unser Gerät einzuführen, aber diesmal so, daß das eigene Feld des Metalls und das Feld des elektrischen Stroms der Primärspule unterschiedliche Richtung haben. Es gelingt stets, einen Primärstrom so zu wählen, daß man mit Hilfe eines Induktionsstoßes in umgekehrter Richtung die

magnetischen Eigenschaften des Eisens beseitigen und dieses in seinen Ausgangszustand zurückführen kann. Aus historischen Gründen, auf die wir hier nicht eingehen wollen, wird die Stärke des Entmagnetisierungsfeldes als Koerzitivkraft bezeichnet.

Diese eigentümliche Eigenschaft ferromagnetischer Stoffe, den Magnetismus in Abwesenheit des Stroms beizubehalten sowie die Möglichkeit, diesen Restmagnetismus durch einen elektrischen Strom entsprechender Richtung wieder zu beseitigen, heißt Hysteresis. Was ist der Ursprung dieses Wortes? Man kann nicht von vornherein sagen, wie groß das  $\mu$  von Eisen ist. Das hängt von früheren Ereignissen ab, nämlich davon, ob die betreffende Probe schon einmal magnetisiert gewesen ist, und wenn ja, wie stark. Kurz, die magnetische Permeabilität hängt von der Vorgeschichte der Probe ab. Genau das kommt in dem Terminus Hysteresis zum Ausdruck, denn Geschichte heißt auf englisch hystory.

Je nach den technischen Forderungen werden unterschiedliche ferromagnetische Stoffe mit verschiedenen Eigenschaften benötigt. Die magnetische Legierung Permalloy hat ein  $\mu$  von nahezu 100 000; bei Weicheisen betragen die Maximalwerte von  $\mu$  nur etwa ein Viertel dieses Werts.

Die Möglichkeit, den magnetischen Kraftlinienfluß stark zu vergrößern, indem man einen eisernen Körper in das Innere einer Drahtspule bringt, führte zur Entwicklung der Elektromagnete. Naturgemäß vergrößert sich die Kraft eines Elektromagneten, d. h. seine Fähigkeit, eiserne Gegenstände großer Masse anzuziehen und festzuhalten, mit der Stärke des Stroms, der durch die Wicklung des Elektromagneten fließt. Allerdings kann dieser Vorgang nicht unbegrenzt fortgesetzt werden, weil schließlich Sättigung auftritt. Handelt es sich um Magnete mit großer Eigenmasse, läßt sich diese Sättigung nicht so einfach erreichen.

Zur Erzielung besonders starker Magnetfelder benutzt man in den letzten Jahren supraleitende Wicklungen. Die Erzeugung und Aufrechterhaltung extrem tiefer Temperaturen machen große technische Schwierigkeiten. Dafür können wir jetzt sicher sein, aus den Ferromagnetika alles „herausgequetscht“ zu haben, was sie überhaupt hergeben können, denn  $\mu$  wächst mit sinkender Temperatur.

Ab Erreichen einer bestimmten Grenztemperatur, z. B. 767 °C für Eisen oder 360 °C für Nickel, verschwinden die ferromagnetischen Eigenschaften, und die magnetische Permeabilität nimmt dann, wie bei allen anderen Körpern auch, einen Wert an, der bei Eins liegt.

## Domänen

Die wichtigste Besonderheit von Ferromagnetika ist ihre Domänenstruktur. Unter einer Domäne versteht man ein Gebiet, das bis zu seinem Grenzwert magnetisiert ist. Im Innern einer Domäne sind alle Atome so ausgerichtet, daß ihre magnetischen Momente zueinander parallel verlaufen.

Das Verhalten der magnetischen Domänen ist das gleiche wie das Verhalten der elektrischen Domänen bei Seignetteelektrika. Die linearen Abmessungen magnetischer Domänen sind nicht allzu klein und haben die Größenordnung von 0,01 mm. Deshalb kann man Domänen mit Hilfe eines einfachen Kunstgriffs in einem gewöhnlichen Mikroskop sichtbar machen.

Zu diesem Zweck trägt man auf die polierte Oberfläche eines ferromagnetischen Monokristalls einige Tropfen einer kolloidalen Suspension auf, die ein fein zerkleinertes ferromagnetisches Material, etwa Magnetit, enthält. Die Kolloidpartikeln konzentrieren sich im Verlauf der Domänengrenzen, da die Magnetfelder im Verlauf dieser Grenzen besonders stark sind (Analoger Effekt zu gewöhn

lichen Magneten, bei denen sich die der Anziehung unterliegenden Partikeln ebenfalls in Polnähe ansammeln.)

Wie bei den Seignettelektrika existieren Domänen in ferromagnetischen Stoffen nicht nur bei Vorhandensein eines äußeren Magnetfeldes, sondern auch dann, wenn die betreffende Probe nicht magnetisiert ist.

Dabei haben die Domänen in einem nichtmagnetisierten Monokristall eine Lage, die bewirkt, daß das magnetische Gesamtmoment des Kristalls gleich Null ist. Daraus folgt aber nicht, daß die Domänen völlig willkürlich angeordnet wären. Der Charakter der Kristallstruktur diktiert vielmehr gewisse Richtungen, die die Magnetmomente bevorzugt einnehmen. Eisenkristalle haben eine kubische Elementarzelle, und die am leichtesten zu magnetisierenden Richtungen sind die Würfelachsen. Bei anderen ferromagnetischen Metallen richten sich die Momente längs der Würfeldiagonalen aus. Doch wie dem auch sei, im nichtmagnetisierten Kristall sind die Domänen durchaus wohlgeordnet. Dabei gibt es immer gleichviel Domänen, deren magnetische Momente in die eine bzw. in die andere Richtung zeigen. Beispiele für die Domänenstruktur haben wir bereits in Bild 2.3. angegeben.

Die Magnetisierung besteht ebenso wie die Polarisierung darin, daß Domänen, deren Momente mit dem Feld einen stumpfen Winkel einschließen, „aufgezehrt“ werden.

Der Widerstreit im Streben nach Ordnung bzw. Unordnung in der Anordnung der Atome ist eine unabdingbare Besonderheit jedes Stoffzustands. Ausführlich berichte ich darüber in meinem Buch „Ordnung und Unordnung in der Welt der Atome“\*.

Wie im 2. Band der „Physik für alle“ festgestellt wurde, bedeutet das Streben nach Unordnung ein Stre-

---

\* Die deutsche Übersetzung erschien 1979 im Fachbuchverlag Leipzig. Anm. der Red.

ben nach dem Energieminimum. Ist die Wärmebewegung gering, dann bilden die sich selbst überlassenen Partikel ein Wunder an atomarer Architektur: den Kristall. Der Kristall ist das Symbol der idealen Ordnung in der Welt der Atome. Das Streben nach Unordnung wird vom Gesetz der Entropiezunahme diktiert.

Bei Temperaturerhöhung gewinnen entropische Tendenzen die Oberhand, und die Unordnung wird zur beherrschenden Existenzform der Materie.

Bei ferromagnetischen Stoffen liegen die Dinge folgendermaßen: Nach Maßgabe des Temperaturanstiegs beginnen sich die magnetischen Momente „aufzuschaukeln“. Zunächst verläuft diese Schwingung rhythmisch und beeinträchtigt die Ordnung nicht; mit wachsender Temperatur „überschlägt“ sich erst das eine, dann ein anderes Atom und nimmt eine „falsche“ Lage ein. Die Anzahl solcher „außer Takt geratener“ Atome nimmt ständig zu, und schließlich erfolgt bei einer streng definierten Temperatur (der sogenannten Curie-Temperatur) ein vollständiges „Aufschmelzen“ der magnetischen Ordnung.

Im Rahmen dieses Buches ist es mir unmöglich zu erklären, warum eine so unbedeutende Anzahl von Stoffen ferromagnetische Eigenschaften hat oder welche Details der Atomstruktur diesen Stoffen eine so außergewöhnliche Stellung eingetragen haben. Es soll ein populäres Buch bleiben.

Wenden wir uns nun der Beschreibung des Verhaltens der anderen Stoffe zu.

### **Diamagnetische und paramagnetische Stoffe**

Wie bereits erwähnt, haben alle Stoffe, mit Ausnahme der kleinen Klasse der Ferromagnetika, eine magnetische Permeabilität, die sehr nahe bei Eins liegt. Körper, deren  $\mu$  etwas größer als Eins ist, heißen paramagnetisch; Kör-

per mit einer magnetischen Permeabilität kleiner als Eins heißen diamagnetisch. Wir geben nun einige Beispiele für Stoffe beider Klassen an und nennen auch die zugehörigen Werte der magnetischen Suszeptibilität:

	$\mu$		$\mu$
Aluminium	1,000 023	Silber	0,999 981
Wolfram	1,000 175	Kupfer	0,999 912
Platin	1,000 253	Wismut	0,999 824

Obwohl die Abweichungen von Eins sehr klein sind, gelingen durchaus genaue Messungen. Zu diesem Zweck kann man sich der Induktionsstoßmethode bedienen, mit der wir unseren Bericht über magnetische Messungen von Stoffeigenschaften begonnen haben. Genauere Ergebnisse werden jedoch mit Hilfe der sogenannten magnetischen Waage erreicht.

In einer Schale einer analytischen Mikrowaage (mit deren Hilfe man bekanntlich Massen bis zu einem zehnmillionstel Gramm ermitteln kann) wird eine Öffnung angebracht und ein Faden hindurchgeführt, an den man den Prüfkörper, der sich zwischen den Polen eines Magneten befindet, aufhängt. Die Enden des Magneten müssen so ausgeführt sein, daß das Feld inhomogen ist. In diesem Fall wird der Körper entweder in den Bereich des starken Feldes hineingezogen oder aus diesem herausgezogen. Das Hineinziehen erfolgt, wenn das magnetische Moment des Prüfkörpers bestrebt ist, sich im Feldverlauf einzustellen, das Herausstoßen erfolgt im umgekehrten Fall. Die Formel für die hierbei wirkende Kraft ist auf S. 130 angegeben.

Zunächst wird der Prüfkörper in Abwesenheit des Magnetfeldes mit Hilfe von Wägestücken ins Gleichgewicht gebracht. Sobald der Prüfkörper dann in das Magnetfeld gelangt, wird das Gleichgewicht gestört. Bei

paramagnetischen Stoffen müssen einige Wägestücke zugelegt, bei diamagnetischen Stoffen dagegen einige von der Waagschale entfernt werden. Es läßt sich nun leicht ausrechnen, wie das Problem mit Hilfe einer guten Waage ohne weiteres zu lösen ist, weil (im leicht zu realisierenden Fall eine Feldinhomogenität in der Größenordnung einiger hundertstel Tesla je Zentimeter) auf  $1 \text{ cm}^3$  Stoff eine Gewichtskraft von etwa  $1 \text{ mg}$  wirkt. Beide Eigenschaften — sowohl paramagnetische als auch diamagnetische — sind einfach zu erklären.

Diamagnetismus ist die unmittelbare Folge davon, daß jedes Elektron im Magnetfeld eine Kreisbahn beschreibt. Die entsprechenden kreisförmig fließenden Ströme erzeugen ihre eigenen magnetischen Momente, die jenem Feld, das die Umlaufbewegung erzeugte, entgegengerichtet sind.

Diamagnetismus ist eine Eigenschaft, die alle Stoffe haben.

Der Paramagnetismus hingegen — ganz zu schweigen vom Ferromagnetismus — überdeckt die diamagnetischen Eigenschaften der Stoffe.

Zu den Paramagnetika gehören jene Stoffe, deren Atome bzw. Ionen ein magnetisches Moment besitzen. Dieses Moment kann durch die Bahnbewegung der Elektronen, durch den Spin eines einzelnen Elektrons oder durch beides zusammen verursacht werden.

Die Atome diamagnetischer Stoffe haben in Abwesenheit eines Magnetfeldes kein magnetisches Moment. Im Gegensatz dazu besitzen die Atome paramagnetischer Stoffe magnetische Momente, sind jedoch wegen der Wärmebewegung völlig ungeordnet; es liegt also genau der gleiche Fall wie bei ferromagnetischen Körpern oberhalb der Curie-Temperatur vor. Bei Überlagerung eines Feldes beginnt der Kampf der „Ordnungskraft“ des Feldes mit der Unordnung, die durch die Wärmebewegung verursacht wird. In dem Maße, wie die Temperatur sinkt,

stellt sich eine immer größer werdende Anzahl von Atomen so ein, daß ihr magnetisches Moment mit der Feldrichtung einen spitzen Winkel einschließt. So ist durchaus verständlich, daß die magnetische Suszeptibilität paramagnetischer Körper mit sinkender Temperatur wächst.

### **Das Magnetfeld der Erde**

Der Mensch von heute hat sich daran gewöhnt, daß jedes neue Gerät als Ergebnis der Entwicklung einer physikalischen Theorie entsteht. Ist das Gerät erst einmal entwickelt, nehmen es die Ingenieure in die Hand; für die Physiker ist das Projekt erledigt. Die Natur der Erscheinung, auf der die Funktion des Geräts fußt, ist erkannt und erklärt worden.

Anders verliefen die Dinge beim Kompaß. Wahrscheinlich gab es ihn in China bereits im 11. Jahrhundert. Lange Zeit wurde er als wichtigstes Navigationsinstrument benutzt, ohne daß jemand sein Funktionsprinzip verstanden hätte. Warum zeigt ein Ende der Magnetnadel stets nach Norden? Die Weisen jener Zeit führten das Verhalten der Magnetnadel auf außerirdische Kräfte zurück, beispielsweise auf die Anziehung des Nadelendes durch den Polarstern.

1600 erschien eine brillante Arbeit William Gilberts unter dem Titel „Über den Magneten und den großen Magneten Erde“. Seine streng wissenschaftliche Methode erlaubte diesem Gelehrten, „hautnah“ an das Verständnis der magnetischen Erscheinungen heranzukommen. Gilbert drehte aus einem Brocken magnetischen Erzes eine Kugel und untersuchte sehr sorgfältig die Orientierung einer Magnetnadel, die er über den verschiedenen Teilen der Kugel aufhängte. Dabei erkannte er die völlige Übereinstimmung mit der Orientierung der Magnetnadel an verschiedenen Orten der Erde. Er gelangte zu dem Schluß: Die Funktion eines Kompasses läßt sich erklären,

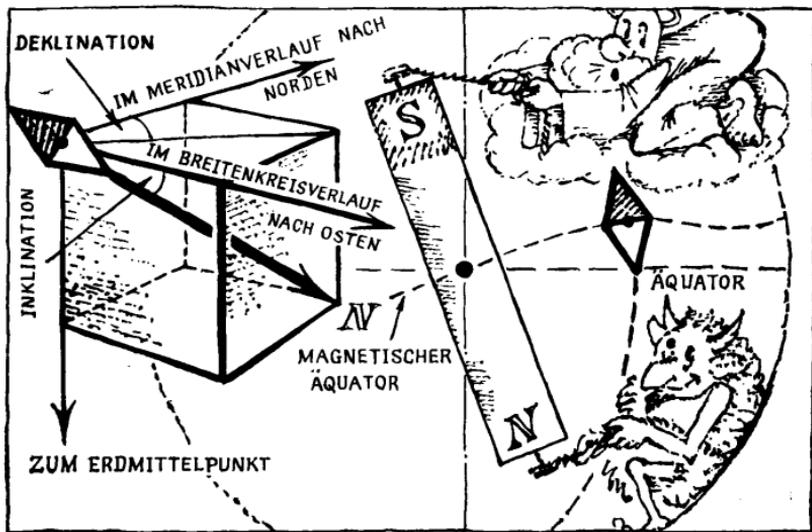


Bild 3.10.

wenn man die Erde als einen Permanentmagneten annimmt, dessen Achse dem Verlauf der Erdachse entspricht.

Von diesem Augenblick an gelangte die Erforschung des Geomagnetismus auf eine neue Ebene. Sorgfältigere Untersuchungen zeigten, daß die Magnetnadel nicht ganz exakt in Nord-Süd-Richtung zeigt. Man bezeichnet die Abweichung der Richtung der Magnetnadel von dem Meridian, der durch den betrachteten Punkt verläuft, als magnetische Deklination. Die magnetischen Pole sind relativ zur Drehachse der Erde um  $11,5^\circ$  verschoben. (Bild 3.10.) Die Nadel verläuft nicht genau waagrecht, sondern ist unter einem bestimmten Winkel gegen den Horizont geneigt; diesen Neigungswinkel bezeichnet man als magnetische Inklination. Durch Untersuchung der magnetischen Inklination an verschiedenen Orten der Erde kann man zu dem Schluß gelangen, daß der magne-

tische „Dipol“ unserer Erde tief im Innern des Erdballs verborgen liegt. Dieser Dipol erzeugt ein inhomogenes Feld, das an den magnetischen Polen einen Wert von  $0,6 \cdot 10^{-4}$  T und am Äquator  $0,3 \cdot 10^{-4}$  T erreicht.

Was ist das aber für ein „Magnet“, der sich im Innern der Erde befindet? Der magnetische „Dipol“ befindet sich im Erdkern, der aus geschmolzenem Eisen besteht. Eisen bleibt selbst im geschmolzenen Zustand ein guter Elektrizitätsleiter, und zur Erklärung des Magnetfeldes der Erde eignet sich das Modell einer Art von „magnetischem Dynamo“. Wir wollen das Modell hier nicht beschreiben. Vielmehr soll der Hinweis genügen, daß der „irdische Magnet“ von Strömen erzeugt wird, die im Innern des geschmolzenen Eisens fließen.

Das Magnetfeld der Erde ist veränderlich. Die magnetischen Pole ändern ihre Lage mit einer Geschwindigkeit von 5 bis 6 km im Jahr. Verglichen mit der Ausdehnung unserer Erde, ist dies eine verschwindend kleine Lageänderung. Nachzuweisen ist diese Erscheinung allenfalls im Verlauf von 100 Jahren — also einem Säkulum —; deshalb bezeichnet man sie als säkulare Variation des Magnetfeldes.

Jeder weiß, wie wichtig die genaue Kenntnis der Bestandteile des Erdmagnetismus an jedem Ort unseres Planeten ist. Bis zum heutigen Tag leistet der magnetische Kompaß den Seeleuten gute Dienste. Allerdings müssen ihnen Karten zur Verfügung stehen, die die magnetischen Deklinationen und Inklinationen angeben. In Polnähe zeigt die Magnetnadel, wie aus unserem Bild hervorgeht, überhaupt nicht mehr nach Norden. Aber auch in Äquatornähe ist ohne eine Karte des Magnetfeldes schwer auszukommen. Der magnetische Äquator verläuft längst nicht da, wo sich der geografische Äquator befindet.

Auch auf dem Festland ist die Kenntnis des Magnetfeldes von großem Interesse, da sie hier den Zwecken der geologischen Erkundung dient. Freilich können wir be

diesen Problemen nicht verweilen. Die Geophysik ist ein wichtiges und umfangreiches Kapitel der Wissenschaft, das einer besonderen Unterhaltung wert ist.

Einige Worte zu den sogenannten paläomagnetischen Untersuchungen, die Rückschlüsse darauf zulassen, wie das Magnetfeld der Erde in weit zurückliegenden Zeiten beschaffen war. Diese Forschungsarbeiten stützen sich in der Hauptsache auf die Untersuchung der Restmagnetisierung von Gesteinen usw.

Einige Worte zu Verfahren, die die vorgeschichtliche Zeit betreffen. Backsteine und Tonvasen haben eine geringfügige Restmagnetisierung, die beim Brennen im heißen Ton entsteht. Die Richtung des magnetischen Moments entspricht der Richtung des Magnetfeldes im Augenblick der Herstellung und Abkühlung des Gegenstands. Eine hinreichende Information erhält man dann, wenn sich die Lage des betreffenden Gegenstands im Augenblick seiner Herstellung mit beträchtlicher Sicherheit beurteilen läßt.

Noch ein Beispiel für derartige Untersuchungen: Man untersucht die geografische Richtung des magnetischen Moments von Erzen, ihr Alter aber wird anhand des Gehalts an radioaktiven Isotopen bestimmt.

Die paläomagnetischen Untersuchungen sind der strengste Beweis für die Kontinentaldrift. Es zeigte sich nämlich, daß man die Magnetisierung von Eisenerzlagern, die vor einigen hundert Millionen Jahren auf den verschiedenen Kontinenten entstanden, in Richtung der Kraftlinien des Magnetfeldes anordnen kann, wenn man die Kontinente zu einem einzigen Superkontinent, dem sogenannten Gondwanaland, zusammensetzt. Das Gondwanaland spaltete sich erst später in Afrika, Australien, Antarktika und Südamerika.

Bisher haben wir nur von dem „innerirdischen“ Ursprung des Magnetismus gesprochen, der in der Tat die wichtigste Quelle ist. Gewisse Änderungen des Magnet-

feldes treten jedoch auch infolge geladener Partikeln auf, die aus dem Weltraum auf die Erde gelangen. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Protonen- und Elektronenströme, die von der Sonne emittiert werden. Die geladenen Partikeln werden durch das Feld zu den Polen abgedrängt und beschreiben dort unter dem Einfluß der Lorentz-Kraft Kreisbahnen. Dies löst zwei Erscheinungen aus. Zum ersten erzeugen die in Bewegung befindlichen geladenen Partikeln ein zusätzliches Magnetfeld, die sogenannten magnetischen Stürme, zum zweiten ionisieren sie die Moleküle der in der Atmosphäre enthaltenen Gase, und so entsteht das Nordlicht. Besonders starke magnetische Stürme treten periodisch (mit einem Intervall von 11,5 Jahren) auf. Diese Periode stimmt mit der Intensitätsperiode bestimmter Ereignisse auf der Sonne überein.

Messungen mit Hilfe von Raumflugkörpern haben gezeigt, daß die unmittelbaren Nachbarn der Erde — der Mond sowie die Planeten Venus und Mars — kein eigenes Magnetfeld besitzen, das mit dem Erdmagnetfeld vergleichbar wäre. Von den übrigen Planeten des Sonnensystems besitzen offenbar nur der Jupiter und der Saturn eigene Magnetfelder. Auf dem Jupiter wurden Felder bis zu 10 Gauß sowie eine Reihe weiterer charakteristischer Erscheinungen (magnetische Stürme, Synchrotronstrahlung usw.) nachgewiesen.

### **Magnetfelder der Sterne**

Nicht nur Planeten und erstarnte Fixsterne, sondern auch die glühenden Himmelskörper zeigen Magnetismus.

Da die Sonne der erdnahste Fixstern ist, wissen wir über ihr Magnetfeld mehr als über die Magnetfelder anderer Sterne. Im Verlauf einer Sonnenfinsternis läßt sich das Magnetfeld der Sonne auch visuell beobachten. Partikeln des Sonnenmaterials — soweit sie ein magneti-

sches Moment besitzen — ordnen sich im Verlauf der Kraftlinien an und zeigen deren Bild. Deutlich zu erkennen sind die magnetischen Pole, so daß man die Größe des Magnetfeldes abschätzen kann, das in einigen Bereichen mit einer Ausdehnung in der Größenordnung einiger zehntausend Kilometer die Stärke des Erdmagnetfeldes um das Mehrtausendfache übertrifft. Man bezeichnet diese Gebiete als Sonnenflecken. Da die Sonnenflecken dunkler als die sonstige Oberfläche der Sonne ist, muß die Temperatur hier niedriger sein. Sie liegt um 2000 K unter der „normalen“ Sonnentemperatur.

Zweifellos hängt die niedrigere Temperatur mit den höheren Werten des Magnetfeldes an diesen Stellen zusammen. Doch eine gute Theorie gibt es darüber nicht.

Wie aber liegen die Dinge bei den anderen Sternen? Die Erfolge der Astrophysik in den letzten Jahren machten es möglich, das Vorhandensein von magnetischen Feldern an Fixsternen nachzuweisen. Dabei zeigen die „stellaren magnetischen Flecken“ eine Temperatur von etwa 10 000 K und können ihre Lage im Verlauf einiger Monate ändern und gelegentlich auch ganz verschwinden. Diese Änderung läßt sich einfacher erklären, wenn man annimmt, daß nicht die Flecken auf den Sternen ihre Lage ändern, sondern daß der ganze Stern rotiert.

Auf die Existenz magnetischer Felder schließt man aus anormalen Intensitäten bestimmter Spektrallinien. Es sieht so aus, als hätten „magnetische Sterne“ einen erhöhten Eisengehalt am magnetischen Äquator.

Die Magnetfelder im Weltraum sind sehr schwach, sie betragen nur einige millionstel Gauß. Das bedarf im Grunde keiner weiteren Erklärung, denn im Weltraum herrscht Höchstvakuum. Bei der Entstehung von Sternen aus den im Weltall verstreuten Atomen ist die Verdichtung der stellaren Materie von einer „Verdichtung“ des magnetischen Feldes begleitet. Warum haben dann aber nicht alle Sterne ein Magnetfeld?

Die Erde existiert einige Milliarden Jahre. Das Magnetfeld der Erde wurde diese ganze Zeit über durch elektrische Ströme unterhalten, die in ihrem Innern fließen. Einige Sterne, die kein Magnetfeld besitzen, haben sich offenbar so weit abgekühlt, daß in ihrem Innern keine elektrischen Ströme mehr vorhanden sind. Freilich kann diese Erklärung keinen Anspruch auf Universalität erheben.

# 4. Ein Konspekt der Elektrotechnik

## Die sinusförmige EMK

Der Akkumulator ist wie die galvanischen Elemente eine Gleichstromquelle. Das Netz hingegen liefert Wechselstrom. Die Begriffe Gleich- und Wechsel- beziehen sich auf die Größen Spannung, EMK und Stromstärke. Wenn im Verlauf des Stromflusses alle diese Größen unverändert bleiben, sprechen wir von Gleichstrom; ändern sie sich, dann handelt es sich um Wechselstrom.

Der Charakter der Änderung des elektrischen Stroms in der Zeit kann, abhängig von der stromerzeugenden Vorrichtung, unterschiedlich sein. Die Kurve, die die Änderung des elektrischen Stroms beschreibt, läßt sich mit Hilfe einer Elektronenstrahlröhre sichtbar machen. Der Elektronenstrahl wird durch die Felder zweier jeweils senkrecht zueinander angeordneter Kondensatorplatten abgelenkt. Indem man an die Platten der Kondensatoren verschiedene Spannungen anlegt, kann man den vom Elektronenstrahl auf dem Schirm erzeugten Leuchtfleck über die gesamte Fläche des Schirms wandern lassen.

Zur Darstellung der Wechselstromkurve verfährt man wie folgt: An das eine Plattenpaar wird eine sogenannte Sägezahnspannung angelegt, deren Kurve in Bild 4.1. dargestellt ist. Ist der Elektronenstrahl nur der Wirkung dieser Spannung ausgesetzt, dann bewegt sich der Leuchtfleck gleichförmig über den Bildschirm, um dann „mit einem Satz“ in die Ausgangsstellung zurückzukehren. Die jeweilige Lage des Leuchtflecks enthält zugleich die Zeitangabe. Liegt am anderen Plattenpaar die zu unter-

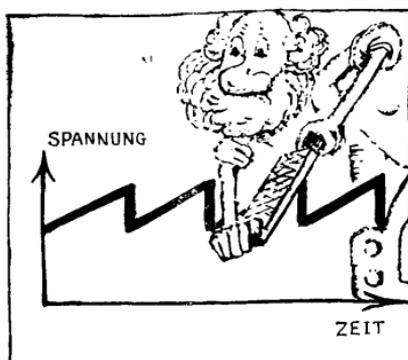


Bild 4.1.

suchende Wechselspannung an, so wird sie „abgewickelt“, und zwar in der gleichen Weise, wie die „Abwicklung“ einer mechanischen Schwingung mit Hilfe jener einfachen Vorrichtung erfolgt, die im 1. Band dargestellt ist.

Das Wort „Schwingung“ ist in diesem Zusammenhang kein Irrtum. Die Größen, die einen Wechselstrom kennzeichnen, schwingen meistens sinusförmig, zeigen also den gleichen Schwingungsverlauf, wie er bei Ablenkung eines Pendels aus der Ruhelage entsteht. Um sich davon zu überzeugen, genügt es, die Wechselspannung des Netzes an einen Oszillographen zu legen.

Auf der Senkrechten können entweder der Strom oder die Spannung abgetragen werden. Die Stromkennlinie ist die gleiche wie die durch eine mechanische Schwingung erzeugte Kurve. Das Zeitintervall, nach dessen Ablauf sich das Kurvenbild wiederholt, ist bekanntlich die Schwingungsperiode  $T$ ; die Stromfrequenz  $\nu$  ist der Kehrwert der Schwingungsperiode und beträgt für den Netzstrom gewöhnlich 50 Schwingungen in der Sekunde.

Betrachten wir nur eine Sinuskurve, so ist die Wahl des Kurvenursprungs gleichgültig. Überlagern sich hingegen zwei Sinuskurven so wie in Bild 4.2., muß angegeben werden, um welchen Teil einer Schwingungsperiode

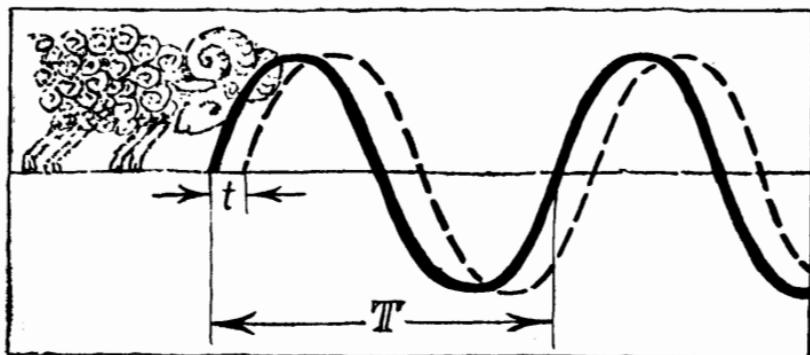


Bild 4.2.

sie gegeneinander in der Phase verschoben sind. Als Phase wird der Winkel

$$\varphi = 2\pi \frac{t}{T}$$

bezeichnet. Sind beide Kurven beispielsweise um eine Viertelperiode gegeneinander verschoben, so sagen wir, daß sie eine Phasenverschiebung um  $90^\circ$  haben. Beträgt die Verschiebung nur ein Achtel der Periode, dann entspricht dies einer Phasenverschiebung um  $45^\circ$  usw.

Ist von mehreren phasenverschobenen Sinuskurven die Rede, so sprechen die Techniker von Strom- bzw. Spannungsvektoren. Dabei entspricht die Länge des Vektors der Amplitude der Sinuskurve und der von den Vektoren eingeschlossene Winkel der Phasenverschiebung. Viele technische Vorrichtungen liefern uns keinen einfachen sinusförmigen Strom, sondern einen Strom, dessen Kurve die Summe mehrerer gegeneinander verschobener Sinuskurven darstellt.

Wir wollen nun zeigen, daß ein einfacher sinusförmiger Strom entsteht, wenn der Leiterraum mit konstan-

ter Geschwindigkeit in einem homogenen Magnetfeld rotiert.

Bei beliebiger Richtung des Rahmens relativ zu den Kraftlinien ist der magnetische Fluß, der den Leiterkreis durchdringt, gleich

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \varphi.$$

Darin ist  $\varphi$  der Winkel zwischen der Windungsebene und der Richtung des Feldes. Die Änderung dieses Winkels in der Zeit erfolgt nach  $\varphi = 2\pi t/T$ .

Das Gesetz der elektromagnetischen Induktion erlaubt die Berechnung der Induktions-EMK. Wir wollen die Ausdrücke für die magnetischen Flüsse zu zwei verschiedenen Zeitpunkten aufschreiben, die voneinander durch das winzige Zeitintervall  $\tau$  getrennt sind:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} (t + \tau).$$

Die Differenz dieser beiden Ausdrücke ist:

$$2\Phi_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} \left( t + \frac{\tau}{2} \right) \sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\tau}{2} \right).$$

Da  $\tau$  sehr klein ist, gelten die folgenden Näherungsgleichungen:

$$\sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\tau}{2} \right) \approx \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\tau}{2},$$

$$\cos \frac{2\pi}{T} \left( t + \frac{\tau}{2} \right) \approx \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

Die Induktions-EMK ist gleich dieser auf die Zeit bezogenen Differenz. Also gilt:

$$\begin{aligned} E_{\text{ind.}} &= \frac{2\pi}{T} \Phi_{\max} \cos \frac{2\pi}{T} t = \\ &= \frac{2\pi}{T} \Phi_{\max} \sin \left( \frac{2\pi}{T} t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

So haben wir bewiesen, daß die Induktions-EMK durch eine Sinuskurve ausgedrückt wird, die bezüglich der Sinuskurve des magnetischen Flusses um  $90^\circ$  verschoben ist. Was den Maximalwert der Induktions-EMK, d. h. ihre Amplitude betrifft, so ist sie dem Produkt aus der Amplitude des magnetischen Flusses und der Drehfrequenz des Rahmens proportional.

Die Formel für die Stromstärke erhält man, indem man die Induktions-EMK durch den Widerstand des Stromkreises dividiert. Wir würden jedoch einen groben Fehler machen, wenn wir den Wechselstromwiderstand, der im Nenner des Ausdrucks

$$I_{\text{Wechsel}} = \frac{E_{\text{Ind.}}}{R_{\text{Wechsel}}}$$

steht, gleich dem Ohmschen Widerstand setzen würden, d. h. jener Größe, mit der wir es bislang zu tun hatten. Es zeigt sich nämlich, daß  $R_{\text{Wechsel}}$  nicht nur durch den Ohmschen Widerstand bestimmt wird, sondern noch von zwei weiteren Parametern des Stromkreises abhängt: von seiner Induktivität sowie von den in den Kreis geschalteten Kapazitäten.

Daß das Ohmsche Gesetz komplizierter wird, sobald wir vom Gleich- zum Wechselstrom übergehen, zeigt folgender einfache Versuch: In Bild 4.3. ist ein Stromkreis dargestellt, der eine Glühlampe und eine Spule enthält. Die Spule ist so beschaffen, daß sich ein Eisenkern einführen läßt. Wir schließen den Stromkreis zunächst an eine Gleichstromquelle an. Nun schieben wir den Eisenkern in die Spule und ziehen ihn wieder heraus. Der Effekt ist gleich Null. Der Widerstand des Kreises ändert sich nicht, also bleibt auch die Stromstärke unverändert. Jetzt aber wiederholen wir den gleichen Versuch für den Fall, daß der Stromkreis an Wechselstrom angeschlossen ist. Das Ergebnis läßt nicht auf sich warten: Befindet sich der Eisenkern nicht in der Spule, dann leuchtet die Glüh-

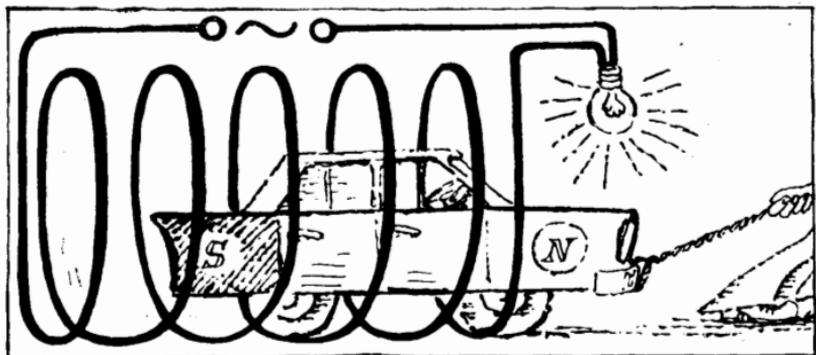


Bild 4.3.

lampe hell, während sie bei eingeführtem Eisenkern mehr einer trüben Funzel ähnelt.

Fassen wir zusammen: Bei unveränderter äußerer Spannung und bei unverändertem Ohmschen Widerstand (der nur vom Werkstoff sowie von der Länge und dem Querschnitt der Leitungen abhängt) ändert sich die Stromstärke abhängig von der Lage des Eisenkerns in der Spule.

Was bedeutet das?

Wir wollen uns daran erinnern, daß ein Eisenkern den magnetischen Fluß, der die Spule durchdringt, sprunghaft (auf ein Mehrtausendfaches) ansteigen läßt. Im Fall einer veränderlichen EMK ändert sich der magnetische Fluß in der Spule ständig. Doch während diese Änderung ohne den Eisenkern in der Spule von Null bis zu einem bestimmten Wert reicht, den wir hier gleich Eins setzen wollen, so umfaßt die Änderung bei eingeführtem Eisenkern ein Intervall von Null bis zu einigen Zehntausend.

Bei Änderung des magnetischen Flusses schneiden die Kraftlinien die Windungen der „eigenen“ Spule. Dabei entsteht in der Spule infolge Selbstinduktion ein Strom.

Entsprechend der Lenzschen Regel hat dieser Strom jene Richtung, die den stromerzeugenden Effekt schwächt. Die äußere EMK trifft auf ein besonderes Hindernis, das so lange nicht existierte, wie der Strom ein Gleichstrom war. Mit anderen Worten, der Wechselstrom hat einen zusätzlichen Widerstand, weil das Magnetfeld, wenn es die Leitungen des eigenen Kreises schneidet, eine besondere EMK erzeugt, die als Selbstinduktions-EMK bezeichnet wird und die mittlere Stromstärke reduziert. Dieser zusätzliche Widerstand heißt induktiver Widerstand.

Das Experiment besagt, daß der die Spule durchdringende magnetische Fluß (bzw. der magnetische Fluß, der den gesamten Stromkreis durchdringt) der Stromstärke proportional ist:  $\Phi = LI$ . Was den Proportionalitätskoeffizienten  $L$  betrifft, so wird er als Induktivität bezeichnet und ist von der Geometrie des Stromkreises sowie davon abhängig, welche Art von Kernen der Stromkreis umschließt. Wie aus der Formel hervorgeht, ist der Zahlenwert der Induktivität gleich dem magnetischen Fluß bei der Stromstärke 1 A. Die Maßeinheit von  $L$  ist das Henry. ( $1 \text{ H} = 1 \text{ Ohm} \cdot \text{s}$ )

Es läßt sich theoretisch ableiten und experimentell bestätigen, daß der induktive Widerstand  $R_L$  durch folgende Formel angegeben wird:

$$R_L = 2\pi\nu L.$$

Sind der Ohmsche Widerstand (wir kennen ihn bereits) und der kapazitive Widerstand (wir lernen ihn bald kennen) klein, dann ist die Stromstärke im Kreis gleich

$$I = \frac{E}{R_L}.$$

Um beurteilen zu können, was „klein“ und was „groß“ ist, wollen wir einmal den Wert des induktiven Wider-

stands für die übliche Netzfrequenz sowie eine Induktivität von 0,1 H abschätzen. Wir erhalten etwa 30 Ohm.

Nun, und was stellt eine Spule mit der Induktivität 1 H dar? Zur Abschätzung der Induktivität von Spulen und Drosseln (d. h. Spulen mit Eisenkernen) wird folgende Formel verwendet:

$$L = \mu_0 \mu \frac{n^2}{l} S, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{J}{A^2 \cdot m}.$$

Hierin bedeuten  $n$  die Anzahl der Windungen,  $l$  die Länge der Spule und  $S$  der Querschnitt. Einen Wert von 0,002 H liefert somit beispielsweise eine Spule mit den folgenden Parametern:  $l = 15$  cm,  $n = 1500$  und  $S = 1$  cm<sup>2</sup>. Bei Einführung eines Eisenkerns mit  $\mu = 1000$  beträgt die Induktivität 2 H.

Eine EMK beliebigen Ursprungs und damit also auch die EMK der Selbstinduktion verrichtet Arbeit. Diese Arbeit ist, wie wir wissen, gleich  $EI$ . Handelt es sich um Wechselstrom, so ändern sowohl  $E$  als auch  $I$  in jedem Augenblick ihren Wert. Wir nehmen an, daß zum Zeitpunkt  $t$  die betreffenden Werte gleich  $E_1$  und  $I_1$  wären, zum Zeitpunkt  $(t + \tau)$  jedoch gleich  $E_2$  und  $I_2$ . Der magnetische Fluß, der die Windungen einer Spule mit der Induktivität  $L$  schneidet, ist gleich  $LI$ . Zum Zeitpunkt  $t$  hatte er den Wert  $LI_1$  und zum Zeitpunkt  $t + \tau$  den Wert  $LI_2$ . Wie groß ist nun die Arbeit, die zur Erhöhung der Stromstärke von  $I_1$  auf  $I_2$  erforderlich gewesen ist? Die EMK ist gleich der Änderung des magnetischen Flusses, bezogen auf die Änderungsdauer:

$$E = \frac{L(I_2 - I_1)}{\tau}.$$

Um die Arbeit  $EI\tau$  zu erhalten, muß der obenangegebene Ausdruck mit der Zeit und der Stromstärke multipliziert werden. Mit welcher Stromstärke aber? Mit ihrem Mittelwert, d. h. mit  $(I_1 + I_2)/2$ . So gelangen wir zu dem

Schluß, daß die Arbeit der Selbstinduktions-EMK gleich

$$\frac{L}{2} (I_2 + I_1) (I_2 - I_1) = \frac{L}{2} I_2^2 - \frac{L}{2} I_1^2$$

ist.

Dieses rechnerische Ergebnis kann man wie folgt ausdrücken: Die Arbeit der EMK ist gleich der Differenz von  $LI^2/2$  für zwei verschiedene Zeitpunkte. Das heißt, die Energie wird an einem induktiven Widerstand nicht zerstreut, geht also nicht in Wärme über, wie dies in Stromkreisen mit Ohmschem Widerstand der Fall ist; sie wird vielmehr „in die Reserve versetzt“. Das ist auch der Grund, warum man den Ausdruck  $LI^2/2$  als die magnetische Energie des Stroms bezeichnet.

Schauen wir uns nun an, wie sich die Einschaltung eines Kondensators in einen Wechselstromkreis auf dessen Widerstand auswirkt.

Schaltet man einen Kondensator in einen Gleichstromkreis, dann fließt kein Strom. Die Einschaltung eines Kondensators bedeutet ja hier nichts anderes als die Unterbrechung des Stromkreises. In einem Wechselstromkreis hingegen läßt ein Kondensator den Strom nicht auf Null zurückgehen.

Natürlich interessiert uns die Ursache dieses Unterschieds. Die Erklärung ist einfach. Nachdem der Kreis an eine Wechselstromquelle angeschlossen wurde, beginnt die Akkumulation der elektrischen Ladung an den Belegungen des Kondensators. An die eine Belegung wird positive Ladung geführt, an die andere negative. Wir wollen annehmen, daß der induktive Widerstand und der Ohmsche Widerstand klein sind. Die Aufladung dauert so lange an, bis die Spannung an den Kondensatorbelegungen ihr Maximum erreicht und gleich der EMK der Quelle ist. In diesem Augenblick ist die Stromstärke gleich Null. Nun fällt die Spannung der Stromquelle ab; der Kondensator „entlädt“ sich.

Mißt man die Stromstärke in einem Stromkreis, der einen Kondensator enthält, so ergibt sich, daß die Stromstärke in Abhängigkeit von zwei Größen unterschiedlich ist. Zum ersten zeigt sich (sowohl experimentell als auch theoretisch nachweisbar), daß der Strom mit dem Abfallen der Frequenz kleiner wird. Der kapazitive Widerstand ist also der Frequenz indirekt proportional. Dieses Ergebnis erscheint logisch, weil sich der Wechselstrom einem Gleichstrom desto mehr nähert, je kleiner die Frequenz ist.

Durch Änderung der geometrischen Parameter des Kondensators, d. h. des Plattenabstands und der Plattengröße, können wir uns überzeugen, daß der kapazitive Widerstand auch der Kapazität des Kondensators indirekt proportional ist.

Die Formel des kapazitiven Widerstands ist

$$R_C = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

Ein Kondensator der Kapazität 30 Mikrofarad hat bei Netzfrequenz einen Widerstand von etwa 100 Ohm.

Verzichten will ich auf die Erklärung, wie der Widerstand komplizierter Stromkreise, die Ohmsche, induktive und kapazitive Widerstände enthalten, berechnet wird. Nur eins sei gesagt: Der Gesamtwiderstand des Kreises entspricht nicht der Summe der einzelnen Widerstände.

Stromstärke und Spannung in einem Abschnitt des Kreises, der einen Ohmschen Widerstand, einen Kondensator und eine Induktionsspule enthält, können in der üblichen Weise mit Hilfe eines Oszillographen gemessen werden. Sowohl der Strom als auch die Spannung werden dabei auf dem Bildschirm als Sinuskurven dargestellt. Es ist nicht verwunderlich, daß diese Sinuskurven relativ zueinander um einen bestimmten Phasenwinkel  $\varphi$  verschoben sind. (Es sei daran erinnert, daß der Strom etwa in einem Stromkreis mit einem Kondensator gleich Null

ist, wenn die Spannung am Kondensator ihr Maximum erreicht hat.)

Der Wert der Phasenverschiebung  $\varphi$  ist außerordentlich wichtig. Schließlich ist die Leistung gleich dem Produkt aus Stromstärke und Spannung. Fallen die Sinuskurven von Stromstärke und Spannung zusammen, dann erreicht die Leistung ihr Maximum; sind sie jedoch so gegeneinander verschoben wie in einem Kreis, der einen kapazitiven oder einen induktiven Widerstand hat, dann ist die Leistung gleich Null. Davon kann man sich überzeugen, indem man zwei Sinuskurven aufzeichnet, die um  $90^\circ$  gegeneinander verschoben sind, ihre Ordinatenwerte miteinander multipliziert und die erhaltenen Produkte für eine Periode addiert. Es kann streng nachgewiesen werden, daß die Leistung eines Wechselstroms im allgemeinen Fall, und zwar im Mittel für eine Periode gleich

$$W = IU \cos \varphi$$

ist.

Die Vergrößerung des  $\cos \varphi$  ist eine wichtige Aufgabe der Elektrotechnik.

## Transformatoren

Sie haben gerade einen Kühlschrank gekauft. Der Verkäufer machte Sie ausdrücklich darauf aufmerksam, daß der Kühlschrank mit einer Netzspannung von 220 Volt betrieben werden muß. Wenn Sie nun aber zu Hause eine Netzspannung von 120 Volt haben (ein heute zwar seltener Fall, der aber noch vor wenigen Jahren durchaus denkbar war), eine ausweglose Lage? Keineswegs! Sie dürfen nur eine zusätzliche Ausgabe nicht scheuen, und zwar, sich einen Transformator zu kaufen.

Ein Transformator ist eine einfache Vorrichtung, die die Spannung sowohl herauf- als auch herabsetzen kann. Er besteht aus einem Eisenkern mit zwei Wicklungen.

Die Windungszahl in beiden Wicklungen ist unterschiedlich.

Wir legen nun an eine der beiden Wicklungen Netzspannung. Mit Hilfe eines Voltmeters überzeugen wir uns, daß an den beiden Anschlüssen der anderen Wicklung eine Spannung entsteht, die von der Netzspannung verschieden ist. Besitzt die Primärwicklung  $w_1$  Windungen, die Sekundärwicklung dagegen  $w_2$  Windungen, dann beträgt das Spannungsverhältnis

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Der Transformator erhöht also die Spannung, wenn man die Primärspannung an die Wicklung mit der kleineren Windungszahl legt, und er senkt sie im gegenteiligen Fall.

Wie das kommt? Nun, der Eisenkern wird praktisch vom gesamten magnetischen Fluß durchdrungen. Also werden auch beide Wicklungen durch die gleiche Anzahl von Kraftlinien durchflutet. Der Transformator funktioniert nur, wenn es sich bei der Primärspannung um eine Wechselspannung handelt. Die sinusförmige Änderung des Stroms in der Primärwicklung erzeugt eine sinusförmige Induktions-EMK in der Sekundärwicklung. Jede Windung der Primärwicklung und der Sekundärwicklung unterliegt den gleichen Bedingungen. Die EMK einer Windung der Primärwicklung ist gleich der EMK des Netzes, dividiert durch die Windungszahl der Primärwicklung, entspricht also  $U_1/w_1$ , während die EMK der Sekundärwicklung gleich dem Produkt aus  $U_1/w_1$  und der Windungszahl  $w_2$  ist.

Grundsätzlich könnte jeder Transformator sowohl als Auf- als auch als Abwärtstransformator verwendet werden, je nachdem, an welche Windung die Primärspannung gelegt wird.

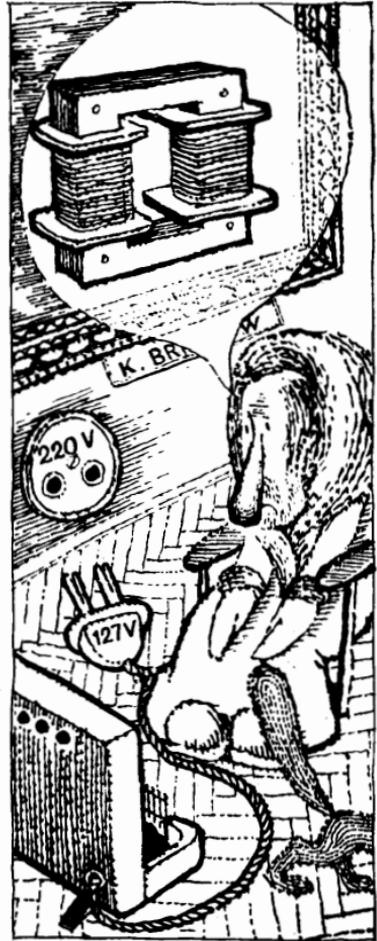


Bild 4.4.

Im täglichen Leben begegnen uns oft Transformatoren (Bild 4.4.). Abgesehen von den Transformatoren, die wir benutzen müssen, weil handelsübliche Geräte auf eine bestimmte Spannung ausgelegt sind, während das uns zur Verfügung stehende Netz eine andere Spannung auf-

weist, finden wir Transformatoren beispielsweise in Gestalt der Zündspulen von Kraftfahrzeugen. Die Zündspule ist ein Aufwärtstransformator. Zur Erzeugung des Zündfunken für die Entzündung des Kraftstoff-Luft-Gemischs ist Hochspannung erforderlich, die wir erhalten, indem wir den Strom, den die Batterie des Kraftfahrzeugs liefert, mit Hilfe eines Unterbrechers in einen Wechselstrom verwandeln. Diesen Wechselstrom transformiert die Zündspule dann auf die erforderliche Hochspannung.

Bekanntlich vermindert sich die Stromstärke bei Erhöhung der Spannung und steigt bei Herabsetzung. Die hierbei eintretenden Änderungen würden der Theorie exakt entsprechen, wenn wir nicht den Energieverlust berücksichtigen müßten, der durch die Erwärmung des Transformators eintritt.

Schweißtransformatoren sind Abwärtstransformatoren. Zum Schweißen werden sehr hohe Stromstärken benötigt, so daß ein Schweißtransformator nur wenige, mitunter nur eine einzige Ausgangswindung hat.

Sie haben sicher schon bemerkt, daß der Kern eines Transformators aus dünnen Stahlblechen gefertigt ist. Der Grund ist, daß die Energieverluste bei der Spannungsumwandlung möglichst klein gehalten werden sollen. Wir haben weiter vorn gesagt, daß die Wirbelströme in einem aus Blechen bestehenden Kern eine geringere Rolle spielen als dann, wenn der Kern massiv wäre.

Im Haushalt haben wir es mit kleinen Transformatoren zu tun. In der Industrie dagegen sind auch Hochleistungstransformatoren in Form großer elektrischer Anlagen anzutreffen. Da solche Transformatoren wegen der unvermeidlichen Energieverluste viel Wärme abgeben, sind sie oft als sogenannte Öltransformatoren ausgeführt, d. h., der Transformator Kern und die Wicklungen befinden sich in einem mit sogenanntem Transformatoröl gefüllten Kessel.

## Maschinen, die elektrischen Strom erzeugen

Maschinen, die mechanische Bewegung in elektrischen Strom verwandeln, wurden erstmals vor etwa 150 Jahren entwickelt.

Der erste Stromgenerator war die Faradaysche Maschine. Eine Drahtwindung rotierte im Feld von Permanentmagneten. Bald kam man auch auf die Idee (allerdings nicht Faraday!), die eine Windung durch eine Spule zu ersetzen und dadurch sämtliche EMK zu summieren, die in allen Windungen erzeugt werden. Erst 1851 wurden die Permanentmagnete durch Elektromagnete ersetzt, d. h. durch Wicklungen, die auf einem Eisenkern steckten. Es entstand der Terminus „Erregung der Maschine“, weil man den Elektromagnet erst einmal „zum Leben erwecken“ mußte, bevor die Maschine Strom lieferte. Anfangs wurde zur Erregung der Maschine die Wicklung des Elektromagneten durch eine Fremdstromquelle gespeist.

Die nächste Etappe war die Entdeckung des Prinzips der Selbsterregung der Maschine, demzufolge zur Erregung der Elektromagneten keine zusätzliche Stromquelle erforderlich war. Vielmehr genügte es, zur Erregung der Elektromagneten diese auf die eine oder andere Weise mit der Hauptwicklung der Maschine zu verbinden. Ende der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts schließlich gewann die elektrische Maschine jene Grundzüge, die bis zum heutigen Tag erhalten geblieben sind. Das einfachste Modell eines Gleichstromgenerators ist in Bild 4.5. dargestellt. Dreht man den Rahmen im Feld der Permanentmagneten, dann wird darin eine sinusförmige EMK induziert.

Will man jedoch statt Wechselstrom Gleichstrom erhalten, dann muß man die Maschine mit einer Spezialvorrichtung ausstatten, die als Kommutator bezeichnet wird. Der Kommutator besteht aus den beiden Halbringen *AB*, die gegeneinander isoliert und auf einen Zylinder

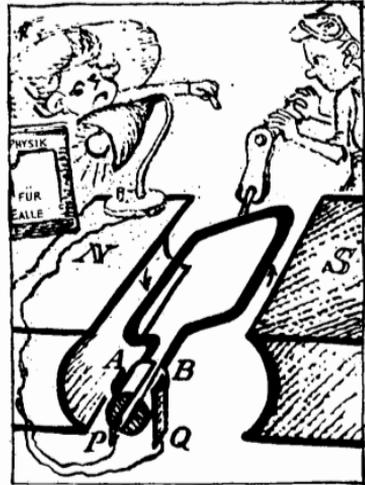


Bild 4.5.

gesteckt sind. (Bild 4.5.) Der Zylinder rotiert zusammen mit dem Rahmen. An den Halbringen greifen die Kontakte  $P$  und  $Q$  (Bürsten) an, mit deren Hilfe der Strom in den äußeren Kreis abgeleitet wird. Bei jeder halben Umdrehung des Rahmens erfolgt ein Kontaktwechsel. So kommt es, daß der Strom im äußeren Kreis seine Richtung nicht ändert, obwohl dessen Richtung im Rahmen selbst wechselt. Da nun der rotierende Teil einer realen Maschine aus einer großen Anzahl solcher „Rahmen“ besteht (in Wirklichkeit sind es natürlich Wicklungen), die relativ zueinander um einen bestimmten Winkel versetzt sind, während der Kommutator aus einer entsprechenden Anzahl von Lamellen aufgebaut ist, erhalten wir an den Bürsten der Maschine eine praktisch konstante EMK.

Heutzutage baut man Gleichstromgeneratoren für Leistungen von Bruchteilen eines Kilowatts bis zu einigen tausend Kilowatt. Große Generatoren setzt man zur Elektrolyse in der chemischen Industrie sowie in der Buntmetallurgie (Herstellung von Aluminium, Zink usw.) ein.

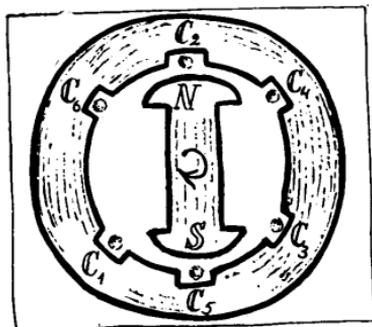
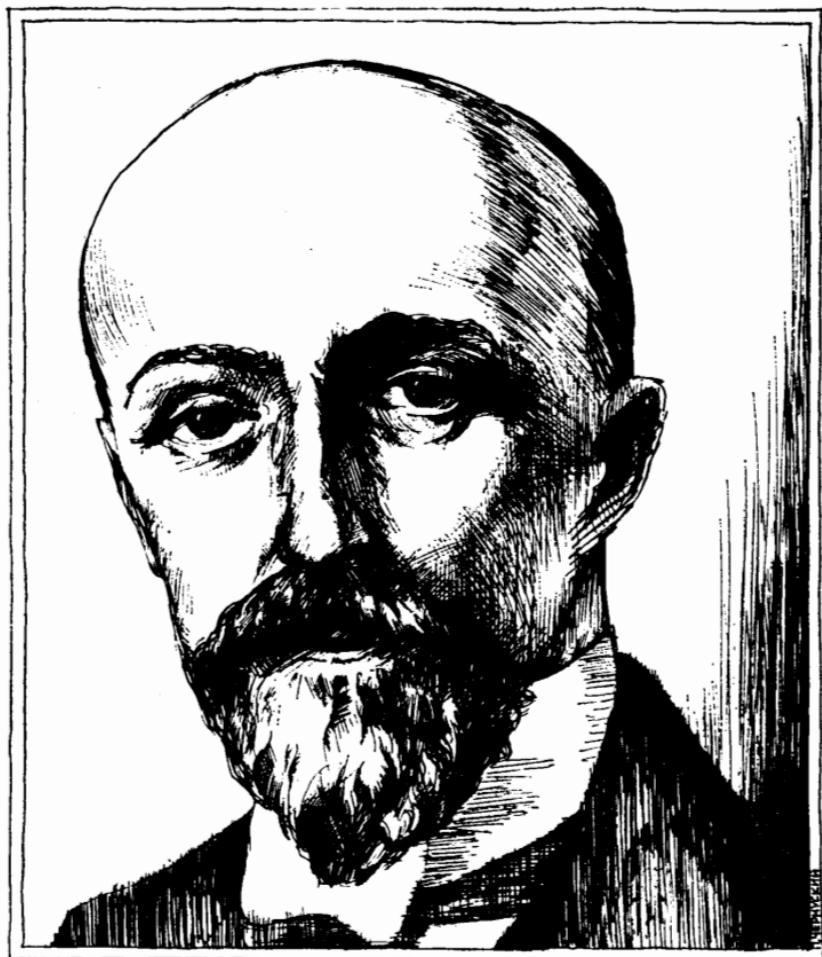


Bild 4.6.

Sie sind für große Ströme bei relativ geringen Spannungen (120 bis 200 Volt; 1000 bis 20 000 Ampere) ausgelegt. Gleichstromgeneratoren werden auch zur Elektroschweißung eingesetzt.

Gleichstromgeneratoren sind jedoch nicht die Hauptzeuger von elektrischer Energie. Nicht nur in der UdSSR, sondern auch in vielen anderen Ländern hat man sich hinsichtlich der Produktion und Verteilung von elektrischer Energie für die Verwendung eines Wechselstroms mit der Frequenz  $50 \text{ Hz}$  entschieden. Die Wechselstromgeneratoren werden so konzipiert, daß man gleichzeitig drei EMK gleicher Frequenz abgreifen kann, die sich jedoch in der Phase voneinander um den Winkel  $2\pi/3$  unterscheiden.

Die Prinzipdarstellung eines derartigen Drehstromgenerators zeigt Bild 4.6. In unserer Darstellung ist jede Spule durch immer nur eine Windung ersetzt. Die Leitungen der ersten Windung sind in unserem Bild mit  $C_1 - C_4$ , die der zweiten Windung mit  $C_2 - C_5$  und die der dritten Windung mit  $C_3 - C_6$  bezeichnet. Wenn der Strom bei  $C_1$  eintritt, dann tritt er bei  $C_4$  aus usw. (Zu bestimmten Zeitpunkten, die verschiedenen Stellungen von Läufer und Ständer relativ zueinander entsprechen, kann natürlich jeder der Anschlüsse der Ein- und Ausgang für den Strom sein.) In den ruhenden Windungen der Ständer-



**Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski (1862—1919)** — bedeutender russischer Wissenschaftler und Ingenieur, der das Drehstromsystem einführte, das noch heute der gesamten Elektrotechnik zugrunde liegt. Er entwickelte sämtliche wesentlichen Elemente, aus denen Drehstromkreise aufgebaut sind. 1888 baute er den ersten Drehstromgenerator mit umlaufendem Magnetfeld.

wicklung wird die EMK dadurch induziert, daß diese Windungen vom Magnetfeld des rotierenden Elektromagneten, also des Läufers, geschnitten werden. Bei Rotation des Läufers mit gleichförmiger Geschwindigkeit entstehen in den Phasenwicklungen des Ständers periodisch veränderliche EMK gleicher Frequenz, die sich jedoch wegen ihrer räumlichen Versetzung voneinander in der Phase um den Winkel  $180^\circ$  unterscheiden.

Die drei Windungen der Spule können in Stern- oder Dreieckschaltung geschaltet sein. Diese Schaltungen wurden von Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolsky (1862—1919) Anfang der neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts entwickelt und in die Praxis eingeführt. Bei Sternschaltung sind alle Wicklungsenden des Generators (d. h.  $C_4$ ,  $C_5$  und  $C_6$ ) im sogenannten Sternpunkt miteinander verbunden. Die Verbraucher sind mit dem Generator durch vier Leitungen verbunden, und zwar durch die drei Phasenleiter, die an den Wicklungen  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$  ihren Anfang nehmen, sowie den Nulleiter, der vom Sternpunkt des Generators ausgeht. Es handelt sich also um ein Vier-Leiter-System.

Die Spannung zwischen dem Sternpunkt und dem Phasenursprung wird als Phasenspannung bezeichnet. Die Spannung zwischen den Phasenursprüngen heißt Netzspannung. Beide Spannungen sind durch die Beziehung

$$U_L = \sqrt{3} U_{Ph}$$

miteinander verknüpft.

Sind die Lastwiderstände (I, II und III) aller drei Phasen gleich, dann ist die Stromstärke im Nulleiter gleich Null. In diesem Fall kann man den Nulleiter weglassen und zum Drei-Leiter-System übergehen. Die Sternschaltung ist in Bild 4.7. dargestellt.

Auch die Dreieckschaltung erlaubt ein Drei-Leiter-System. Dabei ist das Ende jeder Wicklung mit dem An-

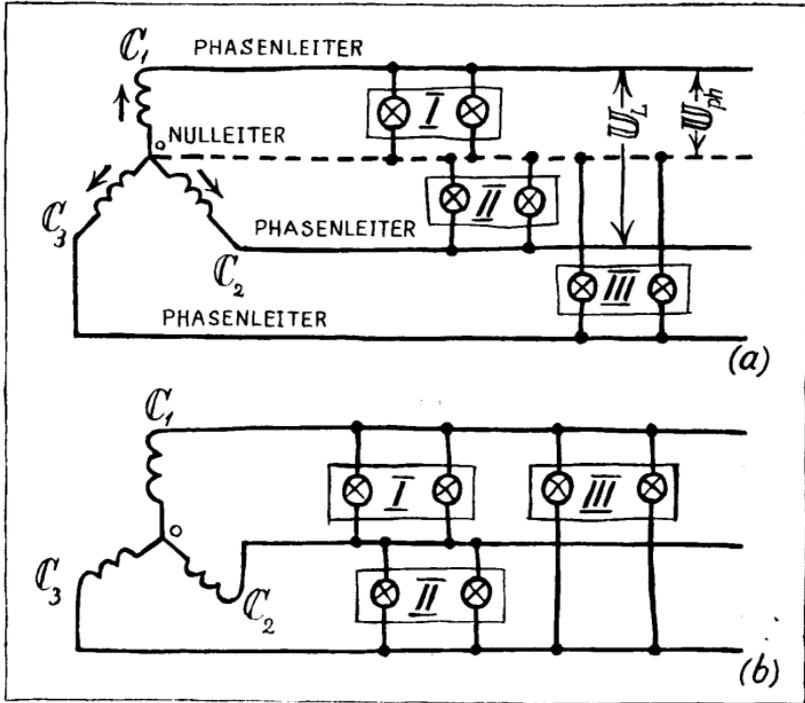


Bild 4.7.

fang jeder nächsten Wicklung so verbunden, daß die drei Wicklungen zusammen ein geschlossenes Dreieck bilden. Die Netzleiter werden an den Ecken des Dreiecks angeschlossen. Netz- und Phasenspannung sind hier gleich, während die Ströme durch die Beziehung

$$I_N = \sqrt{3} I_{Ph}$$

miteinander verknüpft sind.

Drei-Phasen-Systeme haben folgende Vorzüge: Die Energieübertragung erfolgt im Vergleich zu Ein-Phasen-Systemen wirtschaftlich. Weiter hat man die Möglich-

keit, aus einer Anlage zwei Spannungen — die Phasenspannung und die Netzspannung — zu entnehmen.

Der hierbeschriebene Wechselstromgenerator gehört zur Klasse der elektrischen Synchronmaschinen. Diese Bezeichnung tragen Maschinen, bei denen die Drehfrequenz des Läufers mit der Drehfrequenz des Ständermagnetfeldes zusammenfällt.

Synchrongeneratoren sind die wichtigsten Energieerzeuger; abhängig davon, wie ihre Läufer angetrieben werden, existieren einige konstruktive Ausführungen.

Die Frage nach Asynchronmaschinen bietet sich in diesem Zusammenhang förmlich an. Es gibt sie. Sie werden jedoch als Motoren benutzt, und wir werden im anschließenden Abschnitt darüber sprechen. Ebenso über die Frage, warum das Magnetfeld in einer Dreiphasen-Wechselstrommaschine rotiert.

## **Elektromotoren**

Über die Hälfte der erzeugten elektrischen Energie wird mit Hilfe von Elektromotoren in mechanische Energie umgewandelt, um den Bedarf von Industrie, Landwirtschaft, Verkehr und Haushalt abzudecken. Die größte Verbreitung hat der einfache, zuverlässige, billige und wartungsarme Asynchronmotor gefunden, der 1889 ebenfalls von dem Ingenieur Doliwo-Dobrowolsky entwickelt wurde. Seine Grundzüge wurden bis zum heutigen Tage bewahrt. Asynchronmotoren werden zum Antrieb aller möglichen Maschinen, Pumpen, Kompressoren, Schmiedepressen, Hub- und Fördereinrichtungen verwendet.

Als Urbild des Asynchronmotors dient das Modell von Dominique Arago (1786—1853). 1824 demonstrierte Arago in der Pariser Akademie der Wissenschaften eine Erscheinung, die er als „Magnetismus der Rotation“ bezeichnete. Er zeigte, daß eine Kupferscheibe in Drehung versetzt wird, wenn man sie in das Feld eines rotierenden

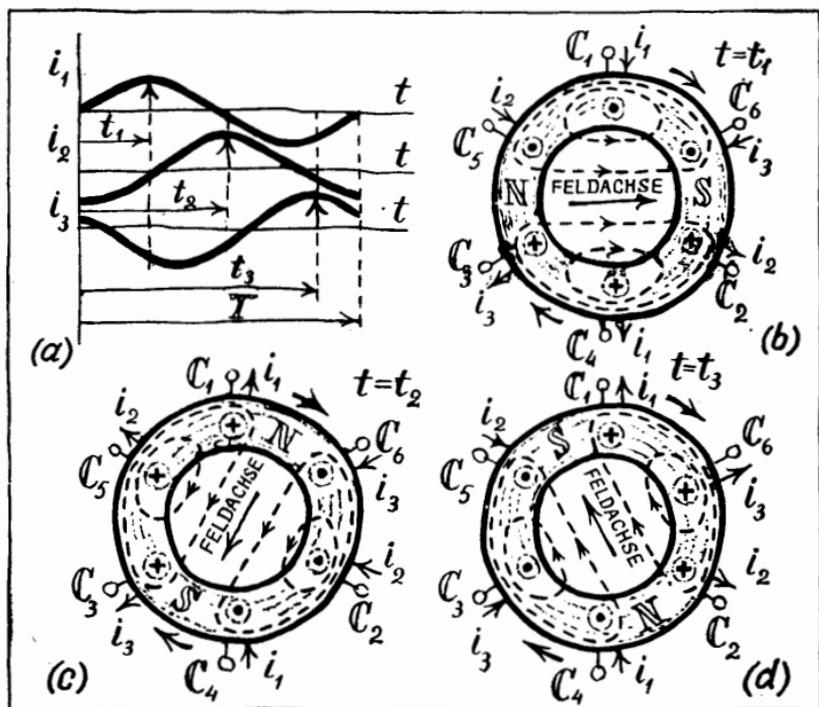


Bild 4.8.

Permanentmagneten bringt. Dieser Grundgedanke wurde in brillanter Weise von Doliwo-Dobrowolsky aufgegriffen, der sie mit den Besonderheiten des Dreiphasen-Systems verknüpfte, das die Herstellung eines rotierenden Magnetfeldes ohne jegliche Zusatzeinrichtungen erlaubte.

Betrachten wir die Prinzipdarstellung in Bild 4.8. Zur größtmöglichen Vereinfachung sind hier wiederum nur drei Windungen dargestellt. (In Wirklichkeit benutzt die Maschine natürlich Spulen mit einer großen Anzahl von Windungen.) Das Kreuz und der Punkt bezeichnen

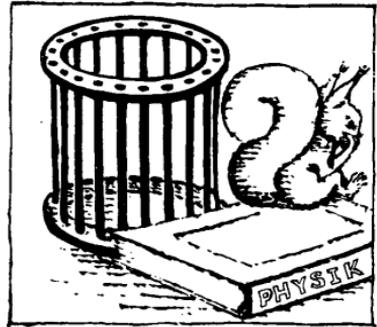


Bild 4.9.

den Ein- und Ausgang des Stroms in jeder Windung zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die drei Windungen schließen miteinander jeweils einen Winkel von  $120^\circ$  ein. In Bild 4.8a. sind die Phasenverhältnisse der drei Ströme  $i_1$ ,  $i_2$  und  $i_3$  dargestellt, die durch die Windungen fließen. Uns interessiert hier das resultierende Magnetfeld dieser drei Windungen. In Bild 4.8b. sind die Kraftlinien des resultierenden Feldes für den Zeitpunkt  $t_1$  (Eingang bei  $C_2$ ,  $C_3$  und  $C_4$ ) dargestellt; die analogen Entwicklungen enthalten die Bilder 4.8c. und d für die Zeitpunkte  $t_2$  und  $t_3$ . Wir sehen also, daß das uns interessierende Feld rotiert (beachten Sie die Lage der Kreuze), und zwar im wahrsten Sinne des Wortes! Die Achse des Feldes im Mittelpunkt des Systems verläuft in der Achse jener Windung (Phase), deren Strom zum betrachteten Zeitpunkt sein Maximum erreicht.

Die eben gebotene Darstellung zeigt, wie eine Dreiphasen-Wechselstromwicklung im Ständer eines Dreiphasen-Asynchronmotors angeordnet ist. Der Läufer (Bild 4.9.), der durch das rotierende Magnetfeld mitgenommen wird, ist kurzgeschlossen, d. h., wir können weder Anfang noch Ende der Wicklung erkennen. Der Läufer hat eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Laufrad für Eichhörnchen: Er besteht aus Stäben, die an jedem Ende mit einem Ring

untereinander verbunden sind. Vergleichen Sie dies mit der Gleichstrommaschine! Wieviel einfacher ist diese Konstruktion! An den Ständer wird Dreiphasen-Wechselstrom geführt. In der Maschine entsteht ein rotierendes Magnetfeld. Die magnetischen Kraftlinien dieses Feldes schneiden die Stäbe des Läufers und induzieren in diesen Stäben die entsprechenden Ströme. Infolge der Wechselwirkung zwischen dem jeweils stromdurchflossenen Stab und dem Magnetfeld beginnt der Läufer mit einer Geschwindigkeit zu rotieren, die der Rotationsgeschwindigkeit des Feldes nahekommt, sie jedoch nicht erreicht. Das muß auch so sein, da die Stäbe des Läufers im gegenteiligen Fall die magnetischen Kraftlinien des rotierenden Ständerfeldes nicht schneiden würden. Der Käfigläufer könnte dann gar nicht rotieren. Es leuchtet nun ein, warum solche Maschinen als Asynchronmaschinen bezeichnet werden. Das Zurückbleiben des Läufers wird als Schlupf bezeichnet.

Asynchronmotoren überdecken einen großen Bereich von Leistungen, von Bruchteilen eines Watts bis zu einigen hundert Kilowatt. Es gibt auch Asynchronmotoren mit noch höherer Leistung, nämlich bis zu 6000 kW bei einer Spannung von 6000 V.

Asynchron-Kleinstmaschinen setzt man im Bereich der Automatik als Stellmotoren zur Umwandlung elektrischer Signale in die mechanische Bewegung einer Welle ein, aber auch als Tachogeneratoren, die Drehbewegungen in ein elektrisches Signal umsetzen.

Als Elektromotoren können auch die bereits früher betrachteten Synchronmaschinen sowie die Gleichstrommaschinen verwendet werden. Dies folgt aus dem Umkehrbarkeitsprinzip elektrischer Maschinen, wonach jede elektrische Maschine als Generator und Motor funktionieren kann.

So gehört beispielsweise zum Kiewer Wasserkraftwerk am Dnepr auch ein Pumpspeicherwerk, das mit reversi-

blen Aggregaten ausgestattet ist. Sie können als Pumpen, aber auch als Turbinen betrieben werden. Bei einem überschüssigen Energieangebot im Netz drücken die Pumpenturbinen Wasser im Pumpenbetrieb in ein Speicherbecken. Die Synchronmaschine arbeitet dabei als Motor. In Spitzenzeiten wird das gespeicherte Wasser wieder „abgearbeitet“.

In metallurgischen Betrieben, Gruben und Kälteanlagen treiben Synchronmotoren Pumpen, Kompressoren, Lüfter und andere Mechanismen an, die mit konstanter Geschwindigkeit laufen müssen. Im Bereich der Automatik werden Synchron-Kleinstmotoren mit einer Leistung von Bruchteilen eines Watts bis zu einigen hundert Watt in großem Umfang verwendet. Da die Drehfrequenz dieser Motoren starr mit der Netzfrequenz verknüpft ist, werden sie überall dort eingesetzt, wo eine konstante Drehgeschwindigkeit eingehalten werden muß, also in elektrischen Uhrenanlagen, in den Bandzugmechanismen von Schreibern, in Filmprojektoren, im EDV-Bereich sowie in Systemen mit Synchronkopplung, wo die Drehgeschwindigkeit von Mechanismen durch Änderung der Speisespannungsfrequenz gesteuert wird.

Im grundsätzlichen Aufbau unterscheidet sich ein Gleichstrommotor nicht von einem Gleichstromgenerator. Die Maschine besitzt ein System ruhender Pole, deren Erregerwicklung mit der Ankerwicklung in Reihe oder parallelgeschaltet ist. Die Maschine kann auch fremderregt werden. Die Ankerwicklung ist in Nuten angeordnet und kann an eine Gleichstromquelle angeschlossen werden. Sowohl als Motor als auch als Generator besitzt die Gleichstrommaschine einen Kommutator, dessen Zweckbestimmung in der „Gleichrichtung“ des Drehmoments besteht, d. h., der Kommutator veranlaßt die Maschine, immer in eine Richtung zu laufen.

Hauptschluß-Gleichstrommotoren sind besonders zur Elektrotraktion sowie für Krane und Aufzüge geeignet.

Sie erfüllen die Forderung, daß die Drehfrequenz bei hohen Belastungen beträchtlich abfallen, das Anzugsmoment ansteigen muß.

Eben diese Eigenschaften besitzt der Hauptschluß-Gleichstrommotor.

In Rußland wurden die ersten Versuche zur nichtautonomen Elektrotraktion von Fjodor Apollonowitsch Pirozki (1845—1898) unternommen. 1876 richtete er ein normales Eisenbahngleis (durch isolierte Verlegung der beiden Schienen) so her, daß es zur Übertragung elektrischer Energie geeignet war; im August 1880 wurde dann eine elektrische Straßenbahn auf einer Versuchsstrecke im Gebiet des Roshdestwenski-Parks der Pferdebahn von Petersburg in Betrieb genommen. Als erster Triebwagen dieser elektrischen Straßenbahn wurde ein Doppelstockwagen der Pferdebahn verwendet, an dessen Wagenkasten die Aufhängung des Elektromotors erfolgte.

Die erste Straßenbahn in Rußland — es war in Kiew — wurde 1892 für den öffentlichen Verkehr freigegeben. Die Energiezufuhr erfolgte über einen Oberleitungsfahrdraht. Übrigens stimmte die Baukommission der elektrischen Straßenbahn erst zu, nachdem sie sich durch Berechnungen von den technischen Vorzügen der Elektrotraktion im Vergleich zur Pferdebahn angesichts des schwierigen Profils der Kiewer Straßen überzeugt hatte; die Überwindung der in Kiew häufigen Gefällestrecken war weder durch Pferde- noch durch Dampfkraft möglich.

Erste Versuche zur „Elektronavigation“ wurden von Moritz Hermann Jacobi (1801—1874) unternommen, der 1838 auf der Newa einen „elektrischen Kahn“ vorführte, der 14 Personen faßte. Der Antrieb erfolgte durch einen Elektromotor mit einer Leistung von 550 Watt. Zur Speisung dieses Motors benutzte Jacobi 320 galvanische Elemente. Dies war die erste Anwendung eines Elektromotors für Traktionszwecke in der Geschichte überhaupt.

In Presseveröffentlichungen der letzten Jahre taucht immer häufiger das Wort Turboelektroschiff auf. Der Sinn dieser Bezeichnung ist leicht zu erklären: Bei Schiffen dieser Art treibt der Dampf Gleichstromgeneratoren hoher Leistung an, während die Schiffsschrauben auf den Wellen von Elektromotoren sitzen. Warum so kompliziert? Wäre es nicht einfacher, die Schiffsschraube direkt auf die Turbinenwelle zu setzen?

Eine Dampfturbine entwickelt ihre maximale Leistung leider nur innerhalb eines engen Drehzahlbereichs. Hochleistungsturbinen schaffen in der Regel 3000 Umdrehungen pro Minute. Bei geringerer Drehzahl fällt die Leistung ab. Säßen nun die Schiffsschrauben direkt auf den Wellen der Turbinen, dann hätte ein mit diesem Antrieb ausgestattetes Schiff keine sonderlich guten Fahrteigenschaften. Ein Gleichstrommotor dagegen besitzt eine ideale Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie: Je größer der Widerstand ist, um so größer ist das erzeugte Anzugsmoment. Insbesondere kann ein Gleichstrommotor bei geringen Drehzahlen, d. h. beim Anfahren, eine große Leistung abgeben.

Der Gleichstromgenerator und der Gleichstrommotor, die zwischen der Turbine und der Schiffsschraube eines Turboelektroschiffs angeordnet sind, spielen somit die Rolle eines stufenlosen automatischen „Getriebes“ mit hervorragenden Eigenschaften. Es könnte scheinen, als sei dieses System aber etwas „sperrig“, doch würde angesichts der großen Antriebsleistungen moderner Turboelektroschiffe jede andere vergleichbare Anlage ebensoviel Platz erfordern, aber weniger zuverlässig sein.

Man kann den Antrieb eines Turboelektroschiffs auch auf andere Weise verbessern: Sehr vorteilhaft ist es, die platzaufwendigen Dampfkessel durch einen Kernreaktor zu ersetzen. Dabei wird auf Kosten des Treibstoffvolumens, das sonst für eine Reise erforderlich wäre, eine große Einsparung erzielt. Weltweit bekannt wurde der

erste sowjetische Eisbrecher mit Kernkraftantrieb „Lenin“. Die Kernkraftanlage dieses Turboelektroschiffs gewährleistet eine Fahrzeit ohne Betriebsstoffaufnahme von über einem Jahr.

Gleichstrommotoren finden wir in E-Loks der Fern- und Vorortbahnen, in den Triebwagen von Straßenbahnen sowie in Trolleybussen. Ihre Energieversorgung erfolgt durch ortsfeste Kraftwerke. Für die Elektrotraktion in der UdSSR wird Gleichstrom sowie Einphasenwechselstrom der Frequenz 50 Hz verwendet. In den Unterwerken der Straßenbahnen, Trolleybusse und Untergrundbahnen haben Siliziumgleichrichter in großem Umfang Verwendung gefunden. Was den Eisenbahnverkehr betrifft, so kann die Gleichrichtung des Stroms sowohl mit Hilfe von Unterwerken als auch in den E-Loks erfolgen.

# 5. Das elektromagnetische Feld

## Die Maxwell'schen Gleichungen

In den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts hatten sich viele Erkenntnisse über die Elektrizität und den Magnetismus angesammelt. Es waren aber Einzelerkenntnisse, die oft einander widersprachen und kein geschlossenes System darstellten.

Bekannt war aber schon eine ganze Menge. Zum ersten wußten die Physiker, daß ruhende elektrische Ladungen ein elektrisches Feld erzeugen, zum zweiten, daß elektrische Felder Magnetfelder erzeugen, und zum dritten waren die Ergebnisse der Experimente Faradays veröffentlicht und allgemein anerkannt worden. Faraday hatte nachgewiesen, daß ein magnetisches Wechselfeld elektrischen Strom erzeugt.

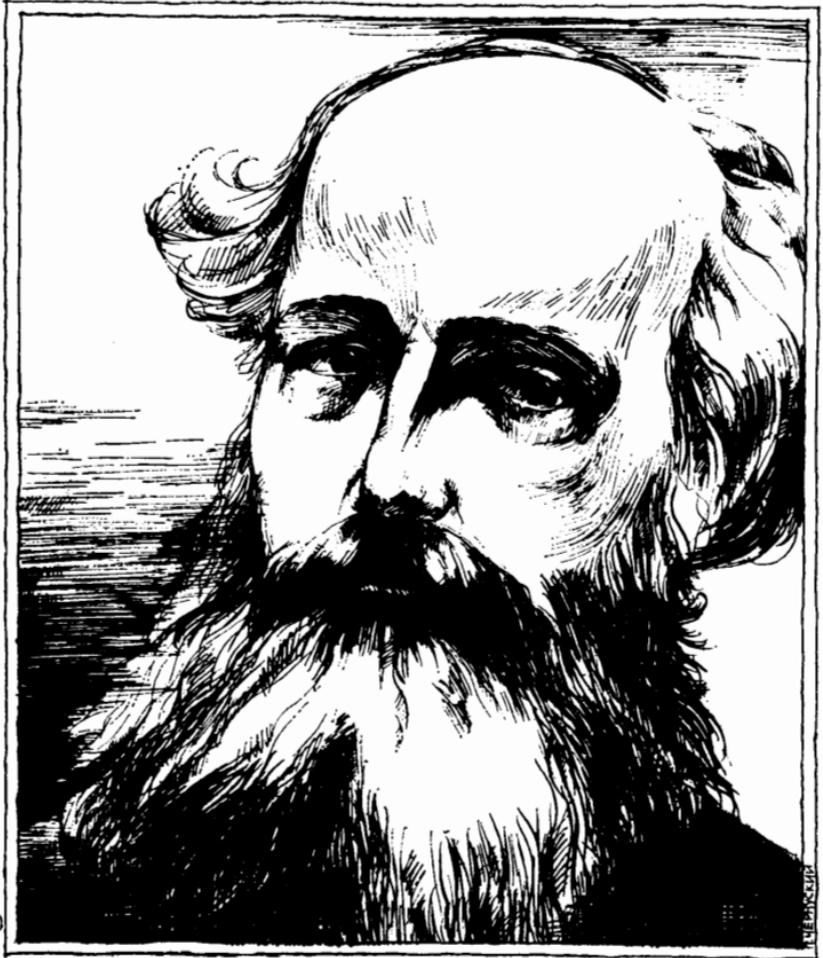
Viele damalige Wissenschaftler, in erster Linie Faraday selbst, waren überzeugt, daß in dem Raum, der elektrische Ströme und Ladungen umgibt, elektrische und magnetische Kräfte von einem Punkt zu einem anderen übertragen werden. Häufig waren Versuche „auf dem Papier“, ein Schema — ineinandergreifenden Zahnrädern vergleichbar — aufzuzeichnen, das anschaulich zeigte, worin der Übertragungsmechanismus elektrischer Energie besteht. Einige „Auch-Wissenschaftler“ predigten jedoch die „Fernwirkungs“theorie: sie glaubten an keinen physikalischen Prozeß der Übertragung elektrischer und magnetischer Kräfte. Man müsse, so sagten sie, die Begriffe Feld und Kraftlinien lediglich als geometrische Bilder auffassen, denen keine, wie auch immer geartete Realität entspreche.

Wie so oft in der Geschichte der Wissenschaft lag die Wahrheit „irgendwo dazwischen“: So zeigte sich, daß alle Versuche, die elektromagnetischen Erscheinungen auf Bewegungen einer besonderen Materieform — des „Äthers“ — zurückzuführen, gegenstandslos waren. Ebenso falsch war aber auch die Annahme, elektromagnetische Wechselwirkungen würden momentan von der einen Ladung zur anderen bzw. von einem Strom zum anderen übertragen.

Als der englische Wissenschaftler James Clerk Maxwell (1831—1879) seine Arbeit „Über die Faradayschen Kraftlinien“ veröffentlichte, war er 26 Jahre alt. Diese Arbeit bereits enthielt alles, was ihn später zu seinen berühmten Gleichungen führte. Es dauerte jedoch noch einige Jahre, bis er die Gesetze des elektromagnetischen Feldes unter Verzicht auf mechanistische Vorstellungen in einer Form darstellte, die keiner naiven grafischen Illustration bedurfte.

Maxwell selbst sagte darüber: „Zum Wohle der Menschen mit unterschiedlicher Denkweise muß die wissenschaftliche Wahrheit in verschiedener Form dargestellt werden und gleichermaßen als wissenschaftlich gelten, ob ihre Darstellung nun in der klaren Form und den lebendigen Farben der physikalischen Illustration oder in der einfachen und farblosen Sprache von Symbolen erfolgt“.

Maxwells Gleichungen gehören zu den allgemeinen Grundgesetzen der Natur, die nicht aus logischen Überlegungen und mathematischen Berechnungen hergeleitet werden. Die allgemeingültigen Gesetze der Natur sind Verallgemeinerungen unseres Wissens. Naturgesetze werden entdeckt, werden gefunden ... Für den Wissenschaftshistoriker und den Psychologen ist es von großem Interesse, den Weg der Ideen und schöpferischen Eingebungen zu verfolgen, der das Genie zur Entdeckung eines Naturgesetzes führt. Aber das wäre ein anderes Buch. Verfol-



**James Clerk Maxwell (1831—1879)** — berühmter englischer Wissenschaftler und Begründer der theoretischen Thermodynamik. Die Maxwell'schen Gleichungen beschreiben das Verhalten elektromagnetischer Wellen und des elektromagnetischen Feldes unabhängig von deren Ursprung. Maxwell schuf die elektromagnetische Theorie des Lichts. Aus seinen Gleichungen ergab sich zwingend

gen wir nun die Entstehung der Maxwellschen Gleichungen.

Welche Kenntnisse standen Maxwell zu Gebote, als er sich das Ziel setzte, jene Gesetze, denen das Verhalten der elektrischen und der magnetischen Felder gehorcht, durch Symbole auszudrücken?

Zunächst einmal wußte er, daß man jeden Raumpunkt in der Nähe einer elektrischen Ladung durch einen Vektor der elektrischen Kraft (der Feldstärke) und jeden Punkt in der Nähe eines elektrischen Stroms durch den Vektor der magnetischen Kraft kennzeichnen kann.

Sind aber ruhende Ladungen die einzigen Quellen eines elektrischen Feldes? Sind elektrische Ströme die einzigen Quellen eines Magnetfeldes?

Maxwell verneint beide Fragestellungen und verfolgt bei seiner Suche nach den Gesetzen des elektromagnetischen Feldes diesen Weg.

Faraday hatte gezeigt, daß in einer Leiterschleife, die von einem veränderlichen (wechselnden) Fluß magnetischer Kraftlinien durchdrungen wird, ein elektrischer Strom entsteht. Ein Strom wird indessen dann erzeugt, wenn elektrische Ladungen dem Angriff einer elektrischen Kraft ausgesetzt sind. Faradays Gesetz läßt sich dann auch wie folgt ausdrücken: In einer von einem veränderlichen magnetischen Fluß durchdrungenen Leiterschleife entsteht ein elektrisches Feld.

Aber ist es eigentlich so wesentlich, daß der magnetische Fluß von einer Leiterschleife umschlossen wird? Sollte es dem elektrischen Feld nicht gleichgültig sein,

---

die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts. Desgleichen flossen aus Maxwells Theorie der Zusammenhang zwischen elektrischer Permeabilität und Brechungsindex, die Orthogonalität des elektrischen und des magnetischen Vektors in der Welle sowie die Existenz des Lichtdrucks. Groß war Maxwells Beitrag zur kinetischen Gastheorie; ihm gelang die Ableitung der Geschwindigkeitsverteilung von Gasmolekülen.

wo es entsteht, in einem metallischen Leiter oder im leeren Raum? Wenn dem so wäre, müßte folgendes gelten: In der Nähe eines veränderlichen Flusses magnetischer Kraftlinien entsteht eine geschlossene elektrische Kraftlinie. Damit sind die beiden ersten Maxwellschen Gesetze, die das elektrische Feld betreffen, bereits formuliert. Wir stellen fest, daß das elektrische Feld auf zwei verschiedenen Wegen erzeugt wird: durch elektrische Ladungen (in diesem Fall entspringen die Kraftlinien in positiven und münden in negativen Ladungen) und durch ein magnetisches Wechselfeld (in diesem Fall ist die elektrische Kraftlinie geschlossen und umfaßt den veränderlichen magnetischen Fluß).

Suchen wir nun jene Gesetze, die für das magnetische Feld gelten. Ein Magnetfeld wird durch Ströme erzeugt — Maxwell wußte das. Gleichstrom ist die Quelle eines konstanten magnetischen Feldes, Wechselstrom läßt dagegen ein magnetisches Wechselfeld entstehen. In einem Leiter wird ein Wechselstrom jedoch durch ein elektrisches Wechselfeld erzeugt. Was wäre denn nun, wenn es gar keinen Leiter gäbe, sondern nur ein elektrisches Wechselfeld, das im leeren Raum existiert? Ist es da nicht logisch anzunehmen, daß in der Nähe eines veränderlichen elektrischen Kraftlinienflusses eine geschlossene magnetische Kraftlinie entsteht? Dieses Bild ist seiner Symmetrie wegen bestechend: Der veränderliche magnetische Fluß erzeugt das elektrische Feld und der veränderliche elektrische Fluß das Magnetfeld.

Den beiden Gesetzen, die für das elektrische Feld gelten, gesellen sich also zwei weitere Gesetze hinzu, die das Verhalten des magnetischen Feldes bestimmen. Das Magnetfeld besitzt keine Quellen (es gibt keine magnetischen Ladungen), und so besagt das dritte Gesetz, daß das Magnetfeld von elektrischen Strömen sowie — und das ist das vierte Gesetz — durch ein elektrisches Wechselfeld erzeugt wird.

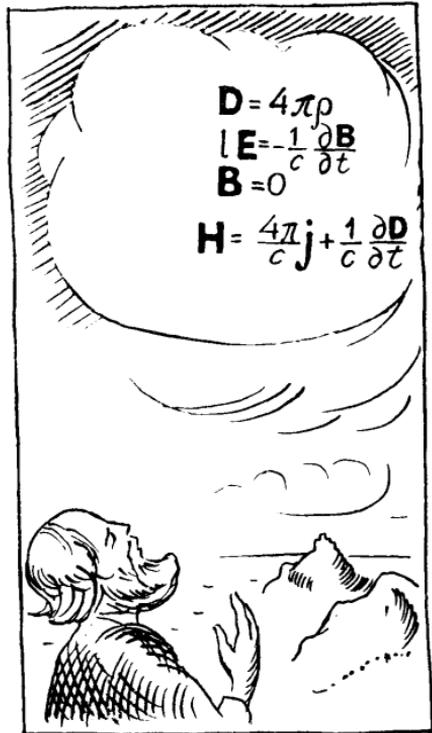


Bild 5.1.

Die vier Maxwellschen Gesetze können in Gestalt mathematischer Gleichungen elegant aufgeschrieben werden. Es ist schade, daß ich Ihnen den Sinn dieser Darstellung hier nicht erklären kann; dafür bedarf es solider mathematischer Kenntnisse. (Bild 5.1.)

Aus den Maxwellschen Gleichungen geht hervor, daß kein magnetisches Wechselfeld ohne ein elektrisches Feld und kein elektrisches Wechselfeld ohne ein Magnetfeld existieren kann. Das ist der Grund, warum wir vom elektromagnetischen Feld sprechen.

Sobald wir uns von den Ladungen entfernen, die die Quellen des elektromagnetischen Feldes sind, haben wir

es mit elektromagnetischer Materie in reiner Form zu tun. Es bedarf nicht unbedingt einer Betrachtung von Kraftlinienbündeln. Die Maxwell'schen Gleichungen lassen sich so formulieren, daß man sie auf einen Raumpunkt anwenden kann. Sie nehmen dann eine besonders einfache Form an: In jedem Punkt, in dem sich ein elektrischer Vektor in der Zeit ändert, existiert auch ein Vektor des Magnetfeldes, der sich ebenfalls in der Zeit ändert.

Und wenn unsere Überlegungen nur blanke Phantasterei sind? Schließlich ist die Messung der rasch veränderlichen Vektoren des elektrischen und magnetischen Feldes in einem Punkt eine praktisch unlösbare Aufgabe.

Sehr richtig! Doch die Bedeutung von Naturgesetzen wird anhand der Folgerungen beurteilt, die sich aus ihnen ableiten lassen. Und solche Folgerungen gibt es unzählige. Es ist nicht übertrieben, wenn man behauptet, daß in den Maxwell'schen Gleichungen die gesamte Elektrotechnik und Elektronik enthalten sind.

Über eine wichtige Folgerung aus den Maxwell'schen Gleichungen soll an dieser Stelle berichtet werden. Es kann mathematisch streng nachgewiesen werden, daß elektromagnetische Strahlung existiert.

In einem begrenzten Raumbereich sollen Ladungen und Ströme vorhanden sein. In diesem System können alle möglichen energetischen Umwandlungen ablaufen. Mechanische oder chemische Stromquellen erzeugen elektrische Ströme, und die Ströme ihrerseits können Mechanismen antreiben bzw. Wärme erzeugen, die an den Leitern freigesetzt wird. Nehmen wir nun eine Gewinn- und eine Verlustrechnung vor, dann sehen wir, daß sie nicht aufgehen! Die Berechnungen zeigen vielmehr, daß ein gewisser Energieanteil aus unserem System in den Raum hinausgegangen ist.

Kann nun die Theorie etwas über diese „abgestrahlte“ Energie sagen? Sie kann! Die Lösung der entsprechenden Gleichung hat in der Nähe der Quelle zwar eine kompli-

zierte Form, doch in Entfernungen, die weit über die Größe des „strahlenden“ Systems hinausgehen, wird das Bild überaus klar, und — was die Hauptsache ist — experimentell nachprüfbar.

In großen Entfernungen kann die elektromagnetische Strahlung — so wollen wir jenes Energiedefizit bezeichnen, das in einem System bewegter Ladungen auftritt — an jedem Punkt des Raums durch ihre Ausbreitungsrichtung gekennzeichnet werden. Und in dieser Richtung breitet sich die elektromagnetische Energie mit einer Geschwindigkeit von rund 300 000 km/s aus. Diese Zahl ergibt sich aus der Theorie.

Und nun die zweite Schlußfolgerung aus der Theorie: Die elektrischen und magnetischen Vektoren stehen senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung der Welle und auch senkrecht aufeinander. Zum dritten schließlich nimmt die Intensität der elektromagnetischen Strahlung (d. h. die Energie, die auf die Einheit der Fläche entfällt) umgekehrt proportional zum Abstandsquadrat ab.

Da zu jener Zeit bereits bekannt war, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts den 300 000 km/s entspricht, die für die elektromagnetische Strahlung errechnet worden waren, und da man aufgrund der Polarisation des Lichts wußte, daß die Lichtenergie gewisse „transversale“ Eigenschaften haben muß, gelangte Maxwell zu dem Schluß, daß Licht eine Form der elektromagnetischen Strahlung ist.

Ende der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts, also rund ein Jahrzehnt nach Maxwells Tod, lieferte der deutsche Physiker Heinrich Hertz (1857—1894) die experimentelle Bestätigung der Maxwellschen Theorie. Von hier an und für alle Zeiten gehören die Maxwellschen Gleichungen zu den wenigen Eckpfeilern, auf denen das Gebäude der Naturwissenschaften ruht.

## Mechanische Strahlungsmodelle

Mechanische Modelle sind das Gegenstück mathematischer Modelle. Mechanische Modelle lassen sich mit Hilfe von Kugeln, Federn, Saiten, Gummifäden und dergleichen realisieren. Ein mechanisches Modell ist hilfreich, wenn man eine Erscheinung „sichtbar“ machen will. Durch Entwicklung eines mechanischen Modells und die Vorführung seiner Funktion liefern wir eine „Verständnishilfe“, indem wir sagen: Seht her, das Verhalten dieser Größe ist der Lageänderung dieser Komponente des mechanischen Modells analog. Doch längst nicht jedem mathematischen Modell läßt sich auch ein mechanisches Modell gegenüberstellen.

Bevor wir nun weiter über die elektromagnetische Strahlung sprechen, deren Existenz durch unzählige Versuche bestätigt ist und sich mit „eiserner Logik“ aus den Maxwellschen Gleichungen ergibt, wollen wir uns über mögliche mechanische Strahlungsmodelle unterhalten.

Es gibt zwei Modelle: Teilchen- und Wellenmodell.

Man könnte ein Modell herstellen, das nach allen Richtungen Ströme kleiner Partikeln „aussendet“. Das wäre dann das Teilchenmodell; man spricht in diesem Zusammenhang auch von Korpuskularstrahlung.

Ein Teilchen, das sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt und eine bestimmte Masse besitzt, muß in seinem Verhalten den Gesetzen der Mechanik gehorchen. Teilchen können zusammenstoßen und ihre Richtung ändern, doch muß dies stets so erfolgen, daß bei jedem Zusammenstoß Energie und Impuls erhalten bleiben. Bestimmte Körper können für die betrachteten Teilchen undurchlässig sein, und dann müssen die Teilchen an ihnen reflektiert werden; dabei gilt das Gesetz: Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel. Teilchen können auch von dem Medium absorbiert werden, in dem sie sich

fortbewegen. Fällt den betrachteten Teilchen die Bewegung in dem einen Medium leichter als in einem anderen, dann läßt sich auch die Brechung leicht erklären. Treten Teilchen durch eine Öffnung in einem sonst undurchlässigen Schirm, dann muß der von dieser punktförmigen Quelle ausgehende Teilchenstrom kegelförmig sein. Allerdings kann eine geringfügige Streuung auftreten, da ein kleiner Anteil der Teilchen am Öffnungsrand reflektiert werden kann. Freilich können solche „Reflexionen“ nur chaotisch sein und kein gesetzmäßiges Bild liefern, das über die Grenzen des geometrischen Schattens hinausgeht.

Das Wellenmodell wird gewöhnlich mit Hilfe eines Wasserbads vorgeführt. Wasser wird an einem bestimmten Punkt zu periodischen Schwingungen veranlaßt. Von diesem Punkt gehen dann analog einem ins Wasser geworfenen Stein Kreise aus. Die Wellenform der Wasseroberfläche ist ohne weiteres wahrzunehmen. Die Energie breitet sich nach allen Seiten aus, und ein in großer Entfernung auf der Wasseroberfläche liegender Holzspan gerät nach einiger Zeit ebenfalls in Schwingungen, und zwar mit der gleichen Frequenz wie der Punkt, von dem aus wir die Energie zuführen.

Schallschwingungen sind schwieriger sichtbar zu machen. Es lassen sich jedoch überzeugende Versuche durchführen, die zeigen, daß die Schallausbreitung nichts anderes ist als die Übertragung mechanischer Lageänderungen des Mediums von Punkt zu Punkt.

Eine ganze Reihe von Erscheinungen wird durch das Wellen- sowie Korpuskelmodell gleichermaßen gut erklärt. Doch beide Modelle sind nur unter einer weiteren Bedingung gleich gut geeignet: Eine Welle verhält sich wie ein Teilchenstrom, wenn Hindernisse und Öffnungen auf ihrem Weg viel kleiner sind als die Wellenlänge.

Wie wir ohne Mühe aus der zur Beschreibung des Wellenmodells notwendigen Grundformel  $c = \nu\lambda$  aus-

rechnen können, entspricht der mittleren Frequenz der menschlichen Stimme von 100 Hz eine Wellenlänge von 30 cm. Passiert eine derartige Welle Öffnungen mit einem Durchmesser im Meterbereich, dann „läuft sie um die Ecke“. Handelt es sich jedoch um eine Öffnung in der Größenordnung eines Zentimeters, dann kann man von einem Schallstrahl sprechen, der die Öffnung nur dann passiert, wenn die Verbindungsgerade zwischen Schallquelle und -empfänger durch diese Öffnung verläuft.

Wenn in einem Zimmer mit offenen, aber sehr hochgelegenen Fenstern ein Radio läuft, kann man es auf der Straße hören. Sind die Fenster jedoch fest verschlossen und die Wände stabil, kann der Schall nur durchs Schlüsseloch austreten. Auch der empfindlichste Empfänger kann das Schallsignal jetzt nur empfangen, wenn die Schallquelle, also die Öffnung in der Tür, und der Empfänger auf einer Geraden liegen. Die Schallenergie breitet sich in diesem Fall wie ein Teilchenstrom aus.

Sowohl durch Überlegungen als auch experimentell in einem Wasserbad läßt sich nachweisen, daß das Reflexionsmodell im Fall von Wandungen, deren Rauigkeit kleiner als die Wellenlänge ist, auch für das Wellenmodell eingehalten wird.

Wie der Schall oder eine beliebige andere Welle an einer ebenen, glatten Oberfläche reflektiert wird, weiß jeder. Interessante Probleme tauchen dann auf, wenn die reflektierende Oberfläche gekrümmt ist.

Ein Beispiel: Wie muß die Oberfläche beschaffen sein, wenn die von einer punktförmigen Quelle ausgehende Welle erneut in einem Punkt vereinigt werden soll? Die Form der reflektierenden Oberfläche muß so sein, daß Strahlen, die, von einem Punkt ausgehend, unter verschiedenen Winkeln auf dieser Oberfläche auftreffen, erneut in einen Punkt reflektiert werden. Wie sieht nun diese Oberfläche aus?

Hier müssen wir an die Eigenschaften einer bemerkenswerten Kurve erinnern, die man unter der Bezeichnung „Ellipse“ kennt. Die Summe der Entfernungen von einem Brennpunkt der Ellipse zu einem Punkt auf der Kurve und von hier aus zum anderen Brennpunkt der Ellipse ist für alle Kurvenpunkte einer Ellipse gleich. Nun stellen Sie sich einmal vor, daß die Ellipse um ihre Hauptachse rotiert, dann beschreibt die rotierende Kurve eine Fläche, die als Ellipsoid bezeichnet wird. (In der Form erinnert das Ellipsoid an ein Ei.) Die Ellipse weist folgende Eigenschaft auf: Zeichnet man in eine Ellipse einen Winkel ein, dessen Spitze sich in einem Punkt der Ellipse befindet und dessen Schenkel durch die Brennpunkte der Ellipse gehen, so ist die Winkelhalbierende dieses Winkels stets die Normale in dem betreffenden Ellipsenpunkt. Also muß eine Welle oder ein Korpuskelstrahl, der aus einem Brennpunkt der Ellipse entspringt, nach erfolgter Reflexion im anderen Brennpunkt münden.

Für Schallwellen können Decken und Wände gemeinhin als glatt (eben) gelten. Ist die Decke jedoch gewölbt, dann läßt sich in dem betreffenden Raum ein Sonderfall der Schallreflexion beobachten. Da ein Deckengewölbe fast ellipsenförmig ist, muß Schall, der von einem der Brennpunkte ausgeht, im anderen Brennpunkt eintreffen. Diese Eigenschaft gewölbter Flächen war bereits im Altertum bekannt. Im Mittelalter, zu Zeiten der Inquisition, nutzte man sie zum Belauschen vertraulicher Gespräche. Zwei Leute tauschten im Flüsterton ihre Gedanken aus, ohne zu ahnen, daß sie von dem vor sich hindösenden Mönch in der anderen Ecke der Schenke belauscht wurden. (Bild 5.2.)

Sowohl das Teilchen- als auch das Wellenmodell sind gleichermaßen geeignet, diese Erscheinung zu erklären. Wie aber steht es mit dem Zusammenprall von Billardkugeln? Das Wellenmodell ist außerstande, dies zu erklären.

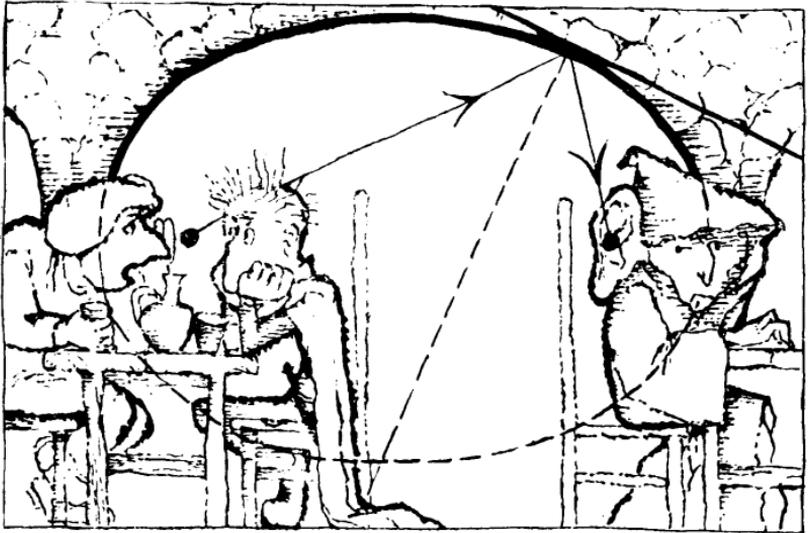


Bild 5.2.

Andererseits existiert eine Reihe wichtiger Tatsachen, mit denen das Korpuskularmodell nicht „fertig werden“ kann.

Vor allem gilt dies für die Interferenz, d. h. eine Addition, bei der die Summe kleiner sein kann als die Summanden und gelegentlich sogar den Wert Null annimmt. Treffen zwei Wellen in einem Punkt ein und addieren sich, dann spielt ihre Phasendifferenz in diesem Punkt die entscheidende Rolle. Trifft dabei ein Wellenberg auf einen anderen, dann kommt es zur Addition beider Wellen. Trifft jedoch ein Wellenberg auf ein Wellental und sind die Amplituden beider Wellen gleich, dann ist das Ergebnis der Addition gleich Null. Die in diesem Punkt eintreffenden Wellen löschen einander aus. Bei der Überlagerung zweier Wellenfelder kommt es an bestimmten Orten zu ihrer arithmetischen Addition, an anderen Orten dagegen zur Subtraktion. Diese Erscheinung wird

als Interferenz bezeichnet. Und das ist zugleich die erste Erscheinung, die sich in der Sprache von Partikelströmen absolut nicht interpretieren läßt. Verhielte sich Strahlung wie ein Strom kleiner Teilchen, dann müßten sich Felder bei Überlagerung stets und überall gegenseitig verstärken.

Und nun die zweite wichtige Erscheinung, die Beugung, d. h. die Fähigkeit, um Hindernisse „herumzugehen“. Ein Partikelstrom kann sich so nicht verhalten, während eine Welle genau dieses Verhalten zeigen muß. Als Schulversuch wird die Beugung wiederum im Wasserbad vorgeführt. Setzt man in das Wasserbad eine Zwischenwand mit einer Öffnung ein, dann sieht man, wie die Welle „um die Ecke“ geht. Die Ursache dieser Erscheinung ist ganz natürlich. In der Ebene der betrachteten Öffnung sind die Wasserpartikeln in den Schwingungszustand geraten. Damit erzeugt jeder Punkt, der in der Öffnungsebene liegt, eine Welle, die genau die gleichen Rechte hat wie eine primäre Strahlungsquelle. Und nichts hindert diese Sekundärwelle daran, „um die Ecke zu biegen“.

Interferenz und Beugung lassen sich ohne Schwierigkeiten demonstrieren, sofern man die obenerwähnte Bedingung einhält: Die Wellenlänge muß größer sein als das Hindernis bzw. die Öffnung, oder beide müssen in der gleichen Größenordnung liegen. Wir werden diese Bedingung im nächsten Band präzisieren und auch ausführlicher über Beugung und Interferenz sprechen.

Nun aber noch einige Worte zur Frequenzänderung einer Welle, die der Beobachter bei bewegter Strahlungsquelle wahrnimmt. Daß diese Erscheinung eine notwendige Folgerung aus dem Wellenmodell ist, hat Christian Doppler (1803—1853) bereits zu einer Zeit nachgewiesen, als die theoretische Physik noch in den Kinderschuhen steckte.

Wir wollen hier die Dopplersche Formel ableiten, die wir später noch brauchen werden. Zur Veranschaulichung stellen wir uns vor, an einer Bahnschranke zu stehen,

während eine Lokomotive vorüberfährt und dabei ein Pfeifsignal gibt. Beim Näherkommen der Lokomotive hören wir einen hohen Ton, der erheblich tiefer klingt, sobald die Lokomotive an uns vorbeigefahren ist. Diese Erscheinung erklärt sich einfach, denn im Ohr des Beobachters treffen je Zeiteinheit mehr Verdichtungen der Luft ein, wenn sich die Schallquelle dem Beobachter nähert, während ihre Anzahl nach Vorüberfahren des Zugs kleiner wird. Dafür gilt das Verhältnis  $(c + u)/u$ ; darin ist  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle und  $u$  die Relativgeschwindigkeit von Schallquelle und Beobachter.

Infolgedessen gilt

$$v' = v \left( 1 + \frac{u}{c} \right).$$

Die wahrgenommene Frequenz  $v'$  wächst also, wenn sich Schallquelle und Beobachter einander nähern (die Tonhöhe ist größer, es gilt  $u > 0$ ), und sinkt, wenn sich beide voneinander entfernen (die Tonhöhe ist geringer, es gilt  $u < 0$ ). Vorgreifend können wir an dieser Stelle sagen, daß diese Folgerung bei Anwendung auf die Lichtwelle lautet: Entfernt sich die Lichtwelle vom Beobachter, so tritt eine „Rotverschiebung“ ein. Die Bedeutung dieser Schlußfolgerung wird klar, sobald wir auf die Beobachtung von Spektren weitentfernter Sterne zu sprechen kommen.

Bis in die zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts wurde immer wieder darüber gestritten, ob die eine oder andere Form der Energieübertragung Wellen- oder Korpuskularcharakter habe. Die Erfahrung lehrt, daß jegliche Strahlung stets zwei Aspekte aufweist. Und nur die Kombination dieser beiden Aspekte spiegelt die Wirklichkeit richtig wider. Diese Tatsache wurde durch die Theorie in den Rang eines Grundgesetzes der Natur erhoben. Wellenmechanik, Quantenmechanik oder Quantenphysik

sind nur äquivalente Bezeichnungen der heute geltenden Theorie, die das Verhalten von Feldern und Teilchen beschreibt.

### **Die beiden Aspekte des elektromagnetischen Feldes**

Elektromagnetische Strahlung verhält sich in bestimmten Fällen wie eine Welle, in anderen Fällen wie ein Teilchenstrom.

Diesbezüglich haben die Maxwellschen Gleichungen einen „Mangel“. Sie beschreiben nur den Wellenaspekt der elektromagnetischen Strahlung.

In völliger Übereinstimmung mit dem Experiment führt uns die Lösung der Maxwellschen Gleichung zu dem Schluß, daß man sich elektromagnetische Strahlung stets als eine Summe von Wellen unterschiedlicher Wellenlängen und Intensitäten vorstellen kann. Stellt das emittierende System einen elektrischen Strom streng festgelegter Frequenz dar, dann ist die Strahlung eine „monochromatische“ (einfarbige) Welle.

In Bild 5.3. ist eine elektromagnetische Welle dargestellt. Um sich die Änderungen vorzustellen, die bei Ausbreitung elektromagnetischer Energie im Raum stattfinden, muß man diese Darstellung als in sich starres Ganzes in Richtung der Abszisse „ziehen“.

Das Bild stellt eine Lösung der Maxwellschen Gleichungen dar. Es zeigt zugleich, warum wir von elektromagnetischen Wellen sprechen dürfen. Bei Benutzung dieses Terminus und bei der Herstellung von Analogien zwischen der elektromagnetischen Welle und einer Welle, wie sie sich im Wasser ausbreitet, nachdem man einen Stein hineingeworfen hat, ist jedoch größte Vorsicht geboten. Anschauliche Bilder führen leicht zu Irrtümern. Die Welle im Wasser ist nur ein Modell der elektromagnetischen Welle. Das heißt, elektromagnetische Wellen

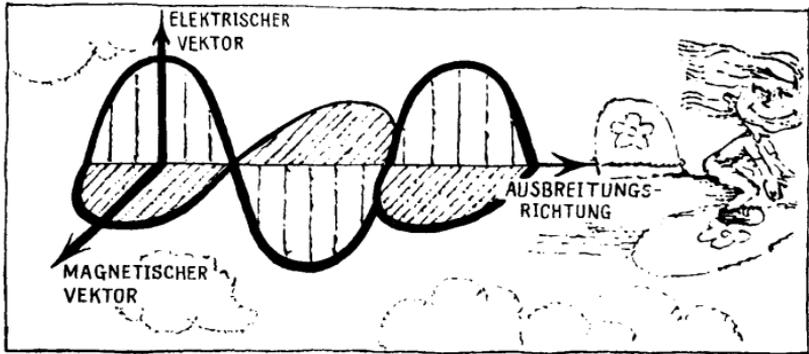


Bild 5.3.

und Wasserwellen zeigen nur in bestimmten Beziehungen das gleiche Verhalten.

Aber ist es nicht so, daß Bild 5.3., das eine elektromagnetische Welle zeigt, „aufs Haar“ einer Meereswelle gleicht, die ein im Wasser schwimmendes Holzstück einmal emporträgt und dann wieder hinuntersinken läßt? Nichts dergleichen! Denken Sie sich in den Inhalt des Bildes hinein. Auf der Ordinate ist der Vektor des elektrischen Feldes abgetragen, keineswegs eine Lageänderung im Raum!

Jeder Punkt auf der Abszisse gibt an, daß eine elektrische Ladung, die sich an diesem Punkt befände, der Wirkung jener Kraft ausgesetzt wäre, die durch den Betrag der Ordinate angegeben wird. Bei „Wanderung“ einer elektromagnetischen Welle rührt sich im Grunde genommen überhaupt nichts „vom Fleck“. Und einen Versuch durchzuführen, der uns anschaulich zeigen könnte, wie sich die Werte einer elektromagnetischen Welle an einem bestimmten Punkt ändern, ist selbst bei sehr langsamen Schwingungen praktisch unmöglich.

Unsere Vorstellungen von der elektromagnetischen Welle haben also theoretischen Charakter. Daß wir so

sicher von der Existenz elektromagnetischer Wellen sprechen, hat seinen Grund darin, daß wir ja auch Radio hören. Wir zweifeln nicht im mindesten daran, daß elektromagnetische Wellen ganz bestimmte Frequenzen besitzen, weil wir unseren Rundfunkempfänger zum Empfang eines bestimmten Senders auf eine ganz bestimmte Frequenz einstellen müssen. Wir sind überzeugt davon, daß der „Längenbegriff“ auf elektromagnetische Wellen angewendet werden darf, nicht etwa nur aus dem Grund, weil wir die Geschwindigkeit der Welle messen und ihre Wellenlänge mit Hilfe der Gleichung  $c = \nu \lambda$  (die Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit miteinander verknüpft) ausrechnen können, sondern auch deshalb, weil wir die Länge einer elektromagnetischen Welle durch Beugungsuntersuchungen ermitteln können, wobei die Prinzipien entsprechender Messungen die gleichen sind wie bei Wellen, die sich auf dem Wasser ausbreiten.

Ich muß jedoch ausdrücklich davor warnen, sich die elektromagnetische Welle anschaulich vorzustellen, weil die elektromagnetische Strahlung, wie zu Beginn dieses Abschnitts gesagt worden ist, eben nicht nur einer Welle „ähnelt“, sondern in einer ganzen Reihe von Fällen auch an das Verhalten eines Teilchenstroms „erinnert“. Sich dagegen etwas vorzustellen, was gleichzeitig einem Teilchenstrom und einer Welle ähnelt, ist wiederum ganz unmöglich. Wir behandeln hier physikalische Prozesse, die sich nicht mit Kreide an einer Wandtafel darstellen lassen. Aber das heißt wiederum auch nicht, daß wir nicht imstande wären, das elektromagnetische Feld bis in seine letzten Einzelheiten hinein zu erkennen. Man darf nur nicht vergessen, daß die anschaulichen Bilder nur ein Hilfsmittel darstellen, ein Verfahren zur besseren Einprägung von Symbolen. Das Wellenbild ist nur ein Modell der elektromagnetischen Strahlung, sonst nichts! Dort, wo es angeht, benutzen wir dieses Modell, aber wir

dürfen uns nicht im mindesten darüber wundern, daß uns das gleiche Modell in anderen Fällen nur in die Irre führt.

In analoger Weise läßt sich der Korpuskularaspekt des elektromagnetischen Feldes nicht immer beobachten. Freilich wäre es einfacher, wenn die Bedingungen, unter denen die genannten beiden Aspekte sich zu erkennen geben, einander wechselseitig ausschlossen. Aber nein, so ist es eben nicht. Selbst bei Beschreibung ein und desselben Experiments ist man oft gezwungen, zur gleichen Zeit mit zwei Zungen zu reden.

Trotzdem läßt sich der Korpuskularaspekt elektromagnetischer Strahlung im kurzwelligen Bereich einfacher beobachten. (Obwohl es eigentlich richtiger wäre, zu sagen, daß es früher einmal einfacher gewesen ist.) In einer Ionisationskammer bzw. in anderen analogen Geräten kann der Zusammenstoß einer Partikel elektromagnetischer Strahlung mit einem Elektron oder einem anderen „ehrlichen“ Teilchen beobachtet werden. Der Vorgang kann dabei so ablaufen wie der Zusammenstoß zweier Billardkugeln. Dieses Verhalten unter Heranziehung des Wellenaspektes der elektromagnetischen Strahlung verstehen zu wollen ist unmöglich.

Betrachten wir die Entstehung elektromagnetischer Strahlung in der Sprache der Maxwellschen Theorie. Ein System von Ladungen soll mit einer bestimmten Frequenz schwingen. Im Takt dieser Schwingungen ändert sich das elektromagnetische Feld. Die Schwingungsfrequenz des Feldes  $\nu$ , dividiert durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit 300 000 km/s, liefert uns den Wert für die Wellenlänge der Strahlung.

Wechselt man nun in die Sprache der Quantenphysik, dann ist die gleiche Erscheinung folgendermaßen zu beschreiben: Gegeben ist ein System von Ladungen, für das ein System diskreter Energieniveaus charakteristisch ist. Dieses System ist — aus welchem Grunde auch immer — in den angeregten Zustand übergegangen, nur

kurze Zeit darin verblieben, um danach wieder auf ein niedrigeres Niveau zurückzukehren. Die dabei emittierte Energie  $E_2 - E_1 = h\nu$  wird in Gestalt einer Partikel abgestrahlt, die Photon heißt. Die Konstante  $h$  kennen wir bereits. (S. 134) Es ist das Plancksche Wirkungsquantum.

Liegen die Energieniveaus des Systems nahe beieinander, dann besitzt das Photon eine geringe Energie, eine niedrige Frequenz und infolgedessen eine große Wellenlänge. In diesem Fall ist der korpuskulare Aspekt der Quanten des elektromagnetischen Feldes kaum merklich und tritt nur bei Absorptionserscheinungen zutage, in deren Verlauf sich die Energieinhalte von Elektronen oder Atomkernen (magnetische Resonanz) nur sehr geringfügig ändern. Zusammenstöße von Photonen mit Partikeln zu beobachten, die dem Zusammenstoß von Billardkugeln vergleichbar wären, gelingt im Fall von Wellen mit großer Wellenlänge nicht.

Wir wollen nun in aller Kürze noch etwas über jene Tatsachen sagen, die die Physiker seinerzeit gewissermaßen „an die Wand gedrückt“ haben und sie zu der Einsicht zwangen, daß die Wellentheorie (an die man damals bereits einige Jahrzehnte hindurch wie an die volle und erschöpfende Wahrheit glaubte) nicht imstande ist, sämtliche Tatsachen, die elektromagnetische Felder betreffen, zu erklären. Es gibt viele Tatsachen dieser Art, doch wollen wir uns hier vorläufig auf eine Erscheinung beschränken, die unter der Bezeichnung „fotoelektrischer Effekt“ bekannt ist. Sobald dann klar ist, daß ein Bild des elektromagnetischen Feldes ohne den Korpuskularaspekt nicht entworfen werden kann, wollen wir uns den berühmten Versuchen von Heinrich Hertz zuwenden, von denen die gesamte Elektronik ihren Ausgang nahm, und zeigen, wie sich der Wellenaspekt des elektromagnetischen Feldes nicht nur in allgemeinen Zügen, sondern auch in den Einzelheiten darstellt.

## Der fotoelektrische Effekt

Die klangvolle und schöne Bezeichnung „Photon“ kam ein wenig später auf als das Produkt aus Planckschem Wirkungsquantum  $h$  und der Frequenz des elektromagnetischen Feldes  $\nu$ . Wie wir weiter oben gesagt haben, ist der Übergang eines Systems von einem energetischen Zustand in einen anderen von der Absorption bzw. Emission der „Energieportion“  $h\nu$  begleitet. Zu diesem Ergebnis gelangte der deutsche Physiker Max Planck um die Jahrhundertwende. Er zeigte, daß sich die Strahlung glühender Körper nur auf diese Weise interpretieren läßt. Seine Überlegungen betrafen auf „nichtelektronischem“ Weg erzeugte elektromagnetische Wellen. Zu jener Zeit war weder bewiesen noch etwa von allen anerkannt, daß das, was für das Licht gilt, auch für Radiofrequenzstrahlung zutrifft, obwohl die Maxwell'schen Gleichungen mit aller Bestimmtheit darauf hinwiesen, daß es zwischen Radiofrequenzstrahlung und anderen elektromagnetischen Wellen, darunter auch dem Licht, keinen grundsätzlichen Unterschied gibt. Das Verständnis und die experimentellen Beweise für die universelle Geltung der Planckschen Auffassung kamen später.

In Plancks Arbeit war davon die Rede, daß Licht in Portionen, d.h. Quanten, emittiert wird. Allerdings gab es darin keinen Hinweis auf die Tatsache, daß der Quantencharakter der Strahlung die Einführung des Korpuskularaspekts des elektromagnetischen Feldes in die Betrachtung notwendig macht. Ja, hieß es damals, das Feld wird in Portionen abgestrahlt, aber jede solche Portion ist nur eine Art Wellenzug.

Den entscheidenden Schritt, nämlich die Anerkennung der Tatsache, daß die emittierte Energieportion  $h\nu$  die Energie einer Partikel ist (die dann gleich „Photon“ getauft wurde), unternahm Einstein. Er zeigte, daß man nur mit Hilfe der Korpuskularvorstellung den foto-

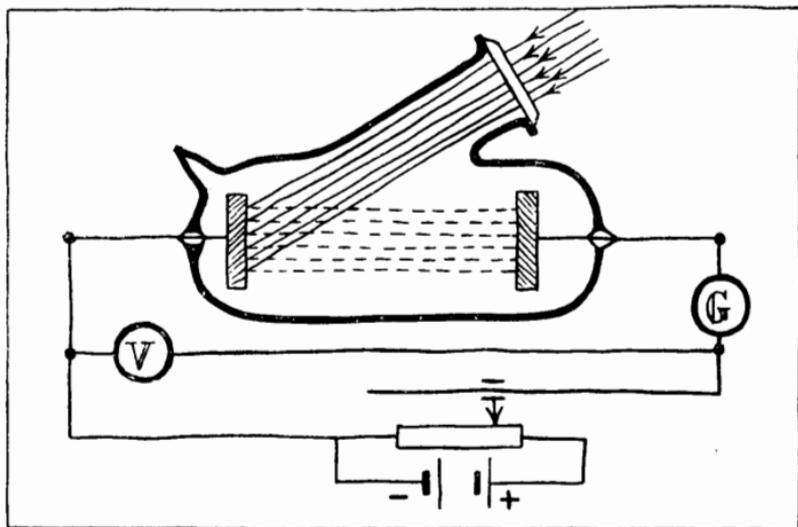


Bild 5.4.

elektrischen Effekt, d.h. das Herausschlagen von Elektronen aus Festkörpern unter dem Einfluß von Licht, erklären kann.

Bild 5.4. gibt die Prinzipdarstellung einer Vorrichtung, mit deren Hilfe Ende des vorigen Jahrhunderts die detaillierte Untersuchung einer Erscheinung begann, die wir heute als den äußeren Photoeffekt bezeichnen.

Als erster hat 1888 offenbar Heinrich Hertz darauf hingewiesen, daß die Elektroden einer Vakuumröhre durch Licht beeinflußt werden. Ungefähr zur gleichen Zeit wiesen Svante Arrhenius (1859—1927), Wilhelm Hallwachs (1859—1922), Augusto Righi (1850—1920) und Alexander Grigorjewitsch Stoletow (1839—1896) nach, daß die Belichtung der Kathode zur Entstehung eines Stroms führt. Liegt an der in unserem Bild gezeigten Röhre (sie heißt Fotoelement) keine Spannung an, dann erreicht nur ein kleiner Teil der vom Licht aus der Kathode

herausgeschlagenen Elektronen die gegenüberliegende Elektrode. Eine schwache Beschleunigungsspannung (der Minuspol liegt an der Fotokathode an) läßt den Strom ansteigen. Dabei wird schließlich der Sättigungszustand erreicht: Alle Elektronen (deren Anzahl für jede gegebene Temperatur festliegt) erreichen die Anode.

Die Stärke des Fotostroms ist der Lichtintensität streng proportional. Die Lichtintensität wiederum wird eindeutig durch die Photonenzahl definiert. Das führt zwangsläufig zu der Vorstellung (die durch strenge Berechnungen und Experimente bestätigt wird), das jeweils ein Photon ein Elektron aus dem Stoff heraus schlägt.

Die Energie des Photons wird benötigt, um ein Elektron aus dem Metall abzulösen und ihm eine bestimmte Geschwindigkeit zu verleihen. So ist auch die folgende Gleichung zu verstehen, die Albert Einstein erstmals 1905 angegeben hat:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A.$$

$A$  ist die Austrittsarbeit (vgl. S. 100).

Die Energie des Photons muß in jedem Fall größer als die Austrittsarbeit sein, die zur Freisetzung der Elektronen aus dem Metall erforderlich ist. Dies aber bedeutet, daß für jedes Photon einer bestimmten Energie (diese ist eindeutig mit der „Farbigkeit“ verknüpft) eine bestimmte Grenze des Fotoeffekts existiert.

Fotoelemente, die den hierbeschriebenen äußeren Fotoeffekt nutzen, sind weit verbreitet. Man verwendet sie in Fotorelais, beim Fernsehen und beim Tonfilm.

Ihre Empfindlichkeit läßt sich durch eine Gasfüllung erhöhen. Der Strom wird in diesem Fall dadurch verstärkt, daß die Elektronen neutrale Gasmoleküle „zerbrechen“, die dann ihren Beitrag zum Fotostrom leisten.

Der fotoelektrische Effekt — gemeint ist der sogenannte innere Fotoeffekt, der in Halbleitern am  $p$ - $n$ -Über-

gang stattfindet — spielt in der Technik von heute eine sehr wichtige Rolle.

Um die Darstellung jedoch an dieser Stelle nicht zu unterbrechen, wollen wir die anwendungstechnische Bedeutung des Fotoeffekts erst im 4. Band behandeln. Die vorstehende Betrachtung hingegen war nötig, um darzulegen, daß das elektromagnetische Feld auch Korpuskulareigenschaften besitzt.

Lange Zeit wurden die Photonen in der Physik sehr stiefmütterlich behandelt, denn der Existenzbeweis des Photons und die Erforschung der Gesetzmäßigkeiten des Fotoeffekts waren der Entstehung der Quantenphysik um 20 bis 30 Jahre vorausgeeilt. Erst Ende der zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts, nachdem man die Gesetze der Quantenphysik erkannt hatte, wurde auch verständlich, warum ein und dieselbe numerische Konstante, nämlich das Plancksche Wirkungsquantum  $h$ , sowohl in der Formel für die Photonenenergie als auch in der Formel von S. 100, die die möglichen Werte des Impulsmoments von Partikeln bestimmt, auftaucht.

Der Wert dieser Konstanten läßt sich auf der Grundlage unterschiedlichster Experimente bestimmen. Der fotoelektrische Effekt, der sogenannte Compton-Effekt (d.h. die Änderung der Wellenlänge von Röntgenstrahlen bei ihrer Streuung), das Auftreten von Strahlung bei der Annihilierung von Partikeln — alle genannten Erscheinungen und viele andere führen immer wieder zu ein und derselben Zahl.

### Die Hertzschen Versuche

Wie wurden jene Auffassungen bewiesen, die den Wellenaspekt des elektromagnetischen Feldes betreffen?

Aus den Maxwellschen Gleichungen lassen sich — logisch und mathematisch — bestimmte Schlußfolgerungen ziehen. Solche Schlußfolgerungen können richtig sein,

sich aber im Experiment nicht bestätigen. Eine physikalische Theorie wird erst dann Bestandteil der Wissenschaft, wenn sie experimentell geprüft worden ist. Der Weg, auf dem sich die Theorie des elektromagnetischen Feldes herausbildete, führte von Details zu zusammenfassenden Hypothesen, von diesen Hypothesen zu Schlußfolgerungen und schließlich in der letzten Etappe zur experimentellen Bestätigung, die über das Schicksal der Theorie entscheidet. Dieser Weg ist der einzig richtige für den Naturforscher! Am Beispiel der Gesetze des elektromagnetischen Feldes läßt er sich besonders deutlich verfolgen.

Die Hertz'schen Versuche wollen wir ausführlich behandeln, denn an ihrem Beispiel kann der Lehrer auch heute noch seinen Schülern oder Studenten zeigen, wie sich ein Wissenschaftler Gewißheit über die Geltung von Naturgesetzen verschafft.

Wir beginnen unseren Bericht mit dem Jahr 1853, als der englische Physiker Kelvin mathematisch nachwies, daß bei der Entladung eines Kondensators über eine Induktionsspule im Stromkreis elektrische Schwingungen entstehen. Die Ladungen an den Belegungen des Kondensators, die Spannung an jedem Abschnitt des Stromkreises und die Stromstärke — alle diese Größen zeigen einen harmonischen Schwingungsverlauf. Nimmt man an, daß der Widerstand im Kreis verschwindend gering ist, müßten diese Schwingungen bis in alle Ewigkeit fort dauern.

Bild 5.5. erläutert die Erscheinungen, die in einem sogenannten Schwingkreis ablaufen. Zu Beginn der Betrachtung ist der Kondensator aufgeladen. Sobald man den Stromkreis schließt, fließt darin ein Strom. Nach einer Viertelperiode ist der Kondensator vollständig entladen. Seine Energie  $q^2/2C$  ist in die Energie des Magnetfeldes der Spule übergegangen. Die Stromstärke erreicht in diesem Augenblick ihr Maximum. Der Stromfluß hört

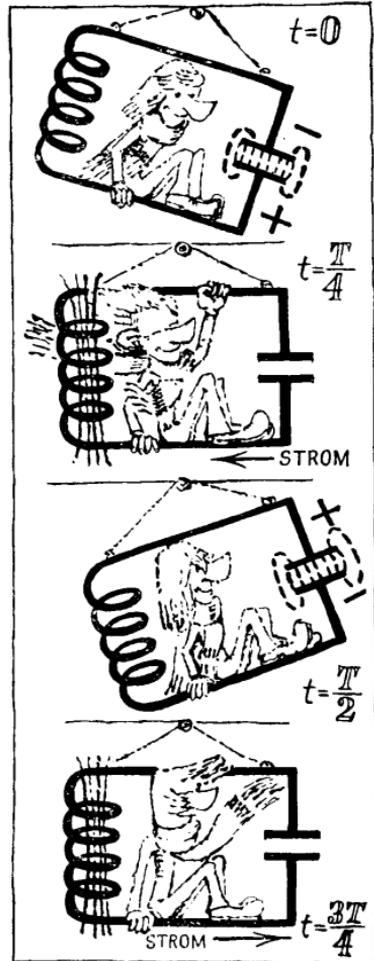


Bild 5.5.

nicht auf; vielmehr fließt der Strom in der gleichen Richtung weiter, nur daß die Stromstärke allmählich abnimmt. Nach einer Halbperiode ist die Stromstärke gleich Null; die magnetische Energie  $\frac{1}{2} LI^2$  verschwindet, der Kondensator wird wieder vollständig aufgeladen

und hat seine Energie zurückerhalten. Die Spannung freilich ändert ihr Vorzeichen. Anschließend wiederholt sich der Vorgang sozusagen in umgekehrter Richtung. Nach Ablauf der Zeit  $t$  (einer Schwingungsperiode) ist der Ausgangszustand wiederhergestellt, und der Vorgang beginnt von neuem.

Diese elektrischen Schwingungen würden sich bis in alle Ewigkeit fortsetzen, wenn nicht der unvermeidliche Widerstand wäre. Deshalb geht während jeder Periode ein gewisser Energiebetrag verloren, die Schwingungsamplitude wird kleiner, und die Schwingung klingt rasch ab.

Die augenfällige Analogie mit den Schwingungen einer an einer Feder aufgehängten Masse führt uns — ohne algebraische Betrachtung des Vorgangs — zu der Einsicht, wie groß die Schwingungsperiode in diesem Schwingkreis ist. (Zur Auffrischung des Gedächtnisses wollen Sie bitte noch einmal die betreffenden Seiten des 1. Bandes nachlesen.) In der Tat liegt auf der Hand, daß die elektrische Energie des Kondensators der potentiellen Energie einer zusammengedrückten Feder äquivalent ist und die magnetische Energie der Spule ihrerseits der kinetischen Energie der an der Feder aufgehängten Masse.

Durch Vergleich der analogen Größen „leiten“ wir die Formel für die Periode der elektrischen Schwingungen ab, die im Schwingkreis stattfinden:  $q^2/2C$  ist das Analogon von  $1/2 kx^2$ ;  $1/2 LI^2$  ist das Analogon von  $1/2 mv^2$ ;  $k$  das Analogon von  $1/C$ , und  $L$  schließlich ist das Analogon von  $m$ . Die Schwingungsfrequenz ist also  $\nu = 1/2\pi \sqrt{LC}$ , da die entsprechende Formel für die mechanische Schwingung  $\nu = 1/2\pi \sqrt{k/m}$  ist.

Nun wollen wir versuchen, Hertz' Gedankengang nachzuvollziehen, der es sich zur Aufgabe gemacht hatte — ohne sein Labor zu verlassen —, die Existenz elektromagnetischer Wellen, die sich mit 300 000 km/s ausbreiten, nachzuweisen. Es mußte also eine elektromagnetische

Welle mit einer Wellenlänge in der Größenordnung von 10 m erzeugt werden. Wenn Maxwell recht hatte, so mußte der elektrische und der magnetische Vektor mit einer Frequenz von  $3 \cdot 10^8$  Hertz ... Verzeihung: mit  $3 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$  schwingen. (Schließlich wußte Hertz ja damals nicht, daß sein Name einmal als Maßeinheit der Frequenz dienen würde.)

Womit beginnen? Da es sich um abklingende, d.h. gedämpfte Schwingungen handelte, mußte zuerst einmal eine Vorrichtung geschaffen werden, die den Schwingungsvorgang immer wieder in Gang setzte. Das war nicht schwierig.

An die Primärwicklung des Transformators wird eine Wechselspannung gelegt. Sobald diese die Durchschlagsspannung der an die Sekundärwicklung geschalteten Funkenstrecke erreicht, springt ein Funke über. Der Funke schließt den Schwingkreis und übernimmt damit die Funktion eines Schalters, so daß im Schwingkreis einige Dutzend Schwingungen mit mehr oder weniger hoher Frequenz und abnehmender Amplitude ablaufen.

Die Frequenz muß jedoch hoch sein. Was ist dafür erforderlich? Die Selbstinduktion und die Kapazität müssen verringert werden. Wie kann das geschehen? Wir ersetzen die Spule durch einen gestreckten geraden Leiter, rücken die Kondensatorplatten auseinander und verkleinern ihre Fläche. Wenn wir damit immer weiter fortfahren, bleibt am Ende nichts mehr vom Schwingkreis übrig. Wir haben schließlich nur noch zwei Stäbe, an deren Enden kleine Kugeln sitzen, zwischen denen der Funke überspringt.

So gelangte Hertz schließlich zum Prinzip seines Vibrators oder Oszillators, der sowohl als Sender, aber auch als Empfänger elektromagnetischer Wellen dienen kann.

Vorherzusagen, wie groß Induktivität und Kapazität dieses merkwürdigen „Schwingkreises“ sind, von dem ja im Grunde genommen nichts übriggeblieben ist, mußte

Hertz schwerfallen. Induktivität und Kapazität des Vibrators sind nicht an einem Ort innerhalb des Kreises konzentriert, sondern über die Länge der Stäbe verteilt. Es bedurfte einer anderen Theorie.

Doch die Behandlung dieses Ansatzes für Stromkreise, in denen hochfrequente Ströme fließen, würde zu weit führen. Ich bitte, mir zu glauben, daß im Hertzschen Vibrator hochfrequente Schwingungen entstehen.

„Sender“ und „Empfänger“, wie sie Hertz für die elektromagnetischen Wellen verwendete, waren praktisch gleich. Im „Sender“ wurden die Schwingungen durch einen Funken erregt, der in regelmäßigen Abständen zwischen den Kugeln der Funkenstrecke übersprang, und zwar abhängig von der Funktion des Transformators, der dem Vibrator die Spannung lieferte. Die Länge der Funkenstrecke konnte mit Hilfe einer Mikrometerschraube verändert werden. Als Empfänger dienten entweder Rechteckwindungen, die ebenfalls durch eine Funkenstrecke unterbrochen waren, oder zwei Stäbe, die man einander auf Entfernungen bis zu Bruchteilen eines Millimeters nähern konnte.

In seiner 1885 veröffentlichten ersten Arbeit zeigte Hertz, daß man nach dem obenbeschriebenen Verfahren Schwingungen sehr hoher Frequenz erzielen kann und daß diese Schwingungen in der Umgebung tatsächlich ein Wechselfeld erzeugen, dessen Existenz sich aufgrund des Funkens nachweisen läßt, der im „Empfänger“ überspringt. Den Empfangsvibrator bezeichnete Hertz als Resonator. So lag für Hertz das Prinzip des Nachweises elektromagnetischer Felder sogleich auf der Hand, das auch der Funktechnik von heute zugrunde liegt.

Übrigens waren die Worte elektromagnetische Wellen bzw. Funkwellen weder in Hertz' Arbeiten noch einige Jahrzehnte danach nicht in Gebrauch. Man sprach von elektrischen Wellen oder von „Strahlen elektrischer Kraft“.



**Heinrich Hertz (1857—1894)** — hervorragender deutscher Physiker, der experimentell mit Hilfe seines „Generators“ und „Resonators“ nachwies, daß eine Schwingungsentladung elektromagnetische Wellen im Raum erzeugt. Hertz zeigte, daß elektromagnetische Wellen reflektiert und gebrochen werden und interferieren, was Maxwells Theorie bestätigte. Seine Versuche wurden zur Grundlage der Funktechnik. In seiner ersten Versuchssendung übertrug Alexander Stepanowitsch Popow 1896 die beiden Worte „Heinrich Hertz“.

In seiner nächsten Arbeit zeigte Hertz, daß sich ein Dielektrikum (in Gestalt eines Schwefel- oder Paraffinstabs) in Übereinstimmung mit den Forderungen der Maxwell'schen Theorie auf die Frequenz des elektromagnetischen Feldes auswirkt. Nach Eingang dieser Arbeit schickte der Redakteur der Zeitschrift, Helmholtz, eine Postkarte folgenden Inhalts an Hertz: „Manuskript eingegangen. Bravo. Geht am Mittwoch in Druck.“

Großen Eindruck auf die Physiker jener Jahre machte die Hertz'sche Arbeit, in der er die Reflexion elektromagnetischer Wellen bewies. Die Wellen wurden durch einen  $4 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}$  großen Zinkschirm reflektiert. Der Vibrator war  $13 \text{ m}$  vom Schirm entfernt und  $2,5 \text{ m}$  über Fußbodenhöhe angeordnet. Der abgestimmte Resonator befand sich in der gleichen Höhe und konnte in seiner Lage zwischen Vibrator und Schirm verändert werden. Durch Anordnung des Resonators in verschiedenen Entfernungen vom Schirm unter gleichzeitiger Beobachtung der Funkenintensität entdeckte Hertz die Existenz von Maxima und Minima, wie sie für sogenannte stehende Wellen (eine Interferenzerscheinung) charakteristisch sind. Die Wellenlänge betrug etwa  $9,6 \text{ m}$ .

Übrigens hätte damals niemand sagen können, welcher Werkstoff zur Spiegelung elektromagnetischer Wellen verwendet werden müsse. Heute wissen wir wohl, daß Wellen dieser Wellenlänge nicht in Metall eindringen, sondern von diesem reflektiert werden.

In seinem Bemühen um zusätzliche Beweise für die Maxwell'sche Theorie verkleinerte Hertz die Geräte und erreichte eine Verminderung der Wellenlänge bis auf  $60 \text{ cm}$ . 1888 veröffentlichte er seine Arbeit „Über Strahlen elektrischer Kraft“. Es war ihm gelungen, die elektromagnetische Energie mit Hilfe von Parabolspiegeln zu konzentrieren. Im Brennpunkt der Spiegel wurden die Stäbe des Vibrators bzw. auch des Resonators angeordnet. Unter Benutzung derartiger Spiegelsender und -empfänger

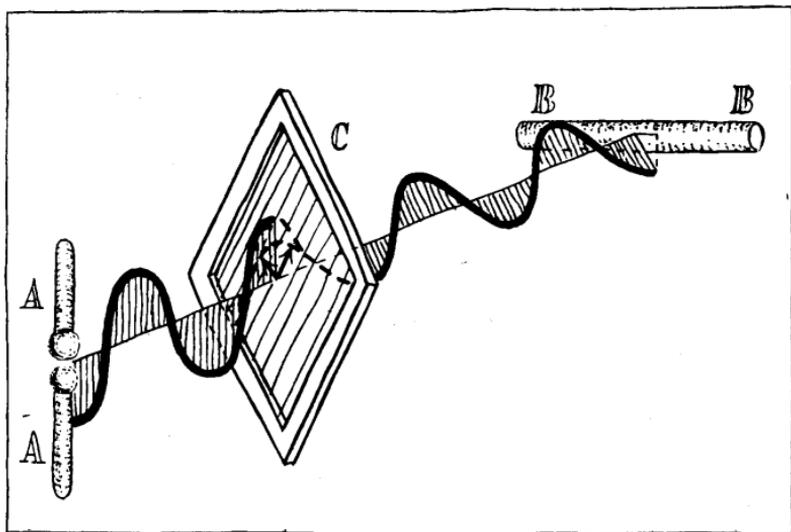


Bild 5.6.

zeigte Hertz, daß elektromagnetische Wellen Metalle nicht durchdringen, während aus Holz gefertigte Schirme die Wellen nicht aufhalten.

In Bild 5.6. ist dargestellt, wie Hertz die Polarisation elektromagnetischer Wellen bewies. Auf dem Weg des durch den Vibrator AA erzeugten elektrischen Strahls wurde das aus Kupferdrähten bestehende Gitter C angeordnet. Durch Drehen des Gitters konnte Hertz zeigen, daß sich die Funkenintensität im Resonator BB ändert. Verließen die Drähte parallel zum elektrischen Vektor und senkrecht zu den Vibratorachsen, konnte der Strahl das Gitter nicht durchdringen. Damit war bewiesen, daß es sich bei der elektromagnetischen Welle um eine Transversalwelle handelt.

Schließlich fertigte Hertz zur Untersuchung der Brechung seiner Wellen ein Prisma von über einer Tonne Masse aus Asphalt. Für Wellen mit einer Wellenlänge

von 60 cm konnte der Brechungskoeffizient von Asphalt mit großer Genauigkeit gemessen werden. Er betrug 1,69.

Der Beweis für die Existenz elektromagnetischer Wellen, die Messung ihrer Länge sowie der Nachweis und die Untersuchung ihrer Reflexion, Brechung und Polarisation! Und das alles im Ergebnis dreijähriger Arbeit. Ehre, wem Ehre gebührt!

### **Zur Klassifikation elektromagnetischer Strahlung**

Elektromagnetische Strahlung erfaßt ein großes Intervall. Die elektromagnetische Strahlung eines Stroms mit Netzfrequenz ist unbedeutend. Die Möglichkeit, elektromagnetische Strahlung praktisch aufzufassen, beginnt bei Frequenzen in der Größenordnung von einigen Dutzend Kilohertz, d.h. also Wellenlängen von einigen hundert Kilometern. Die kürzesten Wellen haben eine Länge in der Größenordnung einiger zehntausendstel Mikrometer, d.h. Frequenzen in der Größenordnung von einigen Milliarden Gigahertz.

Als Funkwellen bezeichnet man elektromagnetische Strahlung, die durch elektrotechnische Mittel, d.h. durch Schwingung elektrischer Ströme, erzeugt wird. Die kürzesten Funkwellen haben eine Länge von einigen hundertstel Millimeter.

Einige hundert Mikrometer und weniger als das umfaßt der Wellenlängenbereich jener Strahlung, die bei energetischen Übergängen innerhalb von Molekülen, Atomen und Atomkernen entsteht. Wie wir sehen, zeigt dieser Bereich eine wesentliche Überlappung mit dem Funkbereich.)

Das sichtbare Licht beansprucht nur ein schmales Intervall. Seine Grenzen betragen 0,38 und 0,74  $\mu\text{m}$ . Die längerwellige Strahlung heißt Infrarot und die kürzer-

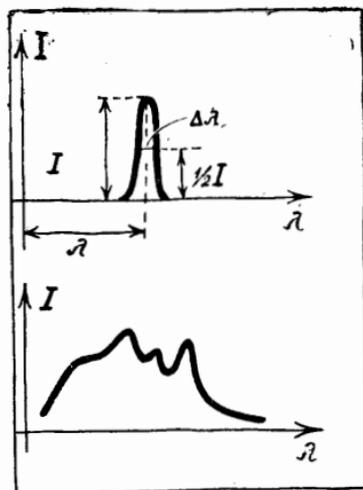


Bild 5.7.

wellige Ultraviolett. (Das Ultraviolett reicht bis zu einer Wellenlänge von etwa  $0,1 \mu\text{m}$ .)

Die in Röntgenröhren erhaltene elektromagnetische Strahlung überlappt sich mit dem Ultraviolettbereich und reicht bis  $0,01 \mu\text{m}$ , wo es wiederum zu einer Überlappung mit dem Bereich der Gammastrahlung kommt. Letztere entsteht beim Kernzerfall, bei Kernreaktionen sowie bei Zusammenstößen zwischen Elementarteilchen.

Das wichtigste Merkmal jeder elektromagnetischen Strahlung ist ihr Spektrum. Als Spektrum bezeichnet man ein Diagramm, wo auf der Senkrechten die Intensität (d.h. die je Zeiteinheit auf eine Flächeneinheit entfallende Energie) und auf der Waagerechten die Wellenlänge bzw. die Frequenz abgetragen sind. Das einfachste Spektrum weist monochromatische („einfarbige“) Strahlung auf. Ihr Spektrum besteht aus nur einer Linie sehr geringer Breite. (Bild 5.7. oben.) Die Monochromasie der Spektrallinie wird durch das Verhältnis  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  gekenn-

zeichnet. Rundfunksender liefern eine nahezu monochromatische Strahlung. Für einen Kurzwellensender im 30-m-Band beträgt  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  beispielsweise etwa 1000.

Angeregte Atome wie die Gasatome in Leuchtstofflampen (wo die Anregung durch Zusammenstöße positiv bzw. negativ geladener Partikeln erfolgt, die sich zur Anode bzw. zur Katode bewegen) liefern ein Spektrum, das aus einer Vielzahl monochromatischer Linien der relativen Breite  $(100\ 000)^{-1}$  besteht. Bei magnetischer Resonanz werden Linien mit einer Breite bis  $10^{-7}$  beobachtet.

Strenggenommen existieren überhaupt keine „durchgehenden“ Spektren. Wenn sich die Spektrallinien jedoch überlappen, so liefert das Experiment eine Intensitätskurve, wie sie im gleichen Bild unten dargestellt ist.

Angaben über das elektromagnetische Spektrum kann man sowohl durch Untersuchung der Emission als auch der Absorption erhalten. In beiden Fällen erhält man die gleiche Information. Das ergibt sich aus dem Grundgesetz der Quantenphysik. Im Emissionsfall geht das System von einem höheren Energieniveau zu einem niedrigeren über; im Absorptionsfall ist es genau umgekehrt. Die Energiedifferenz jedoch, die die Emissions- bzw. Absorptionsfrequenz bestimmt, ist ein und dieselbe. Ob man im konkreten Fall das Emissions- bzw. das Absorptionsspektrum untersucht, ist nur eine Frage der Zweckmäßigkeit.

Zur Kennzeichnung des Emissionsspektrums können wir uns natürlich sowohl der Wellen- als auch der Korpuskularsprache bedienen. Bei Betrachtung des Wellenaspekts der Emission sagen wir, daß die Intensität dem Amplitudenquadrat der Welle proportional ist. Fassen wir die Strahlung dagegen als einen Teilchenstrom auf, dann berechnen wir die Intensität als Photonenzahl.

Noch einmal: Der wechselweise Gebrauch beider

Aspekte der Strahlung darf uns nicht im geringsten irritieren. Strahlung ähnelt eben weder einer Welle noch einem Teilchenstrom. Beide Bilder sind nur Modelle, deren Benutzung bei der Erklärung bestimmter Erscheinungen bequem ist.

Wir haben hier keine Skala der elektromagnetischen Wellen angegeben, aber doch klar gesagt, daß die Bezeichnungen der einzelnen Bereiche dieser Skala in gewisser Weise relativ sind und daß wir Fälle antreffen können, wo Wellen ein und derselben Wellenlänge je nach Art ihrer Erzeugung unterschiedlich bezeichnet werden.

Heute steht uns die Skala der elektromagnetischen Wellen vollständig zu Gebot. Es gibt keine Bereiche, die uns nicht auf die eine oder andere Weise zugänglich wären.

Doch die Überlappungen der Infrarotstrahlung mit der Radiofrequenzstrahlung, der Gammastrahlung mit der Röntgenstrahlung usw. wurden erst vor verhältnismäßig kurzer Zeit entdeckt. Lange Zeit gab es eine Lücke zwischen der kurzwelligen Radiofrequenzstrahlung und der Infrarotstrahlung. Elektromagnetische Wellen der Wellenlänge 6 mm erzeugte 1895 der russische Physiker Lebedew, Infrarotstrahlen mit einer Wellenlänge bis 0,34 mm wurden von Rubens erhalten.

1922 beseitigte Glagolewa-Arkadjewa auch diese Lücke, als sie auf nichtoptischem Wege elektromagnetische Wellen der Wellenlänge von 0,35 mm bis 1 cm darstellte.

Heute ist dieser Wellenlängenbereich den Elektronikern mühelos zugänglich. Doch seinerzeit mußte die Wissenschaftlerin viel Scharfsinn und Erfindungsgeist darauf verwenden, um jenes Gerät zu entwickeln, das sie „Massenstrahler“ nannte. Als Quelle dieser elektromagnetischen Strahlung dienten in Transformatorenöl suspendierte Feilspäne, sobald man eine Funkenentladung durch das Gemisch schickte.

# 6. Das Radio

## Einige Seiten Geschichte

Ebensowenig wie Faraday vermutete, daß seine Entdeckung der elektromagnetischen Induktion die Entstehung und Entwicklung der Elektrotechnik zur Folge haben würde und Rutherford es für blödsinniges Geschwätz hielt, daß man aus dem Atomkern jemals Energie gewinnen würde, dachte auch Heinrich Hertz, der die elektromagnetischen Wellen nachgewiesen und gezeigt hatte, daß ihr Empfang über eine Entfernung von einigen Metern möglich war, nicht im mindesten an einen Funkverkehr; mehr noch: er verneinte diese Möglichkeit sogar ausdrücklich. Eine bemerkenswerte Parallelität der Ereignisse, nicht wahr? Ihre Beurteilung freilich fällt in das Aufgabengebiet des Psychologen. Wir beschränken uns daher auf die Feststellung dieses erstaunlichen Umstands und wollen untersuchen, wie sich die Ereignisse nach Heinrich Hertz' frühem Tod (1894) weiterentwickelten.

Hertz' klassische Versuche ließen Wissenschaftler in aller Welt aufhorchen. N. G. Jegorow, Professor an der Universität Petersburg, vollzog die Experimente exakt nach. Der Funke im Resonator war kaum zu bemerken. Man konnte ihn nur bei völliger Dunkelheit erkennen, und auch dann nur mit Hilfe eines Vergrößerungsglases.

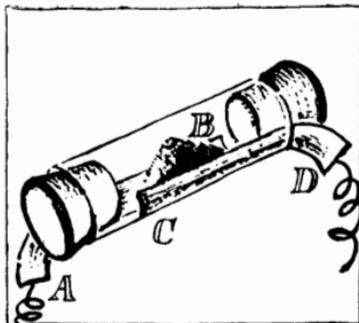
1889 ging A. S. Popow (1859—1906), damals noch Lehrer an der Offiziersschule in Kronstadt, im Alter von 30 Jahren daran, die Hertz'sche Versuchsanordnung zu verbessern. Die Funken, die Popow in seinen Resonatoren erzielte, waren wesentlich stärker als alles, was anderen Forschern bis dahin gelungen war.

Im Herbst 1894 erschien in der englischen Zeitschrift „The Electrician“ ein Artikel des Physikers Olivier Lodge, der mitteilte, man könne den Hertzschen Resonator durch Verwendung einer Branley-Röhre verbessern. Der französische Wissenschaftler Eduard Branley hatte die Leitfähigkeit von Feilspänen untersucht. Er fand, daß Feilspäne dem elektrischen Strom nicht immer den gleichen Widerstand entgegensetzten. Es zeigte sich, daß der Widerstand der in die Röhre eingefüllten Feilspäne schlagartig sinkt, wenn man sie in die Nähe eines Hertzschen Resonators bringt, und zwar, weil die Feilspäne miteinander „verkleben“. Man kann den ursprünglichen Widerstand wiederherstellen, doch muß die Röhre zu diesem Zweck geschüttelt werden.

Diese Eigenschaft von Feilspänen machte sich Lodge zunutze. Er schaltete eine Branley-Röhre (die man später als Kohärer, d.h. „Verkleber“, bezeichnete) mit einer Batterie und einem empfindlichen Galvanometer zusammen. Beim Durchgang elektromagnetischer Wellen schlug der Zeiger des Galvanometers aus. So konnte Lodge Funkwellen bis zu Entfernungen von etwa 40 m ausmachen.

Unbequem an diesem System war, daß der Kohärer beim Ansprechen sogleich ausfiel. Man mußte sich etwas ausdenken, wie die zusammenhaftenden (miteinander verschweißten) Feilspäne in den ursprünglichen Zustand zurückzusetzen wären, und zwar mußte das „Rütteln“ gewissermaßen „von selbst“ erfolgen.

Die Lösung dieses Problems gelang Popow. Er probierte eine Vielzahl verschiedener Kohärerkonstruktionen durch und entschied sich schließlich für die folgende: „An der Innenwand eines Glasrohrs sind nahezu auf seiner ganzen Länge zwei dünne Streifen  $AB$  und  $CD$  aus Platinfolie aufgeklebt. Der eine Streifen wird an dem einen Ende des Glasrohrs an dessen Außenfläche herausgeführt und der andere auf der gegenüberliegenden Seite.



**Bild 6.1.**

Der Abstand zwischen beiden Platinstreifen in der Röhre beträgt etwa 2 mm bei einer Breite von 8 mm; die Enden *B* und *C* der beiden Platinstreifen reichen im Innern der Röhre nicht bis zu den jeweils gegenüberliegenden Stopfen, die die Röhre verschließen, damit das in der Röhre befindliche Pulver den Zwischenraum zwischen Streifenende und Stopfen nicht versetzen kann; hier würden leitende ‚Fäden‘ entstehen, die sich durch Erschütterungen nicht zerstören lassen, wie es bei einigen Modellen geschieht. Die Gesamtlänge der Glasröhre beträgt 6 bis 8 cm bei einem Durchmesser von etwa 1 cm. Im Betrieb ist die Röhre waagrecht angeordnet, so daß sich die Platinstreifen in der unteren Hälfte der Glasröhre befinden und vom Metallpulver bedeckt sind. Die beste Wirkung wird erreicht, wenn die Röhre höchstens zur Hälfte gefüllt ist.“

Popows Kohälerschaltung, die wir hier mit seinen Worten beschrieben haben, ist in Bild 6.1. dargestellt. Popow verwendete Eisen- bzw. Stahlpulver.

Die Hauptaufgabe bestand jedoch nicht in der Verbesserung des Kohälers, sondern in der Entwicklung eines Verfahrens, den Kohärer nach Empfang einer elektromagnetischen Welle in den Ausgangszustand zurückzuführen. Im ersten Empfänger Popows, dessen Schaltung Bild 6.2. zeigt, wurde diese Funktion von einer gewöhn-

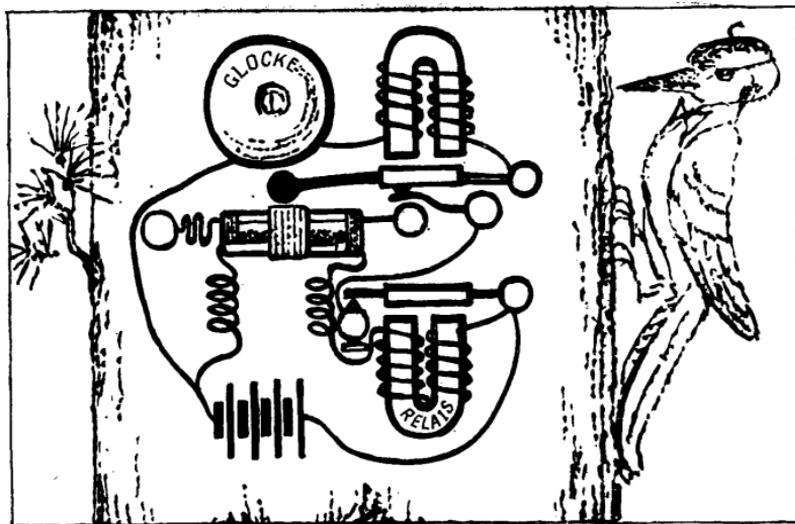


Bild 6.2.

lichen elektrischen Klingel übernommen. Die Klingel ersetzt gewissermaßen den Zeiger des Galvanometers: der Klöppel der Klingel schlägt an das Glasrohr, sobald er in seine Ausgangslage zurückkehrt.

Welch einfache Lösung einer so schwierig scheinenden Aufgabe! Auf den Grundgedanken waren selbst so hervorragende Physiker wie Hertz und Lodge nicht gekommen. In der einfachen Versuchsanordnung wird erstmals das verwendet, was die Techniker als Relaischaltung bezeichnen. Die verschwindend geringe Energie der Funkwellen wird nicht unmittelbar empfangen, sondern zur Steuerung eines Stromkreises verwendet.

In den Frühjahrstagen des Jahres 1895 übertrug Popow seine Versuche in den Garten. Er entfernte den Empfänger immer weiter vom Vibrator. 50 Meter — die Klingel spricht auf den Vibratorfunken an, 60 Meter — der Emp-



**Alexander Stepanowitsch Popow (1859—1906)** — russischer Physiker und Pionier der Funktechnik. A.S. Popows Arbeiten wurden von seinen Zeitgenossen hochgeschätzt. Im Jahre 1900 wurde er auf der Weltausstellung in Paris für seine Erfindung mit der Goldmedaille ausgezeichnet.

fang funktioniert noch immer, 80 Meter — Stille. Nun nimmt Popow eine Rolle Kupferdraht, wickelt den Draht ab, wirft ihn auf einen Baum und schließt das eine Ende an den Kohärer an. Die Klingel läutete wieder. Die erste Antenne der Welt war geboren.

Am 7. Mai 1895, dem Tag des Rundfunks, hielt Popow auf einer turnusmäßigen Sitzung der Russischen Physikalisch-chemischen Gesellschaft einen Vortrag mit dem Titel „Über das Verhalten von Metallpulvern gegenüber elektrischen Schwingungen“. Viele der Anwesenden hatten vor einigen Jahren Vorführungen der Hertzschen Versuche beigewohnt. Versuche, bei denen man einen winzigen Funken mit Hilfe eines Vergrößerungsglases betrachten konnte. Doch als sie nun die Klingel des Popowschen Empfängers anschlagen hörten, erkannten alle, daß dies die Geburtsstunde des drahtlosen Telegrafens war und nun die Möglichkeit zur Fernübertragung von Signalen bestand.

Am 12. Mai 1896 übermittelte Popow das erste Radiogramm der Welt. Über eine Entfernung von 250 m wurden aus einem Gebäude in ein anderes durch Öffnen und Schließen eines Schalters für kurze und längere Zeitabstände die Worte „Heinrich Hertz“ übertragen und auf ein Telegrafieband aufgezeichnet.

1899 betrug die Reichweite der Funkverbindung auf Schiffen der Minenausbildungsabteilung bereits 11 km. Die praktische Bedeutung des drahtlosen Telegrafens wird auch von den größten Skeptikern nicht länger in Zweifel gezogen.

Der Italiener Guglielmo Marconi begann seine Versuche etwas später als Popow. Sorgfältig verfolgte er alle Ergebnisse auf dem Gebiet der Elektrotechnik und der Erforschung elektromagnetischer Wellen und nutzte sie zur Verbesserung der Sende- und Empfangsqualität. Sein großes Verdienst betrifft nicht so sehr die technische als vielmehr die organisatorische Seite des Pro-

blems. Aber auch das ist keineswegs gering einzuschätzen, weshalb wir Marconis Namen mit Hochachtung aussprechen sollten, ohne jedoch zu vergessen, daß die unbestrittene und auf der ganzen Welt anerkannte Priorität bei der Entdeckung des Funks einem bescheidenen russischen Gelehrten zukommt, der es immer ablehnte, sein Wissen und Können in den Dienst eines anderen Landes zu stellen.

Marconi erwähnte Popow weder in seinen Artikeln noch in seinen Vorträgen. Weniger bekannt ist auch, daß Popow 1901 den Vorschlag machte, in die Dienste einer Aktiengesellschaft zu treten, deren Vorsitz er selbst innehatte.

Die Reichweite des Funkempfangs wuchs nun mit Riesenschritten. 1899 stellte Marconi eine Funkverbindung zwischen Frankreich und England her, und 1901 wird auch eine Funkbrücke zwischen Amerika und Europa geschlagen.

Welche technischen Neuerungen trugen zu diesem Erfolg und zur Entstehung des Rundfunks bei?

Ab 1899 beginnt die Funktechnik Abschied vom Kohärer zu nehmen. Statt Funkwellen durch den Widerstandsabfall in einem Stromkreis nachzuweisen, der unter dem Einfluß elektromagnetischer Wellen erfolgt, kann man auch ein ganz anderes Verfahren benutzen. Die gleichgerichtete pulsierende elektromagnetische Welle läßt sich auch akustisch mit einem gewöhnlichen Telefonhörer empfangen.

Die Suche nach verschiedenen Gleichrichtern beginnt. Der weitverbreitete Detektor, der bis in die zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts verwendet wurde, stellte einen Halbleiterkristall, einen sogenannten Richtleiter, dar. Solche Kristalle waren seit 1874 bekannt. Dazu gehören Metallsulfide, Pyrite sowie einige hundert weitere Minerale. Meine Altersgenossen werden sich noch an die Detektorenempfänger und die „nervenerfetzende“



Bild 6.3.

Prozedur erinnern, bei der man mit Hilfe einer federnden Nadel „guten Kontakt“ suchte. Dieser entstand, wenn die Spitze auf einen „geeigneten“ Punkt des Kristalls traf. (Bild 6.3.) Damals waren schon viele Sender in Betrieb, und man mußte den Empfänger daher auf die entsprechende Wellenlänge einstellen. Dies geschah durch „Kontaktumschaltung“, wenn es nur um den Empfang einer begrenzten Anzahl von Sendern ging bzw. durch stufenlose Änderung der Kapazität eines Kondensators, wie es auch heute in modernen Geräten üblich ist.

Mit Hilfe von Funksendern war es schwierig, wenn nicht unmöglich, echte Leistungen zu erhalten: Die Funkstrecke heizte sich auf. An ihre Stelle trat der Lichtbogen und die Hochfrequenzmaschine. Nun betrug die Leistungen einige hundert Kilowatt. Die eigentliche Revolution im Funkverkehr, die den Übergang von der Funktelegrafie zur Übertragung der menschlichen Sprache sowie der Musik erlaubte, brachte der Einsatz der Elektronenröhre,

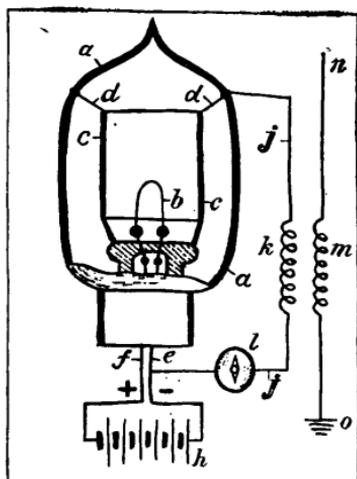


Bild 6.4.

Im Oktober 1904 zeigte der englische Elektroingenieur John Fleming (1849—1945), daß ein hochfrequenter elektrischer Strom mit Hilfe einer Vakuumröhre gleichgerichtet werden kann. Die Vakuumröhre muß einen Glühfaden enthalten, der von einem Metallzylinder umgeben ist. Bild 6.4. zeigt die Prinzipdarstellung dieser Röhre. Fleming erkannte sehr wohl die Bedeutung der Vakuumdiode für die Umwandlung elektrischer Schwingungen in Schall (er bezeichnete seine Röhre auch als „Audio“, vom lateinischen Wort audio, d.h., ich höre), war jedoch außerstande, seinem Detektor zum Durchbruch zu verhelfen.

Den Lorbeer des Erfinders der Elektronenröhre heimste der Amerikaner Lee de Forest (1873—1950) ein. Er war der erste, der aus der Röhre eine Triode machte (1907). Beim Röhrenempfänger von Lee de Forest wurden die empfangenen Signale auf das Gitter der Röhre gegeben. Sie wurden gleichgerichtet, und man konnte Telegrafiesignale mit Hilfe eines Telefons abhören,

Die Einsatzmöglichkeiten der Elektronenröhre als Verstärker lagen für den amerikanischen Ingenieur auf der Hand. Aber erst sechs Jahre später, nämlich 1913, verwendete der deutsche Ingenieur Meißner die Triode in einer Generatorschaltung.

Versuche zur Übertragung der Sprache, d.h. zur Modulierung der elektromagnetischen Welle, erfolgten bereits vor Einsatz der Elektronenröhre als Generator. Die Schwierigkeiten waren jedoch sehr groß, weil es nicht gelang, die Bandbreite der Modulationsfrequenzen genügend auszudehnen. Die Übertragung der menschlichen Stimme gelang gerade noch mit „Hängen und Würgen“, doch bei Musik war die Übertragung unmöglich. Erst in den zwanziger Jahren ließen mit Elektronenröhren bestückte Sender und Empfänger die wahrhaft unerschöpflichen Möglichkeiten einer Funkübertragung erkennen, die den gesamten Bereich der Schallfrequenzen umfaßte.

Der nächste revolutionäre Sprung erfolgte vor verhältnismäßig kurzer Zeit, als Halbleiterbauelemente die Elektronenröhren aus den Schaltungen verdrängten. Inzwischen entstand ein neues Gebiet der angewandten Physik, das jenen riesengroßen Komplex von Problemen behandelt, die mit dem Empfang, der Übertragung und der Speicherung von Informationen im Zusammenhang stehen.

### **Die Triodenröhre und der Transistor**

Die Triodenröhren haben eine Revolution in der Funktechnik herbeigeführt. Doch die Technik altert rascher als Menschen. Die Elektronenröhre muß es sich bereits heute gefallen lassen, als „Oma“ tituiert zu werden. Wir werden sie hier trotzdem behandeln, und nicht etwa nur deshalb, weil dem Alter die Ehre gebührt, sondern vor allem, weil sich die Prinzipien der beiden fundamentalen Einsatzgebiete von Röhren und Transistoren, nämlich

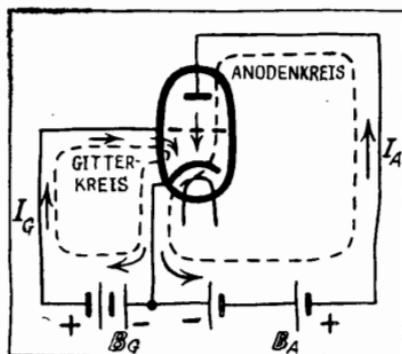


Bild 6.5.

die Verstärkung und die Erzeugung von Wellen einer ganz bestimmten Frequenz, am Beispiel der Elektronenröhre einfacher erklären lassen. Wir werden also die Funktion der Röhre ausführlicher als die Funktion eines Transistors beschreiben.

Im Kolben einer Triodenröhre ist außer der Anode und der durch den Strom beheizten Glühkatode noch eine dritte Elektrode, die man als Gitter bezeichnet, eingeschmolzen. Elektronen können dieses Gitter zunächst ungehindert passieren. Das Größenverhältnis zwischen den Gitteröffnungen und den Elektronen ist etwa das gleiche wie zwischen dem Erdball und einem Staubkorn. Bild 6.5. zeigt, wie man den Anodenstrom mit Hilfe des Gitters steuern kann. Eine negative Gitterspannung vermindert den Anodenstrom, eine positive hingegen verstärkt ihn.

Wir machen nun ein einfaches Experiment und legen eine Spannung von 100 V an Katode und Anode. Anschließend wird die Gitterspannung, z.B. so wie in Bild 6.6., im Bereich von etwa minus 8 V bis plus 5 V verändert. Mit einem Amperemeter messen wir dabei den Strom, der über den Anodenkreis fließt. Es entsteht die im Bild gezeigte Kurve, sie wird als Kennlinie der Röhre bezeichnet. Wir wiederholen das Experiment, nehmen aber

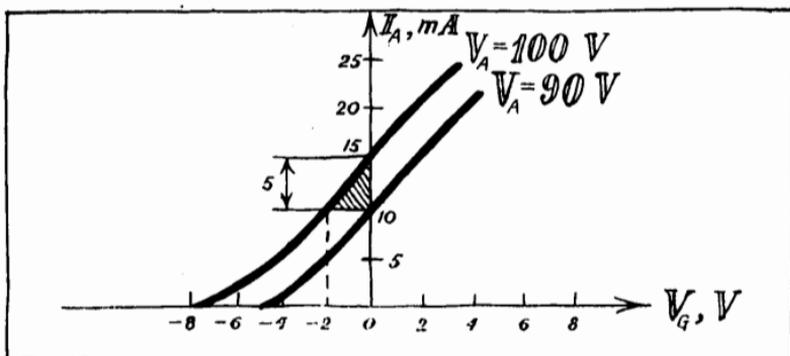


Bild 6.6.

jetzt eine Anodenspannung von 90 V. Dabei erhalten wir eine ähnliche Kurve.

Und nun sehen Sie sich einmal das Ergebnis an! Wie aus dem schraffierten Dreieck im Bild hervorgeht, kann man eine Verstärkung des Anodenstroms um 5 Milliampere auf zweierlei Weise erreichen: entweder durch Verstärkung der Anodenspannung um 10 V oder durch Erhöhung der Gitterspannung um 2 V. Die Einführung des Gitters, d.h. die Umwandlung der Röhre aus einer Diode in eine Triode, hat einen Verstärker entstehen lassen. Der Verstärkungsfaktor ist im hier betrachteten Beispiel gleich 5 (zehn dividiert durch zwei). Mit anderen Worten: Die Gitterspannung beeinflusst den Anodenstrom fünfmal so stark wie die Anodenspannung.

Jetzt wollen wir uns ansehen, wie sich mit Hilfe einer Triode Wellen einer bestimmten Wellenlänge erzeugen lassen.

Die zugehörige, sehr vereinfachte Schaltung ist in Bild 6.7. dargestellt. Bei Anlegen der Anodenspannung beginnt die Aufladung des Kondensators  $C_k$ , dem Schwingkreis über die Röhre. Die untere Belegung lädt sich positiv auf, sogleich setzt die Entladung des Kondensators

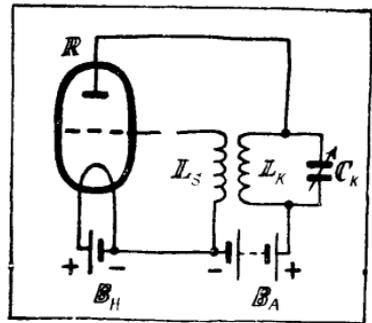


Bild 6.7.

über die Induktionsspule  $L_k$  ein. Es entstehen freie Schwingungen. Sie würden rasch abklingen, wenn nicht von seiten der Röhre eine ständige Energiezufuhr erfolgte. Was kann man tun, damit diese Energiezufuhr mit einer bestimmten Frequenz erfolgt und den Schwingkreis wie eine Schaukel „aufschaukelt“? Dazu bedarf es der sogenannten *Rückkopplung*. In der Spule  $L_s$  induziert der Strom des Schwingkreises eine Induktions-EMK der gleichen Frequenz, wie sie die freien Schwingungen haben. Das Gitter erzeugt also im Anodenkreis einen pulsierenden Strom, der den Schwingkreis mit seiner Eigenfrequenz aufschaukelt.

Die beiden hier beschriebenen, genial einfachen Prinzipien ließen die gesamte Elektronik und die mit ihr verknüpften Gebiete entstehen. Gewiß, die Elektronenröhre tritt ab und überläßt ihren Platz dem Transistor, doch das Prinzip der Verstärkung und Erzeugung elektromagnetischer Schwingungen ist davon unberührt geblieben.

Wie im Fall der Röhrentriode kann man auch beim Transistor durch eine kleine Leistung im Eingangskreis eine große Leistung im Ausgangskreis steuern. Im Charakter der Steuerung gibt es einen Unterschied. Der Anodenstrom der Röhre hängt, wie wir eben gesehen haben,

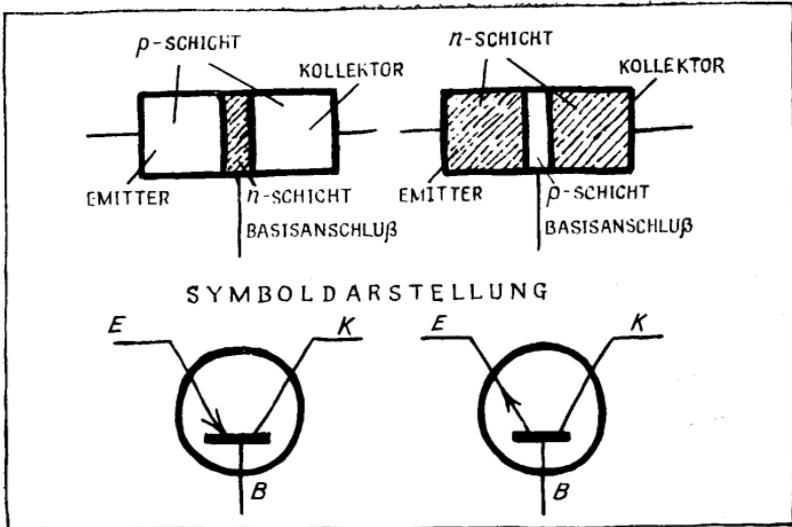


Bild 6.8.

von der Gitterspannung ab, der Kollektorstrom des Transistors dagegen ist vom Emitterstrom abhängig.

Wir haben noch gar nicht gesagt, was ein Transistor eigentlich darstellt. Der Transistor besitzt drei Elektroden: Der Emitter entspricht der Katode, der Kollektor der Anode und die Basis dem Gitter. Der Emitteranschluß ist der Eingang und der Kollektoranschluß der Ausgang.

Wie in Bild 6.8. zu erkennen ist, besteht ein Transistor aus zwei  $p-n$ -Übergängen. Die  $n$ -Schicht kann in der Mitte liegen; es gibt aber auch  $n-p-n$ -Transistoren.

An den Emitter wird stets die positive Verschiebungsspannung gelegt, so daß er eine große Anzahl von Hauptladungsträgern liefern kann. Wenn der Emitterkreis mit seinem niedrigen Widerstand den Strom im Kollektorkreis mit seinem hohen Widerstand verändert, erhalten wir eine Verstärkung.

Ganz allgemein sind die Schaltungen von Transistoren und ihr Einsatz als Verstärker und Generatoren den Funktionsprinzipien der Röhrentriode analog. Wir aber werden dieses wichtige Gebiet der Physik von heute hier nicht weiter besprechen.

## Sender

Sender lassen sich nach ihrer Sendeleistung klassifizieren. Große Rundfunksender strahlen eine Leistung bis etwa einem Megawatt ab. Das Funksprechgerät, mit dem ein Verkehrspolizist seinem Kollegen mitteilt, daß das Kraftfahrzeug mit dem polizeilichen Kennzeichen IA 35-69 bei Rot über die Kreuzung gefahren ist und gestoppt werden muß, hat eine Leistung in der Größenordnung von einem Milliwatt. Für bestimmte Zwecke genügen auch noch geringere Leistungen.

Wesentlich sind die Unterschiede im Aufbau von Sendern, die im Meterbereich arbeiten, und UKW-Sendeanlagen (Dezimeter- bzw. Zentimeterbereich). Doch innerhalb eines jeden Wellenlängenbereichs und Leistungsintervalls steht dem Ingenieur, der den Sender projektieren soll, eine große Auswahl von Schaltungen zu Gebot; für welche Schaltung er sich entscheidet, hängt unter anderem vom Gelände, von den spezifischen Zielen, von ökonomischen Überlegungen und schließlich vom technischen Erfindungsgeist ab.

Das Kernstück jedes Senders ist der Generator, der die Funkwellen erzeugt. Welchen wollen wir betrachten? Wir haben mindestens fünf Möglichkeiten. Man könnte einen Röhrengenerator nehmen, sein Bereich ist außerordentlich breit. Die Leistungen können Bruchteile eines Watts bis zu einigen hundert Kilowatt betragen und die Frequenzen einige Dutzend Kilohertz bis zu einigen Gigahertz. Braucht man allerdings kleine Leistungen in der Größenordnung einiger zehntel Watt, dann können

wir nur einen Transistorgenerator wählen. Wenn jedoch Leistungen benötigt werden, die mehr als einige hundert Watt betragen, dann muß man vorläufig noch (aber wahrscheinlich nicht mehr lange) auf Transistoren verzichten. Handelt es sich schließlich um Leistungen, für die beide Generatortypen geeignet sind, dann dürfte der Konstrukteur wahrscheinlich die Transistorvariante vorziehen. Ohne Frage kann die Eleganz der ingenieurtechnischen Lösung dadurch nur gewinnen. Ein transistorierter Sender beansprucht wesentlich weniger Platz und läßt sich erforderlichenfalls leichter in Gestalt eines mobilen Senders ausführen, als das bei einem Sender mit Röhrengenerator der Fall wäre.

Viel spezieller sind die Einsatzgebiete von Magnetron- und Klystrongeneratoren. Ersterer kann sehr nützlich sein, wenn man einen Impuls von einigen Megawatt Leistung in den Raum senden will. Der Frequenzbereich, für den ein Magnetrongenerator geeignet ist, umfaßt ungefähr 300 Megahertz bis 300 Gigahertz und ist damit viel schmaler.

Für den gleichen UKW-Bereich werden auch Klystrone verwendet. Freilich sind sie nur dann interessant, wenn es um kleine Leistungen, nämlich um einige Watt im Zentimeter- und einige Milliwatt im Millimeterbereich, geht.

Die beiden zuletztgenannten Generatoren sowie der fünfte Generatortyp, nämlich der Quantengenerator, haben sehr spezifischen Charakter und bedürfen einer besonderen Betrachtung. Was dagegen Transistor- und Röhrensandanlagen betrifft, so ähneln sie einander. Es gibt scharf umrissene Regeln, nach denen man eine Röhre durch den äquivalenten Transistor ersetzen kann.

Mit der Wahl des Generators für die elektromagnetischen Schwingungen ist aber noch längst nicht alles getan. Man muß auch entscheiden, wie die vom Primärgenerator (oder, wie man auch sagt, vom Steuergenerator) erzeugte

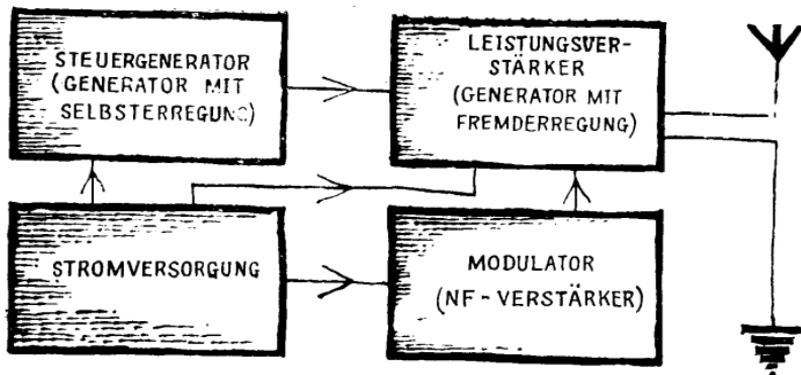


Bild 6.9.

Leistung verstärkt werden soll. Weiterhin muß das Verfahren ausgewählt werden, nach dem die Schallfrequenz der Trägerfrequenz aufmoduliert wird. Schließlich gibt es auch viele Varianten für die Übertragung der Energie in das Antennenfeld. Und die Organisation des Antennenfeldes selbst bietet der Phantasie des Ingenieurs ein weites Betätigungsfeld.

Man benutzt in der Elektronik sehr häufig sogenannte Blockschaltbilder. Das heißt, man zeichnet als Schaltung nur einige Rechtecke auf und versieht sie mit entsprechenden Inschriften. Was sich jeweils in einem derartigen „Kasten“ befindet, wird in dem Maße erklärt, wie es notwendig ist. Das Blockschaltbild eines Senders zeigt Bild 6.9. Der Steuergenerator erzeugt ungedämpfte, nahezu harmonische Schwingungen genau jener Frequenz bzw. Wellenlänge, auf die Sie Ihren Empfänger einstellen müssen, wenn Sie diesen Sender hören wollen. Der zweite Block ist der Leistungsverstärker. Die Bezeichnung spricht für sich selbst, und wir werden hier nichts über den Aufbau sagen. Die Aufgabe des Blocks, den wir als Modulator bezeichnet haben, besteht darin, Schallschwingungen in

elektrische Schwingungen umzuwandeln und sie der Trägerfrequenz des Senders zu überlagern.

Die Modulation kann auf unterschiedliche Weise vorgenommen werden. Am einfachsten läßt sich die Frequenzmodulation erklären. Wie Sie wissen, gibt es unter anderem auch Kondensatormikrofone; darin ändert sich die Kapazität eines Kondensators unter dem Einfluß des Schalldrucks. Die Kapazität eines Kondensators ist bekanntlich vom Abstand zwischen den Platten abhängig, und gerade dieser wird durch den Schalldruck verändert. Stellen Sie sich nun einmal vor, ein Kondensator dieser Art wäre in den Schwingkreis geschaltet, der eine elektromagnetische Welle erzeugt. Die Frequenz dieser Welle würde sich dann in Übereinstimmung mit dem Schalldruck ändern.

Da wir uns mit dem Mikrofon in den Schwingkreis „gemogelt“ haben, gelangt nun nicht eine streng definierte Frequenz, sondern ein bestimmtes Frequenzband in den Äther. Es liegt auf der Hand, daß diese „Verschmierung“ im Idealfall das gesamte Intervall der hörbaren Schallfrequenzen überdecken muß, das etwa 20 kHz umfaßt.

Erfolgt die Sendung im Langwellenbereich, dem Frequenzen in der Größenordnung von 100 kHz entsprechen, dann beträgt die Durchlaßbandbreite ein Fünftel der Trägerfrequenz. Es leuchtet ein, daß es im Langwellenbereich nicht möglich ist, eine große Zahl von Sendern zu betreiben, die sich nicht gegenseitig überlagern. Im Kurzwellenbereich sieht es dagegen anders aus. Für die Frequenz 20 MHz entspricht die Bandbreite bereits weniger als einem Prozent des Werts der Trägerfrequenz.

## Empfänger

Es existiert eine Unzahl verschiedener Rundfunkempfänger. Der Bereich Heimelektronik entwickelt sich außerordentlich rasch, so daß die Rundfunkempfänger zu allem

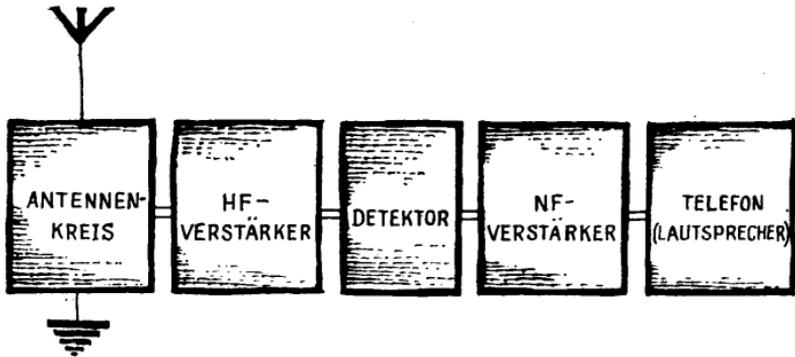


Bild 6.10.

Überfluß schnell veralten und jedes Jahr neue Erzeugnisse in den Läden auftauchen, die besser als ihre Vorgänger sind.

Was bedeutet „besser“ in bezug auf Rundfunkempfänger? Die Antwort kennt praktisch jeder, auch der, der von Physik nicht allzuviel versteht. Ein guter Rundfunkempfänger soll aus dem Chaos von Funkwellen, die an der Antenne eintreffen, lediglich die Signale herausgliedern, die gebraucht werden. (Man spricht in diesem Zusammenhang vom sogenannten Nutzsignal.) Diese Eigenschaft eines Rundfunkempfängers wird als seine Trennschärfe bezeichnet. Außerdem soll ein Rundfunkempfänger möglichst empfindlich sein, d. h. auch sehr schwache Signale empfangen können. Und schließlich soll er Musik und Sprache des Senders, auf den er eingestellt ist, verzerrungsfrei wiedergeben.

Wichtig sind also Trennschärfe, Empfindlichkeit und Wiedergabequalität. Dieser Aufzählung könnte man noch einen weiteren Wunsch hinzufügen: Der Empfänger soll in allen Wellenlängenbereichen gut arbeiten.

Das Blockschaltbild eines Rundfunkempfängers mit Geradeausverstärkung ist leicht zu übersehen. (Bild 6.10.) Zuerst einmal muß die gewünschte Wellenlänge

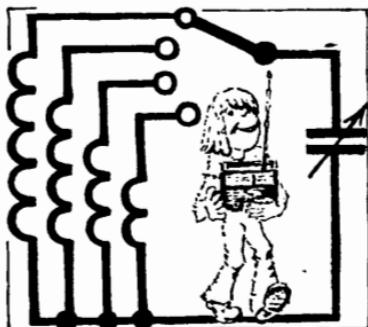


Bild 6.11.

herausgegliedert und diejenige hochfrequente Schwingung verstärkt werden, die die Funkwellen des uns interessierenden Senders in der Antenne erzeugen. Daran schließt sich die Demodulierung an; so heißt der Prozeß der „Abtrennung“ der Trägerfrequenz unter Herausgliederung der akustischen Information. Schließlich brauchen wir einen weiteren Verstärker, diesmal jedoch für niederfrequente Schwingungen. Zum Schluß kommt die Umwandlung dieser elektrischen Schwingungen in Schallschwingungen durch Lautsprecher oder Kopfhörer.

Die Antenne eines Rundfunkempfängers ist gewöhnlich induktiv mit Schwingkreisen für mehrere Frequenzbereiche gekoppelt. Wenn wir den Abstimmknopf des Rundfunkempfängers drehen, führen wir eine Operation aus, die Bild 6.11. als Prinzipdarstellung zeigt. Innerhalb jedes Frequenzbereichs erfolgt die Abstimmung gewöhnlich so, daß man die Kapazität des Kondensators im Eingangsschwingkreis ändert. Die Fähigkeit eines Empfängers, die gewünschte Frequenz optimal „herauszutrennen“, wird durch die Resonanzkurve des Schwingkreises bestimmt.

In der Gebrauchsanleitung für mein Autoradio ist dessen Trennschärfe mit 9 kHz für den Lang- und Mittelwellenbereich angegeben. Das ist natürlich längst nicht die Grenze dessen, was sich erreichen läßt.

Die Empfindlichkeit eines Rundfunkempfängers wird durch die kleinste EMK in der Antenne des Empfängers gekennzeichnet, bei der eine ausreichende Verständlichkeit der Rundfunkübertragung gewährleistet ist. Bei einem Autoradio muß die Empfindlichkeit für den Langwellenbereich mindestens  $175 \mu\text{V}$  und für den UKW-Bereich mindestens  $5 \mu\text{V}$  betragen. Die Empfindlichkeit ist abhängig vom Verstärkungskoeffizienten sowie vom Eigenrauschen. Die Verstärkungskoeffizienten von Rundfunkempfängern bewegen sich im Bereich von  $10^{-5}$  bis  $10^{-8}$ . Hieraus folgt, daß ein Sender, den ich mit meinem Rundfunkempfänger noch empfangen will, in der Antenne eine Induktions-EMK von mindestens  $10^{-8} \mu\text{V}$  erzeugen muß.

### Über die Ausbreitung von Funkwellen

Der einfachste Fall ist die Ausbreitung von Funkwellen im freien Raum. Bereits in relativ geringer Entfernung vom Funksender kann man diesen als punktförmige Strahlungsquelle auffassen. Man darf dann die Wellenfront der Funkwellen als sphärisch betrachten. Wenn wir uns nun gedanklich mehrere ineinandersitzende Kugelschalen vorstellen, die den Funksender umgeben, so leuchtet ein, daß — sofern man eine Absorption ausschließt — die jeweils durch die Kugelschalen tretende Energie unverändert bleibt. Die Kugelschalenfläche wiederum ist dem Abstandsquadrat proportional. Die Intensität einer Welle, d. h. jene Energie, die je Zeiteinheit auf eine Flächeneinheit entfällt, sinkt mit zunehmender Entfernung von der Strahlungsquelle umgekehrt proportional zum Abstandsquadrat.

Natürlich gilt diese wichtige Regel strenggenommen nur dann, wenn nicht besondere Maßnahmen ergriffen wurden, um einen scharf gebündelten Funkstrahl zu erzeugen.

Zur Herstellung gebündelter Funkstrahlen existieren verschiedene technische Verfahren. Eins davon besteht in der Verwendung regelmäßig angeordneter Antennengruppen. Die Antennen müssen so angeordnet sein, daß die von ihnen ausgesandten Wellen „im Gleichschritt“ in der gewünschten Richtung „marschieren“. Für den gleichen Zweck werden auch Spiegel unterschiedlicher Form benutzt.

Im Weltraum werden Funkwellen dann von der geradlinigen Ausbreitungsrichtung abweichen, also reflektiert, gestreut oder gebrochen werden, wenn sie auf Hindernisse treffen, deren Größe in der Größenordnung der Wellenlänge liegt.

Besonders wichtig ist für uns das Verhalten von Funkwellen in der Nähe der Erdoberfläche. Je nach Wellenlänge kann sich dabei in jedem Einzelfall ein anderes Bild darbieten.

Entscheidend sind die elektrischen Eigenschaften der Erde und der Atmosphäre. Ist die Erdoberfläche elektrisch leitend, dann „hält“ sie die Funkwellen „fest“. Die elektrischen Kraftlinien des elektromagnetischen Feldes treten rechtwinklig in Metall (oder allgemeiner: in beliebige Leiter) ein.

Stellen Sie sich nun vor, daß die Funksendung in der Nähe der Meeresoberfläche erfolgt. Meerwasser enthält gelöste Salze, ist also ein Elektrolyt. Es leitet den elektrischen Strom sehr gut. Deshalb „hält es“ Funkwellen „fest“ und zwingt sie, sich an der Meeresoberfläche entlangzubewegen.

Aber auch Ebenen und sogar Waldgebiete sind für nicht allzu hochfrequente Ströme gute Leiter. Mit anderen Worten: Wälder und Ebenen verhalten sich für lange Wellen ähnlich wie Metalle. Daher werden Langwellen von der gesamten Erdoberfläche festgehalten und sind imstande, den Erdball zu umrunden, und es ist leicht, die Geschwindigkeit der Funkwellen zu bestimmen. Eine

Funkwelle benötigt 0,13 s, um einmal um den Erdball zu laufen. Was aber ist mit den Bergen? Was soll schon sein? Für lange Wellen sind die Berge gar nicht so hoch. Eine Funkwelle, deren Wellenlänge in der Größenordnung eines Kilometers liegt, ist mehr oder weniger gut imstande, einen Berg zu überwinden.

Was hingegen den kurzwelligen Bereich betrifft, so wird die Möglichkeit des Kurzwellenfernempfangs durch die Ionosphäre unserer Erde bedingt. Sonnenstrahlen haben die Fähigkeit, Moleküle der Luft in den oberen Atmosphärenschichten zu zerstören. Die Moleküle verwandeln sich in Ionen und bilden in 100 bis 300 km Höhe über der Erdoberfläche mehrere geladene Schichten. Für kurze Wellen stellt der Raum, in dem sie sich bewegen, eine beiderseits von leitenden Flächen begrenzte Schicht eines Dielektrikums dar.

Da Ebenen und Waldgebiete für Kurzwellen keine guten Leiter darstellen, sind diese auch nicht imstande, Kurzwellen festzuhalten. Kurzwellen gehen zunächst ungehindert auf die Reise, stoßen dann aber auf die Ionosphäre, die sie ebenso reflektiert wie eine Metalloberfläche.

Die Ionisierung der Ionosphäre ist inhomogen und natürlich bei Tag und bei Nacht verschieden. Der Weg, den Kurzwellen einschlagen, kann daher denkbar unterschiedlich sein. Sie können unseren Rundfunkempfänger auch nach mehrfacher Reflexion an der Ionosphäre bzw. der Erde erreichen. Das Schicksal der Kurzwellen hängt davon ab, unter welchem Winkel sie auf die Ionosphäre auftreffen. Geschieht dies nahezu rechtwinklig, dann findet keine Reflexion statt, und die Wellen treten in den Weltraum hinaus. Meist jedoch findet eine vollständige Reflexion statt, und die Welle kehrt zur Erde zurück.

Im UKW-Bereich ist die Ionosphäre durchlässig. Der UKW-Rundfunkempfang ist daher nur bei Direkt-

sicht bzw. mit Hilfe von Satelliten möglich. Wenn wir den UKW-Sender auf einen Satelliten richten, können wir das vom Satelliten reflektierte Signal noch in sehr großer Entfernung auffangen.

Die Satelliten haben in der Nachrichtentechnik eine neue Epoche eröffnet, da sie einen weltweiten Rundfunk- und Fernsehempfang im UKW-Bereich möglich machen.

Interessante Perspektiven bieten auch Übertragungen im Zentimeter-, Millimeter- und Submillimeterbereich. Wellen dieser Längen können von der Atmosphäre absorbiert werden. Wie sich herausstellt, gibt es jedoch „Fenster“, und durch geeignete Wahl der Wellenlänge kann man auch Wellen ausnutzen, die in den optischen Bereich hineinreichen. Die Vorzüge solcher Wellen wiederum sind uns bekannt. Man kann hier in einen schmalen Wellenbereich eine ungeheure Anzahl von Übertragungen „hinpacken“, die sich gegenseitig nicht beeinträchtigen.

## Das Radar

Die Prinzipien des Radars oder, wie man auch sagt, der Funkortung sind recht einfach. Ein ausgesandtes Signal wird von einem Objekt, das uns interessiert, reflektiert und kehrt zurück. Beträgt die Entfernung des Objekts 150 m, dann erfolgt die Rückkehr des Signals nach 1  $\mu$ s; bei einer Entfernung von 150 km wäre die Laufzeit 1 ms. Das Signal muß geradlinig in der Richtung ausgesandt werden, in der sich etwa ein Flugzeug, eine Rakete oder ein Kraftfahrzeug zu dem Zeitpunkt befindet, wenn es vom Funkstrahl getroffen wird.

Es leuchtet ein, daß der Funkstrahl scharf gebündelt sein muß; der Öffnungswinkel, in dem der Hauptteil der Leistung des Funkstrahls konzentriert ist, muß in der Größenordnung eines Grads liegen.

So ist das Prinzip in der Tat einfach; die Technik freilich ist alles andere als das. Es beginnt schon damit, daß

an den Generator sehr hohe Forderungen gestellt werden. Im Meter- und Dezimeterbereich (längerwellige Wellen sind offenbar ungeeignet) verwendet man Röhrengeneratoren, im Zentimeterbereich Klystrone und Magnetronen.

Die Anlagen arbeiten meist im Impulsbetrieb. Das heißt, es werden in regelmäßigen Zeitabständen Kurzzeitimpulse in den Raum gesandt. Die Impulsdauer liegt bei modernen Radaranlagen im Bereich 0,1 bis 10  $\mu$ s. Die Impulsfolge muß so gewählt werden, daß das reflektierte Signal innerhalb des Intervalls zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen zurückkehren kann.

Die größte Entfernung, in der sich ein Flugzeug oder eine Rakete durch Radar auffassen läßt, wird nur durch die Voraussetzung der Direktsicht begrenzt. Sie haben gewiß schon gelesen, daß moderne Radaranlagen Signale registrieren können, die von beliebig weit entfernten Planeten unseres Sonnensystems reflektiert werden. Natürlich sind zu diesem Zweck Wellen zu benutzen, die die Ionosphäre ungehindert durchdringen. Glücklicherweise bewirkt die Verringerung der Wellenlänge auch eine unmittelbare Zunahme der Radarreichweite, da diese nicht nur der Energie des ausgesandten Impulses, sondern auch der Strahlungsfrequenz direkt proportional ist.

Auf dem Bildschirm eines Oszillographen (d. h. einer Elektronenstrahlröhre) kann man den jeweils ausgesandten und dann reflektierten Impuls sichtbar machen. Bei Annäherung beispielsweise eines Flugzeugs verschiebt sich das reflektierte Signal in Richtung des ausgesandten Signals.

Radargeräte müssen nicht unbedingt im Impulsbetrieb arbeiten. Angenommen, ein Flugzeug bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v$  auf die Antenne zu. Dabei soll ein Funkstrahl kontinuierlich von diesem Flugzeug reflektiert werden. Der Doppler-Effekt führt dazu, daß die Frequenz der empfangenen Welle mit der Frequenz der ausgesandten Welle durch die folgende Gleichung ver-

knüpft ist:

$$v_{\text{Empfänger}} = v_{\text{Sender}} \left( 1 + \frac{2v}{c} \right).$$

Frequenzen lassen sich auf elektronischem Wege außerordentlich genau bestimmen. Durch Resonanzabstimmung können wir  $v_{\text{Empfänger}}$  bestimmen und aus diesem Wert die Geschwindigkeit berechnen. Angenommen, die Frequenz des Sendersignals beträgt  $10^9$  Hz, und das Flugzeug oder eine Rakete nähert sich der Radarantenne mit der Geschwindigkeit von 1000 km/h, dann ist die Empfängerfrequenz um 1850 Hz größer als die Senderfrequenz.

Die Reflexion eines Funkstrahls am Flugzeug, an einer Rakete, einem Schiff oder einem Kraftfahrzeug ist nicht von der Art einer Spiegelreflexion. Die Wellenlänge liegt in der gleichen Größenordnung oder ist wesentlich kleiner als die Größe des reflektierenden Objekts, das zudem eine komplizierte Form aufweist. Bei Reflexion an verschiedenen Punkten des Objekts interferieren die reflektierten Strahlen untereinander und werden seitlich gestreut. Beide Erscheinungen führen dazu, daß die effektive reflektierende Fläche des Objekts von seiner wahren Oberfläche wesentlich verschieden ist. Entsprechende Berechnungen sind sehr kompliziert, und nur die Erfahrung des Operators am Radarschirm ermöglicht diesem eine Aussage darüber, was für ein Gegenstand in den Radarstrahl geraten ist.

Radarannten haben Sie alle schon einmal gesehen — es sind die bekannten Parabolspiegel, die sich ständig in Bewegung befinden, um den Luftraum zu kontrollieren. Man kann eine Radarantenne veranlassen, die unterschiedlichsten Bewegungen auszuführen, beispielsweise so, daß der Radarstrahl den Luftraum zeilenweise oder in Form konzentrischer Kreise abtastet. So ist nicht nur die Bestimmung der Entfernung eines Flugzeugs, sondern auch die Ermittlung seiner Flugbahn möglich.

Man benutzt diese Möglichkeit zur Führung von Flugzeugen im Landeanflug bei fehlender Sicht. Diese Aufgabe kann sowohl einem Menschen als auch einem Automaten übertragen werden.

Radaranlagen können auch „getäuscht“ werden. Da ist einmal die Möglichkeit, das Objekt mit „radarschluckenden“ Werkstoffen abzudecken. Dafür sind z. B. Kohlenstaub oder Kautschuk geeignet. Um den Reflexionskoeffizienten herabzusetzen, wird der Überzug außerdem geriffelt ausgeführt; man bewirkt so die ungeordnete Streuung des Löwenanteils der Strahlung nach allen Richtungen hin.

Zum anderen können vom Flugzeug große Mengen Streifen aus Aluminiumfolie oder metallisierte Fasern abgeworfen werden, was die völlige Desorientierung des Radars zur Folge hat. Dieses Verfahren haben die Engländer zum ersten Mal bereits während des zweiten Weltkriegs angewendet. Ein drittes Verfahren schließlich besteht darin, falsche Radarsignale in den Äther zu senden.

Die Funkortung ist ein hochinteressantes Gebiet der Technik, das in großem Umfang für friedliche Zwecke eingesetzt wird und ohne das man sich die Verteidigung heute nicht mehr vorstellen kann.

Ein Konkurrent des Radars ist der Laser. Die Grundsätze der Laserortung von Objekten unterscheiden sich nicht von den obenbeschriebenen Prinzipien.

Den Prinzipien der Funkortung liegt auch die Nachrichtenverbindung zwischen Raumschiffen und der Erde zugrunde. Über die Erde werden Radioteleskope so verteilt, daß sie stets Sichtverbindung zum Raumschiff haben. Ihre Antennen sind außerordentlich groß und weisen Abmessungen bis zu einigen hundert Metern auf. Die Notwendigkeit derart großer Antennen erklärt sich daraus, daß einerseits ein sehr starkes Signal ausgesandt werden muß und andererseits der Empfang des sehr schwachen Signals aus dem Sender des Raumschiffs zu ermöglichen

ist. Natürlich ist es sehr wichtig, einen scharf gebündelten Funkstrahl zu haben. Arbeitet eine Antenne mit der Frequenz 2,2 Milliarden Hz (was einer Wellenlänge von etwa 1 cm entspricht), dann führt die Verbreiterung des Funkstrahls auf der Distanz Erde—Mond zu einem Strahldurchmesser von etwa 1000 km. Wenn der gleiche Strahl schließlich den Mars erreicht (die Entfernung beträgt dann 300 Millionen Kilometer), so entspricht der Durchmesser des Funkstrahls allerdings bereits 700 000 Kilometern.

### Das Fernsehen

Das Fernsehen nimmt im heutigen Leben der Menschen einen bedeutenden Platz ein, und wir wollen deshalb einige Worte über diese bedeutende Erfindung verlieren. Allerdings soll hier nur von den Prinzipien der Fernsehübertragung die Rede sein.

Der Grundgedanke einer Bildfernübertragung besteht in folgendem: Das zu übertragende Bild wird in kleine Quadrate zerlegt. Ein Physiologe wird uns sagen können, wie groß ein derartiges Quadrat sein muß, wenn das Auge Leuchtdichteänderungen innerhalb des Quadrats nicht mehr bemerken soll. Die Lichtenergie jedes solchen Bildausschnitts kann unter Ausnutzung des fotoelektrischen Effekts in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Nun muß man sich noch ein Verfahren ausdenken, wie diese Signale abgelesen werden sollen. Natürlich geschieht dies in einer ganz bestimmten Reihenfolge, etwa so wie beim Lesen eines Buches. Die elektrischen Signale werden einer Trägerfrequenz in analoger Weise wie beim Hörfunk aufmoduliert. Auch die folgenden Ereignisse sind dem Hörfunk analog. Die modulierten Schwingungen werden verstärkt und demoduliert. Nun kann der Fernsehempfänger die elektrischen Impulse wieder in ein sichtbares Bild umwandeln.

Bildaufnehmeröhren tragen Bezeichnungen wie Superikonoskop, Superorthikon oder Vidikon. Das zu übertragende Bild wird mit Hilfe einer Linse auf die Fotokatode der Bildaufnehmeröhre projiziert. Häufig verwendete Fotokatodenwerkstoffe sind Zäsium, Antimon und Kalium. Die Fotokatode wird gemeinsam mit der Fotoanode in einem evakuierten Glaskolben angeordnet.

Grundsätzlich könnte man eine Bildübertragung nun so vornehmen, daß man den Lichtstrom, der von jedem Bildelement ausgeht, nacheinander auf die Fotokatode projiziert. Der Fotostrom dürfte dann jeweils nur während einer ganz kurzen Zeit fließen, solange nämlich, wie die Übertragung jedes Bildelements dauert. Das Verfahren wäre jedoch unbequem; man verwendet in Bildaufnehmeröhren daher nicht nur ein einziges Fotoelement, sondern soviel Fotoelemente, wie der Anzahl von Bildelementen (Bildpunkten) entspricht, in die das Bild zerlegt wird. Aus diesen einzelnen Fotoelementen ist eine sogenannte Speicherplatte aufgebaut.

Eine Speicherplatte besteht beispielsweise aus einer dünnen Glimmerscheibe, die auf der einen Seite eine große Anzahl jeweils gegeneinander isolierter Silberkörner mit einem Zäsiumüberzug trägt. Jedes einzelne Korn stellt ein Fotoelement dar. Auf der anderen Seite ist die Glimmerscheibe mit einer Metallfolie versehen. So entsteht aus jedem Silberkorn auf der einen und der Metallbelegung auf der anderen Seite der Glimmerscheibe gewissermaßen ein kleiner Kondensator, den die aus der Katode herausgeschlagenen Elektronen aufladen. Logischerweise ist die Ladung jedes Einzelkondensators der Leuchtdichte an der betreffenden Stelle des zu übertragenden Bildes proportional.

Auf der Metallfolie entsteht somit gewissermaßen ein latentes elektrisches Bild. Hier wird es mit Hilfe eines Elektronenstrahls abgegriffen, der die Metallfolie genauso abtastet, wie das Auge etwa über die Zeilen dieses Buchs

gleitet. Der Elektronenstrahl übernimmt dabei gewissermaßen die Rolle eines Schalters, der jeden einzelnen „Minikondensator“ der Speicherplatte für einen winzigen Augenblick kurzschließt. Der dabei fließende Strom ist ebenfalls eindeutig mit der Leuchtdichte des Bildes verknüpft.

Jedes einzelne Signal kann und muß in der bereits besprochenen Weise auf ein Vielfaches verstärkt werden. Weiterhin darf das Auge bei der Bildübertragung nicht bemerken, daß der Elektronenstrahl die Bildpunkte des Leuchtschirms nacheinander abtastet. Die vollständige Abbildung, die auf dem Schirm der Bildwiedergaberöhre im Verlauf eines Bewegungszyklus des Elektronenstrahls erzeugt wird, heißt „Bild“. Die Bildwechselfrequenz muß so gewählt werden, daß das Auge wegen seiner natürlichen Trägheit kein Flimmern des Bildes bemerkt, d. h., die Bildwechselfrequenz muß größer als die Verschmelzungsfrequenz des Auges sein.

Aber welche Bildwechselfrequenz sollten wir nun konkret wählen? Hier ergibt sich die Notwendigkeit, die Bildwechselfrequenz mit der Netzfrequenz zu verknüpfen. Der Grund liegt darin, daß eine am Gitter der Elektronenstrahlröhre (d. h. also auch unserer Bildwiedergaberöhre) anliegende pulsierende Spannung auf dem Bildschirm dunkle und helle Streifen entstehen läßt. Nur wenn die Bildwechselfrequenz gleich der Netzfrequenz ist oder ein Vielfaches dieser Frequenz beträgt, stehen die erwähnten dunklen und hellen Streifen still und bleiben unbemerkt. Die Verschmelzungsfrequenz des Auges beträgt etwa 20 Hz; deshalb ist die Bildwechselfrequenz beim Fernsehen mit 25 Hz festgelegt; bei dieser Frequenz ist jedoch noch immer ein Flimmern zu bemerken. Allein deshalb auf eine Bildwechselfrequenz von 50 Hz überzugehen, wäre sehr unbequem; die Techniker haben das Problem durch folgenden Trick gelöst: Sie benutzen das Zeilensprungverfahren. Man behält die Frequenz 25 Hz bei, doch tastet

der Elektronenstrahl zuerst die geraden und dann die ungeraden Zeilen ab. Die Halbbildwechselfrequenz beträgt jetzt 50 Hz, und das Flimmern verschwindet.

Bildwechselfrequenz und Zeilenfrequenz müssen streng synchron verlaufen. Hier ist nicht der Ort, tiefer in die technischen Einzelheiten einzudringen. Wir werden deshalb nicht erklären, warum die Synchronisation es erforderlich macht, daß die Zeilenzahl ungerade ist und sich in mehrere ganzzahlige Faktoren zerlegen läßt. In den europäischen sowie in vielen außereuropäischen Ländern beträgt die Zeilenzahl 625, d. h.  $5^4$ ; da die Bildwechselfrequenz 25 Hz beträgt, ist die Zeilenfrequenz gleich 15 626 Hz. Daraus wiederum ergibt sich die Bandbreite des Fernsehsignals.

Die kleinste auftretende Frequenz ist die Halbbildwechselfrequenz von 50 Hz. Die höchste Frequenz ergibt sich aus der Übertragungsdauer für ein Bildelement.

Aus einer verhältnismäßig einfachen Rechnung, die wir hier nicht anführen wollen, geht hervor, daß man diese Frequenz gleich 6,5 MHz wählen muß. Daraus folgt, daß die Trägerfrequenz des Senders nicht kleiner als 40 bis 50 MHz sein darf, da die Trägerfrequenz mindestens sechs- bis siebenmal so groß sein muß wie die Bandbreite der übertragenen Frequenzen. Nun werden Sie auch einsehen, warum man für Fernsehübertragungen nur den UKW-Bereich verwenden darf und weshalb die Reichweite von Fernsehübertragungen auf die „Direktsichtweite“ beschränkt ist.

Aber ich habe mich versprochen; es muß heißen: ... beschränkt war. Fernsehübertragungen können über beliebige Entfernungen vorgenommen werden, wenn man Nachrichtensatelliten verwendet.

Die UdSSR setzte als erstes Land für diesen Zweck Satelliten ein. Zur nachrichtentechnischen Versorgung der Sowjetunion werden gegenwärtig eine ganze Reihe von Satelliten benutzt.

Ohne hier den Aufbau hochleistungsfähiger Fernsehsender zu berühren, wollen wir einige interessante Zahlen anführen, die die außerordentlichen Möglichkeiten der Elektronik von heute bei der Signalverstärkung kennzeichnen. Ein gewöhnliches Videosignal hat vor der Verstärkung eine Leistung von etwa  $10^{-3}$  W; mit Hilfe eines Leistungsverstärkers wird eine millionenfache Verstärkung bewirkt. Die so erhaltene Leistung von  $10^3$  W wird auf eine Parabolantenne von etwa 30 m Durchmesser gegeben. Diese Antenne liefert einen scharf gebündelten Strahl, der vom Satelliten reflektiert wird. Wenn die elektromagnetische Welle die Entfernung bis zum Satelliten zurückgelegt hat (etwa 35 000 km), beträgt ihre Leistung nur noch  $10^{-11}$  W.

Der im Satelliten installierte Verstärker erhöht die Leistung dieses äußerst schwachen Signals ungefähr auf 10 W. Das vom Satelliten ausgesandte Signal kehrt mit einer Leistung von  $10^{-10}$  W auf die Erde zurück. Hier wird durch Verstärkung die ursprüngliche Leistung des Videosignals von  $10^{-3}$  W wiederhergestellt.

Ich könnte mir denken, daß selbst ein sehr optimistisch eingestellter Ingenieur angesichts dieser Zahlen noch vor zehn Jahren ungläubig den Kopf geschüttelt hätte.

### **Mikroelektronik**

Wir sind gegenwärtig Zeugen, wie innerhalb der Elektronik eine revolutionierende Entwicklung stattfindet: die außerordentlich weitgehende Miniaturisierung elektronischer Bauteile und -gruppen.

Mit der fortschreitenden Erweiterung der Funktionen, die elektronischen Geräten von ihren Konstrukteuren übertragen wurden, wuchs auch die Anzahl der benötigten Bauelemente. Das aber ließ eine ganze Reihe von Problemen entstehen. In elektronischen Geräten klassischer Bauweise, d. h. bei Röhrenbestückung und Verbindung

der einzelnen Bauelemente durch Schaltdrähte, erreicht die Bauelementedichte nur  $0,1 \text{ cm}^{-3}$ . Anders ausgedrückt: Das durchschnittliche Volumen eines Bauelements beträgt  $10 \text{ cm}^3$ .

Natürlich ist auch die Gesamtmasse elektronischer Geräte in ihrer klassischen Ausführung groß. Hierfür nur ein Beispiel: Der erste programmgesteuerte Elektronenrechner ENIAC (Electronical Numeric Integrator and Computer) enthielt etwa eine halbe Million Bauteile, davon allein 18 000 Elektronenröhren und 10 000 Kondensatoren; seine Gesamtmasse betrug 30 t.

Doch große Masse und großes Volumen sind nicht die einzigen Nachteile der herkömmlichen Bauweise. Um 20 000 Elektronenröhren nur zu heizen, sind 40 kW erforderlich. Beim ENIAC betrug der Stromverbrauch 175 kWh. Eines der unangenehmsten Probleme, das die Konstrukteure der ersten Großrechner zu bewältigen hatten, war, für die Abführung der darin erzeugten Wärme zu sorgen. Wir können also verstehen, warum die Rechner damals — halb im Scherz und halb im Ernst — als „kleine Heizkraftwerke“ bezeichnet wurden.

Enthält eine elektronische Anlage sehr viele Bauelemente, und führt bereits der Ausfall eines einzigen Bauelements zur Funktionsbeeinträchtigung bzw. Funktionsunfähigkeit der gesamten Anlage, spielt die Zuverlässigkeit der Bauelemente eine große Rolle. Auch sie war bei den Bauelementen „alten Stils“ sehr unbefriedigend. Weil jedoch nicht nur Bauelemente ausfallen können, sondern auch die Lötstellen, mit denen sie untereinander verbunden werden müssen, war die Zuverlässigkeit generell zur „Achillesferse“ der Elektronik geworden. Hier mußte unbedingt Abhilfe geschaffen werden.

Und noch etwas. Die alten Bauelemente waren „langsam“ gewesen. Es spielte keine Rolle, wie lange ein Signal brauchte, um von einem Bauteil zum anderen zu gelangen. Jetzt war es anders: Die sogenannte Signallauf-

zeit mußte verkürzt werden, wollte man die Vorteile nutzen, die die wesentlich kürzeren Schaltzeiten der bereits existierenden „schnellen“ Bauelemente boten.

Die Folgerung lag auf der Hand: Die Bauelemente mußten kleiner werden und enger aneinanderrücken. Das Ergebnis entsprechender Entwicklungsarbeiten war die Mikroelektronik.

Ihre Vorstufe bestand im Einsatz gedruckter Schaltungen bei gleichzeitiger Verkleinerung konventioneller Bauelemente. Dann kamen Modultechnik und Mikro-modultechnik. Anfang der fünfziger Jahre begann man häufig wiederkehrende elektronische Baugruppen auf Keramikplättchen einheitlicher Größe (etwa 24 mm × × 24 mm) zu montieren. Jedes Plättchen trug meist nur ein Bauelement. Von den Bauelementen führten aufgedruckte oder eingebrannte leitende Verbindungen zu metallisierten Kerben am Plättchenrand. Die Plättchen wurden übereinandergestapelt und in den Kerben durch eingelegte und verlötete Steigdrähte miteinander verbunden. Die so entstandenen Bauteilkombinationen wurden nach Prüfung luft- und feuchtigkeitsdicht umgossen.

Etwa zur gleichen Zeit kam die Massenfertigung von Halbleiterbauelementen auf. Jetzt konnte man die Keramikplättchen auf etwa 10 mm × 10 mm verkleinern. Die so erhaltenen Module wurden als Mikromodule bezeichnet.

Obwohl es auf diesem als Miniaturisierung bzw. Subminiaturisierung bezeichneten Weg gelang, Bauelementedichten von  $10^1$  bis  $10^2$  Bauelementen je  $\text{cm}^2$  zu realisieren, blieb es doch nur bei der Zusammenfassung diskreter Bauelemente zu Elementarschaltungen; die Störeinflüsse der vielen nach wie vor erforderlichen Leitungen und Kontakte konnten nur reduziert werden, und der Zuverlässigkeitsgewinn war nicht groß. Auch wurde deutlich, daß auf diesem Weg kein wesentlicher Fortschritt mehr zu erreichen sein würde.

Daher entschied man sich für den Übergang zu den sogenannten integrierten Schaltungen. Integrierte Schaltungen (abgekürzt IC von integrated circuit) erreichen Bauelementedichten von 100 bis mehr als 1000 Bauelementen je  $\text{cm}^2$ . Wie wir sehen, wird eine erheblich dichtere Packung der Bauelemente erreicht. Gleichzeitig fallen infolge der hier angewendeten Herstellungsverfahren sehr viele Lötstellen weg, die bei der Miniaturelektronik noch immer erforderlich waren. Der erreichte Zuverlässigkeitsgewinn ist beträchtlich. Weil gleichzeitig auch viele Verbindungsleitungen wegfallen bzw. stark verkürzt werden, gelingt durch Herabsetzung der Signallaufzeiten eine wesentliche Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit integrierter Schaltungen im Vergleich zu miniaturisierten oder gar konventionellen Schaltungen.

Mit diesen integrierten Schaltungen beginnt die Mikroelektronik im eigentlichen Sinne.

Ihre oben geschilderten Vorzüge setzen allerdings ganz andere Herstellungsverfahren voraus. Während bis dahin die Bauelemente einzeln hergestellt wurden, um dann montiert und gegebenenfalls zu Modulen zusammengefaßt zu werden, erfolgt in der Mikroelektronik die Fertigung kompletter Schaltkreise „auf einmal“. Nach der Anzahl von „Bauelementen“, die in einem IC zusammengefaßt sind, unterscheidet man SSI-Schaltungen (von small scale integration), die eine oder mehrere einfache Baustufen in einer Schaltung enthalten. Wird eine komplette Baugruppe als IC gefertigt, spricht man von MSI-Schaltungen (von middle scale integration). Die LSI-Schaltungen (von large scale integration) enthalten schließlich — integriert in einem einzigen Baustein — einen vollständigen logischen Komplex.

Aus dem bisher Gesagten geht bereits hervor, daß der Übergang von der Miniaturelektronik zur Mikroelektronik wiederum eine beträchtliche Erhöhung der Bauelementedichte (oder Packungsdichte) mit sich gebracht hat.

Betrug diese im Fall der Miniaturelektronik noch zehn bis zwanzig Bauelemente je  $\text{cm}^3$ , so erreicht die Mikroelektronik heute schon über 1000 Bauelemente je  $\text{cm}^3$ , während das angestrebte Ziel bei 10 000 Bauelementen je  $\text{cm}^3$  liegt!

Wie konnte dieser Sprung in eine völlig neue Qualität vollzogen werden? Um das zu verstehen, müssen wir uns daran erinnern, was bei Behandlung der Halbleiterbauelemente über die  $p$ - $n$ -Übergänge gesagt worden ist. Wir haben dort — als Beispiel — die Vorgänge geschildert, die an der Berührungsstelle zweier Stäbe auftreten, deren einer aus  $p$ -leitendem und der andere aus  $n$ -leitendem Material besteht. Jetzt müssen wir uns noch einmal vergegenwärtigen, daß sich alles dort Gesagte wirklich nur auf den Übergang, also die Berührungsstelle beider Halbleiter, bezieht. Für die eigentliche Funktion ist immer nur der Übergang von Belang, während der jeweilige „Rest“ des Materials keine Rolle spielt. Statt zwei Stäbe aus  $p$ - bzw.  $n$ -Material an ihren Stirnflächen zusammenzupressen, würde es auch genügen, zwei dünne Plättchen solcher Halbleiterwerkstoffe miteinander zu verbinden. Zu diesem Zweck könnte man etwa an den Stirnseiten der beiden Stäbe unseres früheren Beispiels jeweils ein dünnes Scheibchen abschneiden. Das wäre ein mechanischer Arbeitsgang. Wollte man jedoch durch Anwendung einer mechanischen Technologie zu immer dünneren „Scheibchen“ gelangen, käme man schon bald an die Grenze, wo der Technologe verzweifelt ausruft: „Also, dünner geht's nun wirklich nicht!“

So mußte man sich zur Erzielung der benötigten dünnen Schichten nach einer anderen Technologie umsehen. Grundsätzlich geeignete Technologien gab es bereits, bevor die Mikroelektronik aufkam; sie mußten „nur“ dem speziellen Zweck angepaßt und insbesondere hinsichtlich der zu erreichenden Genauigkeit verfeinert werden. Da die einschlägigen Verfahren außerordentlich wichtig sind,

wollen wir sie hier in ihren Grundzügen schildern. Unsere Darstellung muß sich freilich auf das Wesentliche beschränken, und niemand sollte glauben, die praktische Realisierung wäre auch nur annähernd so simpel, wie sie es unserer vereinfachten Darstellung nach zu sein scheint.

Ein Verfahren zur Aufbringung dünner Schichten kennen Sie alle; es ist schon seit einigen Jahrhunderten in Gebrauch: die Drucktechnik. Jedes Blatt des Buches, das Sie gerade lesen, besteht aus dem Trägermaterial (also dem Papier) und den darauf befindlichen Druckzeichen, die ja nichts anderes als dünne Farbstoffschichten sind. Verwendet man als Trägermaterial (auch als Substrat bezeichnet) einen Isolierstoff — hier haben sich aus mancherlei Gründen keramische Werkstoffe sehr bewährt — und druckt statt mit Druckfarben mit leitfähigen Pasten, so erhält man eine leitfähige Schicht auf einer Isolierstoffunterlage. Damit die leitfähige Paste nur dort auf das Substrat gelangt, wo dies beabsichtigt ist, bedient man sich des Siebdruckverfahrens, d. h., man bringt zwischen Substrat und Druckwalze eine Schablone, die die Paste nur an den gewünschten Stellen durchtreten läßt.

Damit sind wir aber noch nicht am Ende unserer Möglichkeiten: Im nächsten Druckvorgang können wir nämlich unter Verwendung einer anderen Siebdruckschablone Isolierlack aufbringen, der die leitfähige Schicht an ganz bestimmten Stellen abdeckt. Und so fahren wir fort und drucken noch ein drittes Mal — diesmal wieder mit einer leitfähigen Paste — wobei die Leitfähigkeit der Paste im ersten und im zweiten Fall natürlich durch entsprechende Änderung ihrer Zusammensetzung variiert werden kann. Auch die dritte so aufgedruckte Schicht wird mit Isolierlack versehen, der nur an bestimmten Stellen Aussparungen aufweist, an denen man — als weitere Schicht — eine Kontaktierungspaste aufbringt. Kontaktierungspasten werden der besseren Leitfähigkeit wegen oft mit einem Goldzusatz versehen.

Betrachten wir das Ergebnis unserer Bemühungen nun einmal im Querschnitt: Wurde als erste Paste ein Material mit relativ hohem Widerstand auf das Substrat gebracht, so stellt jedes Stück einer Leiterbahn natürlich einen Widerstand dar, dessen Wert von Querschnitt und Länge abhängt. Zwei übereinanderliegende und an den richtigen Stellen miteinander verbundene Leiterbahnen entsprechender Form bilden eine „flachgedrückte“ Spule, also eine Induktivität.

Die beiden aus leitfähigen Pasten hergestellten Schichten sind durch eine Isolierstoffschicht, also ein Dielektrikum, voneinander getrennt; zwei durch ein Dielektrikum voneinander getrennte Schichten bilden aber einen Kondensator. So lassen sich auf engstem Raum viele Bauelemente (Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten) miteinander kombinieren, indem man nur an ganz bestimmten Stellen leitfähige Pasten bzw. Isolierlacke aufbringt. Damit die Pasten nach jedem Druckvorgang auch die notwendige mechanische Festigkeit erhalten, werden sie abhängig von der im konkreten Fall verwendeten Technologie getrocknet, gehärtet oder eingebrannt.

Wir hatten eingangs festgestellt, unser Ziel sei die Herstellung „dünner“ Schichten. Paradoxerweise heißt die hier geschilderte Technik jedoch „Dickschichttechnik“. Die Dicke der einzelnen Schichten beträgt nämlich etwa 30  $\mu\text{m}$ . Es geht aber noch dünner!

Die Dünnschichttechnik erreicht Schichtdicken um 10  $\mu\text{m}$ . Auch hier geht man von einem Substrat aus, nur daß es jetzt seltener aus Keramik, sondern meist aus bestimmten Gläsern besteht. Die Folgeschichten werden durch Aufdampfen oder Katodenzerstäubung (im Vakuum) aufgebracht. Damit die einzelnen Schichten die gewünschte geometrische Konfiguration haben, verwendet man, ähnlich wie bei der Dickschichttechnik, Schablonen, bezeichnet sie aber der besseren Unterscheidung wegen als Masken. Da die Maskenherstellung sehr kostenauf-

wendig ist, lohnt sich die Maskentechnik nur, wenn die betreffenden Bauteile in großer Stückzahl produziert werden sollen. Dafür allerdings erreicht man mit der Dünnschichttechnik höhere Zuverlässigkeit, engere Toleranzen und größere Stabilität der elektrischen Parameter.

Eine andere Variante der Dünnschichttechnik besteht im Sandwichprinzip. Dabei werden zunächst alle erforderlichen Schichten nacheinander auf dem Substrat aufgebracht und die nicht benötigten Teile der einzelnen Schichten anschließend mittels Elektronen- oder Laserstrahl entfernt (Elektronenstrahlfräsen!).

Zeitlich etwa parallel zur Entwicklung der Dick- und Dünnschichttechnik hatte die Fertigung von Halbleiterbauelementen große Fortschritte gemacht. Die Planar-Epitaxie-Technik entstand. Was versteht man darunter? Epitaxie bedeutet Kristallwachstum, und der Zusatz „Planar“ gibt an, daß das Kristallwachstum „in der Ebene“ oder „flächenhaft“ erfolgt. Doch die Wortklärung allein hilft uns nicht viel weiter. Wir müssen uns schon ansehen, wie es wirklich gemacht wird. Anders als in der Dick- und Dünnschichttechnik dient bei der Planar-Epitaxie-Technik ein Halbleiterplättchen als Substrat. Die Oberfläche des Substrats muß zunächst mit einer Isolierstoffschicht versehen werden; allerdings verwendet man dafür keinen Isolierlack wie in der Dick- bzw. Dünnschichttechnik, sondern unterzieht das Halbleitersubstrat (wir wollen in unserem Beispiel annehmen, daß es sich dabei um ein Plättchen aus einkristallinem Silizium handelt) einer chemischen Behandlung. Dadurch wird an der Siliziumoberfläche eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht erzeugt. Da diese Schicht eine recht große mechanische Festigkeit besitzt, wirkt sie nicht nur als Isolator, sondern schützt den Siliziumeinkristall, der uns als Substrat dient, zugleich sehr wirksam vor schädlichen Einflüssen aller Art. An bestimmten Stellen freilich müssen wir die  $\text{SiO}_2$ -

Schicht wieder entfernen, um an dem darunterliegenden Silizium weitere technologische Operationen vornehmen zu können. Auch dafür wird eine Maskentechnik verwendet, die sich allerdings von der Schablonen- bzw. Maskentechnik, wie wir sie bisher kennengelernt haben, grundlegend unterscheidet. Die gesamte  $\text{SiO}_2$ -Schicht wird mit einem lichtempfindlichen Lack, dem sogenannten Fotolack, abgedeckt. Dieser Lack hat die Eigenschaft, in bestimmten Lösungsmitteln (im einfachsten Fall Wasser) löslich zu sein, solange er nicht belichtet worden ist. Bei Belichtung verliert der Lack an den belichteten Stellen seine Löslichkeit; er härtet aus. Deckt man die Fotolackschicht mit einer geeigneten Maske ab und belichtet durch die Maske hindurch mit UV-Licht, so erhält man an allen Stellen, wo die unter dem Fotolack befindliche  $\text{SiO}_2$ -Schicht erhalten bleiben soll, eine fest haftende und mechanisch widerstandsfähige Lackschicht. Dort, wo die Maske eine Belichtung des Lacks verhütet hat, kann der Lack leicht weggelöst werden. Als nächster Schritt folgt die Ätzung, die die  $\text{SiO}_2$ -Schicht überall dort entfernt, wo sich keine ausgehärtete Lackschicht befindet. In der  $\text{SiO}_2$ -Schicht entstehen auf diesem Weg sogenannte Fenster. Je nach der angewendeten Ätzzeit kann man die im Substrat erzeugten Fenster unterschiedlich „tief“ werden lassen. Der nächste Arbeitsschritt besteht in der Entfernung auch der ausgehärteten Fotolackschichten. Bringt man das so vorbehandelte Substrat im sogenannten Epitaxie-Ofen mit geeigneten Metaldämpfen in Berührung, so schlagen sich diese in den Fenstern nieder, d.h., dort setzt sich das Kristallwachstum auf dem Substrat fort. Besteht die epitaktische Schicht aus dem gleichen Material wie das Substrat, so spricht man von Homoepitaxie, sonst jedoch von Heteroepitaxie. Die epitaktisch aufgewachsenen Halbleiterschichten sind sehr eben (planar!) und können durch Zugabe von Fremdatomen während des Aufwachsens sehr genau dotiert werden.

Alle bisher geschilderten Vorgänge lassen sich mehrfach wiederholen. Die in den Fenstern erzeugten epitaktischen Schichten können erneut durch das  $\text{SiO}_2$  verschlossen, danach mit (kleineren) Fenstern versehen und mit einer weiteren Halbleiterschicht ausgestattet werden. Analog erfolgt die Anbringung der Kontakte.

Die Verwendung von Masken aus lichtempfindlichem Lack war in ihren Grundzügen auch schon vor dem Aufkommen der Mikroelektronik bekannt; interessanterweise ebenfalls aus der polygrafischen Technik. Es wird als „Fotolithographie“ bezeichnet.

Da bei der zuletzt geschilderten Technologie als Substrat ein Halbleiter dient, spricht man hier auch von der sogenannten Halbleiterblocktechnik. Alle technologischen Operationen, die wir in diesem Zusammenhang erwähnten, haben den großen Vorzug, daß man sie gleichzeitig an vielen tausend Halbleiterbausteinen durchführen kann. Erst die damit verbundene Steigerung der Arbeitsproduktivität war die Voraussetzung, daß die Mikroelektronik sich großtechnisch und ökonomisch durchsetzen konnte.

Durch Kombination etwa von Dünnschicht- und Halbleiterblocktechnik gelangt man zu verschiedenen Hybridtechniken. Wir können sie an dieser Stelle nicht einmal aufzählen. Das Gebiet ist in den letzten Jahren so umfangreich geworden, daß uns an dieser Stelle nur für eine grobe Skizzierung des „Skeletts“ Raum geblieben ist.

Und wie geht es weiter? Strukturen mit Halbleiterübergängen lassen sich nicht nur „flächenhaft“, sondern auch räumlich erzeugen. Dies führt uns in den Bereich der sogenannten Molekularelektronik. Obwohl ihre Entwicklung noch am Anfang steht, dürfen wir im Ergebnis wiederum eine erhebliche Steigerung der Bauelemente- oder Packungsdichte erwarten. Lassen wir uns überraschen.

---



Der populärwissenschaftliche Kursus „Physik für alle“ findet mit „Elektronen“ von Kitaigorodski eine gelungene Fortsetzung. Bisher erschienen sind die Bände „Physikalische Körper“ und „Moleküle“ des pädagogisch erfahrenen Autorenkollektivs Landau/Kitaigorodski.

Der Autor behandelt in recht unkonventioneller, einfühlsamer Weise die physikalischen Phänomene des elektrischen und magnetischen Verhaltens der Stoffe. Er berichtet über elektrische Stromkreise, berührt die Grundlagen der Quantenphysik, zeigt einfache Strukturen der Stoffe, widmet sich der Physik der Gasentladungen, dem Plasmazustand und bringt technische Anwendungen der Halbleiter. Nach vielen Ausflügen in die Geschichte der Physik gibt er einen Ausblick auf hypothetische Entwicklungen der nächsten Jahrzehnte.