

Grundriss der Physik

von

Dr. W. Guttman

17.–20. Auflage

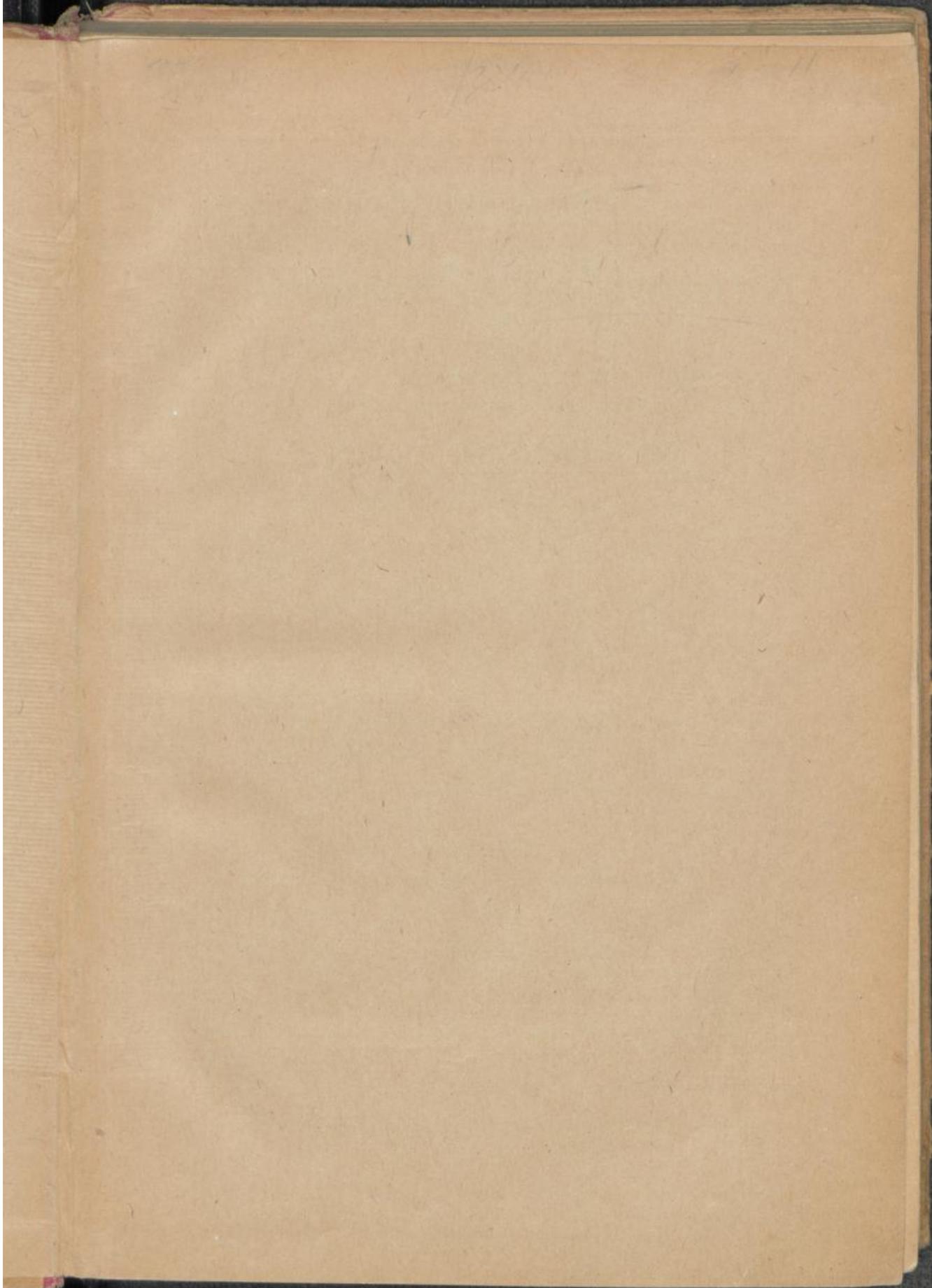
Georg Thieme / Leipzig

EX LIBRIS
LOSEC DOOR ZWANG
VFREIHEIT IN BINDUNG

Dr. Helmut Bester

E. KLÄSER / 1916

DV 5168 ²⁰



GEORG THIEME / VERLAG / LEIPZIG

Rauber's Lehrbuch
der
Anatomie des Menschen

bearbeitet von

Prof. Dr. Fr. Kopsch,

I. Assistent am Anatomischen Institut zu Berlin.

Neu ausgestattete Ausgabe.

XI. Auflage.

- Abt. 1. **Allgemeiner Teil.** 238 teils farbige Abbildungen.
Erscheint im April 1920.
- „ 2. **Knochen, Bänder.** 430 teils farbige Abbildungen.
Gebunden M. 15.—.
- „ 3. **Muskeln, Gefäße.** 401 teils farbige Abbildungen.
Gebunden M. 20.—.
- „ 4. **Eingeweide.** 471 teils farbige Abbildungen.
Gebunden M. 21.50.
- „ 5. **Nervensystem.** 420 teils farbige Abbildungen.
Erscheint im Mai 1920.
- „ 6. **Sinnesorgane, Generalregister.** 279 teils farbige
Abbildungen. Erscheint im Sommer 1920.

□ □ □

Das altberühmte Werk bietet mit seiner von keinem anderen Lehrbuch erreichten reichhaltigen illustrativen Ausgestaltung das Vollkommenste, was die moderne Technik schafft. Durch Vergrößerung des Formates war es möglich, die Abbildungen so groß herzustellen, wie sie keiner der neueren Atlanten bringt.

Die neue Ausgabe macht daher die Anschaffung eines Atlas überflüssig, vereinigt also in sich die Vorzüge eines **Lehrbuchs** und eines **Atlas**.

*Zu den angeführten Preisen tritt ein Teuerungszuschlag von 60 Prozent
und der jeweilige Sortiments-Teuerungszuschlag.*

Grundriss der Physik

für Studierende

besonders

für Mediziner und Pharmazeuten

von

Walter Guttman

Oberstabsarzt z. D. an der Kaiser-Wilhelms-Akademie für das militärärztliche
Bildungswesen

Mit 185 Abbildungen

Siebzehnte bis zwanzigste Auflage

Leipzig 1919 / Georg Thieme

Handwritten text in German, likely a preface or introduction, mentioning the author's name and the title of the work.

- 1. Auflage: Juni 1896.
- 2. Auflage: Januar 1901.
- 3. Auflage: Januar 1904.
- 4. Auflage: September 1906.
- 5. Auflage: April 1908.
- 6. Auflage: August 1909.
- 7.— 9. Auflage: Juli 1910.
- 10.—12. Auflage: September 1913.
- 13.—16. Auflage: Februar 1918.
- 17.—20. Auflage: August 1919.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
— Historische Zeit —
DUISBURG
V5753

Alle Rechte, gleichfalls das Recht der Übersetzung in die russische Sprache, vorbehalten.
Copyright 1919 by Georg Thieme, Leipzig, Germany.

Vorwort.

Aus dem raschen Absatz der bisherigen Auflagen und aus vielen anerkennenden Zuschriften von Studierenden darf ich wohl mit Recht schließen, daß der Grundriß seinen Zweck, „die wichtigsten Gesetze und Tatsachen der Physik in kurzer, aber doch klarer und verständlicher Form vorzuführen“, erfüllt. Jeden Hinweis auf wünschenswerte Änderungen werde ich stets mit Dank entgegennehmen.

Zur Vermeidung von Mißverständnissen sei nochmals betont, daß der Grundriß keineswegs die Bestimmung hat, die größeren, zum Teil ausgezeichneten, Lehrbücher zu ersetzen. Er soll vielmehr denjenigen, die Physik nur als Nebenfach studieren, also Medizinern, Pharmazeuten, Zahnärzten usw., in erster Linie als kurze Einleitung in die Physik dienen; er soll ihnen ferner ein Hilfsmittel beim Hören von Vorlesungen sein, indem er das lästige Nachschreiben nach Möglichkeit erspart; und schließlich soll er sich als Repetitorium nützlich erweisen, indem er das zum Examen Notwendigste in übersichtlicher Form darbietet.

W. Guttmann.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1—4
Mechanik	4—51
A. Allgemeine Grundbegriffe	4
B. Gesetze der festen Körper	11
C. Gesetze der flüssigen Körper	31
D. Gesetze der luftförmigen Körper	41
Allgemeine Wellenlehre	51—60
Akustik	60—69
Wärmelehre	69—95
A. Mechanische Wärmetheorie	69
B. Ausdehnung durch Wärme	72
C. Änderung des Aggregatzustandes	78
D. Spezifische Wärme	89
E. Fortpflanzung der Wärme	92
Optik	95—130
A. Ursprung und Ausbreitung des Lichtes	95
B. Reflexion des Lichtes (Katoptrik)	99
C. Brechung des Lichtes (Dioptrik)	103
D. Dispersion, Absorption, Spektralanalyse	115
E. Interferenz und Polarisierung	121
Magnetismus	134—139
Elektrizität	140—201
A. Statische Elektrizität	140
B. Strömende Elektrizität	151
a) Der galvanische Strom und seine Gesetze	151
b) Wärme-, Licht- und chemische Wirkungen	163
c) Elektromagnetismus und Elektrodynamik	177
d) Induktion	176
e) Entladungen in verdünnten Gasen. Radioaktivität	185
f) Elektrische Schwingungen	191
Anhang: Die wichtigsten Definitionen, Gesetze und Formeln	211—210
Register	210—219
Verzeichnis der anderen Werken entnommenen Abbildungen	223

Die engeren Beziehungen der Physik
in der Chemie

Einleitung.

§ 1. **Physik und Chemie.** Die Physik¹ beschäftigt sich mit den Kräften, die in der Natur walten, die Chemie dagegen mit der stofflichen Zusammensetzung der Körper. Ist z. B. Eisen der Luft ausgesetzt, so rostet es, d. h. es entsteht durch Verbindung mit dem Sauerstoff und Wasserstoff der Luft ein ganz neuer Körper, nämlich Eisenoxydhydrat. Bestreicht man dagegen Eisen mit einem Magnet, so ist zwar stofflich kein Unterschied zu bemerken, aber das Eisen hat eine neue Kraft, nämlich magnetische Wirkung, bekommen. Der erste Vorgang fällt in das Gebiet der Chemie, der zweite in das der Physik. Beide Gebiete sind aber nicht scharf voneinander abzugrenzen, da Kraft und Stoff nur begriffliche Abstraktionen sind, die in Wirklichkeit nie allein vorkommen, sondern stets untrennbar miteinander verbunden sind. Ihre gesonderte Betrachtung geschieht nur aus praktischen Gründen.

Die scheinbar trivialen Wahrheiten, daß aus nichts nichts entstehen, und daß umgekehrt nichts spurlos verschwinden kann, bilden die Grundlagen der Physik und Chemie, die noch nicht allzu lange Zeit sicher festgestellt sind. LAVOISIER bewies nämlich am Ende des 18. Jahrhunderts mit der Wage das Gesetz von der Unzerstörbarkeit des Stoffes, ROBERT MAYER sprach 1842 das Gesetz von der Unzerstörbarkeit der Kräfte aus, auch Gesetz von der Erhaltung der Energie genannt.

§ 2. **Atome und Moleküle.** Bezüglich der Beschaffenheit des Stoffes (der Materie²) wird heute ziemlich allgemein die Atomtheorie DALTONS angenommen, deren Anfänge bis auf DEMOKRIT zurückgehen. Danach bestehen die Körper aus kleinsten, selbst mikroskopisch unsichtbaren Teilchen, den Atomen³, die man sich durch fortgesetzte Teilung entstanden denken kann. Diese können aber nicht allein existieren, sondern bilden Komplexe von mindestens zwei Atomen, die sogenannten Moleküle⁴. Bei den Elementen (d. s.

¹ φυσική (Ἑσπερία) eigentlich nur: Naturforschung. — ² Mütter- oder Ursubstanz; von mater Mutter. — ³ ἄτομος unteilbar. — ⁴ Diminutiv von moles Masse.

solche Stoffe, die sich mit den heutigen Mitteln nicht weiter zerlegen lassen) bestehen nun die Moleküle aus gleichen Atomen, bei zusammengesetzten Verbindungen aus verschiedenen. Also ein Molekül Wasserstoff (H) besteht aus 2 Atomen H , ein Molekül Salzsäure (HCl) dagegen aus 1 Atom H und 1 Atom Cl . Zwischen diesen Körpermolekülen nimmt man einen äußerst feinen, unsichtbaren Stoff, den Äther, an, der noch kleinere Moleküle besitzt und zur Fortpflanzung von Licht, Wärme und Elektrizität dient.

So große Erfolge die moderne Wissenschaft der Atomistik verdankt, so muß man sich doch erinnern, daß es sich hier nur um eine Hypothese handelt, zumal die Annahme von unteilbaren (*átomos*) Körpern eine *contradictio in adjecto* ist. Es sei gleich hier darauf hingewiesen, daß auch alle anderen Grundbegriffe der Physik nicht vorstellbar sind, z. B. Äther, Anziehung, Zeit und Raum, mag man letztere als objektive Größen oder als Form des Denkens betrachten. — In neuester Zeit nimmt man übrigens als letzte Einheiten mit negativer Elektrizität geladene aller kleinste Massenteilchen, die sog. Elektronen, an [vgl. §§ 207, 210, 212].

§ 3. **Aggregatzustände.** Je nachdem die Moleküle eines Körpers näher oder weiter voneinander entfernt sind, unterscheidet man drei Aggregatzustände¹, den festen, flüssigen und gasförmigen. Feste Körper haben bestimmtes Volumen² und bestimmte Gestalt; flüssige Körper bestimmtes Volumen, wechselnde Gestalt; gasförmige Körper weder bestimmtes Volumen, noch bestimmte Gestalt [vgl. §§ 36, 45].

§ 4. **Maßeinheiten.** Bevor die Physik ihre Hauptaufgabe, das Wesen der Kräfte festzustellen, erfüllen kann, ist es nötig, die verschiedenen Formen der Kräfte bzw. die von ihnen an der Materie hervorgebrachten Wirkungen zu messen. Die konventionell gewählten Maßeinheiten sind folgende:

Als Längeneinheit gilt das Meter. Ursprünglich war es als 40 millionster Teil des Erdmeridians gewählt worden; doch trifft dies nach neueren Messungen nicht genau zu. Jetzt gilt als Urmaß das aus Platin-Iridium gemachte „Mètre des archives“ in Paris. Anstelle des Meters dienen auch Bruchteile desselben, speziell das Zentimeter, als Maßeinheiten.

Lineare Maße: 1 Meter (m) = 10 Dezimeter³ (dm) = 100 Zentimeter (cm)
= 1000 Millimeter (mm).
1 Mikron (μ) = 0,001 mm.
1 Mikromillimeter ($\mu\mu$) = 0,001 μ = 0,000001 mm.

¹ Aggregat ist ein durch Vereinigung getrennter Einheiten entstandenes Ganzes, von *aggrego* anhäufen. — ² Der von einem Körper eingenommene Raum: eigentlich etwas Zusammengerolltes, von *volvo* wälzen. — ³ Die lateinischen Vorsilben Dezi-, Zenti-, Milli- bezeichnen den zehnten, hundertsten, tausendsten Teil, die griechischen Dekka-, Hekto-, Kilo- das

100 Quadratmeter = 1 Hektar
100 Liter = 1 Hektoliter
(1 Morgen = 2500 qm) usw.

1 Meile = 7,5 Kilometer
= 2500 m

Flächenmaß: 1 Quadratmeter (qm oder m^2) = 10 · 10 Quadratdezimeter (qdm oder dm^2) = 1000 · 1000 Quadratmillimeter (qmm oder mm^2) usw.

Raum- oder Volummaß: 1 Kubikmeter (cbm oder m^3) = 10 · 10 · 10 Kubikdezimeter (cdm oder dm^3) = 100 · 100 · 100 Kubikzentimeter (ccm oder cm^3) usw. — 1 Kubikdezimeter, auch Liter (l) genannt, ist also 0,001 Kubikmeter und enthält 1000 Kubikzentimeter.

Als Masseneinheit gilt die Masse, die 1 Kubikdezimeter (1 Liter) Wasser von 4° Celsius (also im Zustand der größten Dichte) besitzt. Da nun 1 Liter Wasser von 4° C 1 Kilogramm wiegt, kann die Masseneinheit auch definiert werden als diejenige Masse, die 1 Kilogramm wiegt. Diese Einheit wird ebenfalls als Kilogramm bezeichnet. Noch häufiger dient der tausendste Teil dieser Größe, das Gramm, als Einheit. Es ist also die Masse, die 1 Kubikzentimeter Wasser von 4° besitzt¹. Auch hier gilt wieder das aus Platin-Iridium bestehende „Kilogramme des archives“ in Paris als Urmaß.

1 Kilogramm (kg) = 1000 Gramm (g oder gr). 1 Gramm = 10 Dezi- gramm (dg) = 100 Zentigramm (cg) = 1000 Milligramm (mg).

Als Zeiteinheit gilt die Sekunde oder der 86400. Teil des mittleren Sonnentages.

§ 5. Absolute Maßsysteme. In der Neuzeit ist man bemüht, alle physikalischen Größen in absoluten Maßen auszudrücken, d. h. auf die Einheiten der Länge, Masse, Zeit zurückzuführen. Man erhält dann die Dimension der betreffenden Größe. Gegenwärtig ist dasjenige absolute Maßsystem am gebräuchlichsten, dessen Grundeinheiten Zentimeter, Gramm und Sekunde sind. Spricht man von absolutem Maßsystem schlechthin, so meint man stets dieses Zentimeter-Gramm-Sekunden- (cm. gr. sec.- oder C.G.S.-) System. Im folgenden sind an den betreffenden Stellen für einige wichtige Größen die Dimensionen — allgemein und im C.G.S.-System — angeführt.

§ 6. Nonius. Um die Länge eines Körpers auch in Bruchteilen eines Maßstabes auszudrücken, gebraucht man den sog. Nonius². Es ist dies ein kleiner, am Hauptmaßstab verschieblicher Maßstab, bei dem $n + 1$ oder $n - 1$ Teile n Teilen des ersteren entsprechen; im ersten Falle heißt er vortragend, im

Zehn- Hundert-, Tausendfache des Grundmaßes. Mega- ($\mu\beta\upsilon\alpha\varsigma$ groß) bezeichnet das Millionfache, Mikro- ($\mu\upsilon\kappa\rho\acute{o}\varsigma$ klein) den millionten Teil der Einheit.

¹ Das Wort „Gramm“ (und „Kilogramm“) bedeutet also in der Physik nicht, wie im gewöhnlichen Leben, ein Gewicht, sondern eine Masse! Es ist daher zweckmäßig, einerseits von Massengramm bzw. Grammmasse, andererseits von Grammgewicht zu sprechen [vgl. § 11]. — ² Benannt nach dem Portugiesen PETRO NUNEZ, erfunden aber 1631 von dem Niederländer PETER WERNER (VERNIER).

zweiten nachtragend. Um z. B. mit einem vortragenden Nonius, bei dem 10 Teile 9 Teilen des Hauptmaßstabes entsprechen, den Körper ab (Fig. 1) zu messen, bringt man a an den Nullpunkt des Hauptmaßstabes, schiebt dann

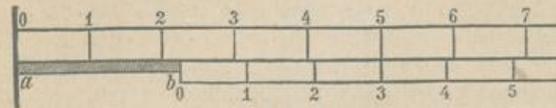


Fig. 1.

den Nullpunkt des Nonius an b heran und sieht nach, welcher Teilstrich des letzteren mit einem Teilstrich des ersteren zusammenfällt.

Ist es wie in der Figur, der dritte, so bedeutet dies, daß ab 2,3 Teilstriche des Hauptmaßstabes lang ist.

Mechanik.

A. Allgemeine Grundbegriffe.

§ 7. Die Grundlage der Mechanik, d. h. der Lehre vom Gleichgewicht und von der Bewegung der Körper, bilden die drei **Newton'schen Bewegungsgesetze**, von denen übrigens die beiden ersten schon **GALILEI** bekannt waren.

1. Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

Dieses sogenannte Trägheitsgesetz (Trägheit = Beharrungsvermögen) ist eine Erfahrungstatsache. Beispiele hierfür sind z. B. das Umfallen eines Menschen beim raschen Anfahren oder Halten eines Wagens, die Fortdauer der Bewegung eines Schwungrades nach Aufhören der antreibenden Kraft, die Bewegung der Weltkörper usw. Eine Bewegungshemmung wird namentlich durch die Reibung bewirkt [vgl. § 35].

2. Die Änderung der Bewegung ist proportional der einwirkenden Kraft und erfolgt in der Richtung der Geraden, in der jene Kraft wirkt.

Ein starker Stoß bringt z. B. einen größeren Ausschlag eines Pendels hervor als ein schwacher. Da beim Zusammenwirken mehrerer Kräfte jede einzelne derselben ohne Rücksicht auf die anderen bzw. auf eine bereits vorhandene Bewegung ihren Einfluß ausübt, so heißt das Gesetz auch **Unabhängigkeitsprinzip**.

3. Wirkung und Gegenwirkung sind einander gleich.

Dieses Prinzip der Wechselwirkung besagt also, daß die Wirkungen zweier Körper aufeinander stets gleich und von entgegengesetzter Richtung sind. So zieht z. B. nicht nur ein Magnet ein Stück Eisen an, sondern umgekehrt auch das Eisen den Magnet; ein Brett drückt ebenso stark ein auf ihm liegendes Gewicht, wie umgekehrt; die Wagen eines Zuges ziehen die Lokomotive ebenso stark an, wie diese die Wagen usw. Bei ungleichen Kräften kommt es aber natürlich schließlich zu einer fortschreitenden Bewegung in der Richtung der

stärkeren Kraft, d. h. also, das Brett wird zerdrückt, die Wagen werden fortgezogen usw. Immer ist jedoch hierbei ein Teil der stärkeren Kraft durch das Maximum der schwächeren neutralisiert.

Zum genaueren Verständnis dieser Bewegungsgesetze ist es nötig, die in ihnen enthaltenen Begriffe einzeln zu betrachten.

§ 8. **Ruhe** ist Negation der Bewegung. Da nun überall bewegende Kräfte existieren, so ist Ruhe vorhanden, wenn die einwirkenden Kräfte einander aufheben. Es gibt aber keine absolute Ruhe, nur relative. Fährt man z. B. in einem Wagen, so kann man in Beziehung auf diesen in Ruhe sein. Der Wagen aber bewegt sich auf der Erde, diese dreht sich um sich selbst und um die Sonne, und auch das ganze Sonnensystem zeigt eine fortschreitende Bewegung. In gewissem Sinne ist also alles in Bewegung (*πάντα ἔει* des HERAKLIT). Bei der Bewegung kommt in Betracht die

§ 9. **Geschwindigkeit**. Darunter versteht man die Eigenschaft eines Körpers, in einer bestimmten Zeit (in der Regel 1 Sekunde) einen gewissen Weg zurückzulegen. Sie ist um so größer, ein je längerer Weg in derselben Zeit zurückgelegt wird, andererseits um so kleiner, je mehr Zeit man zu demselben Wege braucht. Daher sagt man: Geschwindigkeit ist direkt proportional dem Wege, umgekehrt proportional der Zeit; mathematisch¹ ausgedrückt:

$$v = \frac{s}{t}$$

Daraus folgt: $s = vt \quad t = \frac{s}{v}$

Einheit der Geschwindigkeit ist die, bei der die Einheit des Weges (1 cm) in der Zeiteinheit (1 Sek.) zurückgelegt wird².

Eine Geschwindigkeit kann nun gleichförmig sein, wenn sie in jedem Augenblick gleichgroß ist, oder ungleichförmig. Die ungleichförmige Geschwindigkeit muß nach dem ersten Bewegungsgesetze durch Kräfte bedingt sein, die entweder eine Beschleunigung oder eine Verlangsamung bewirken. Letztere kann auch negative Beschleunigung genannt werden.

§ 10. **Beschleunigung** ist demnach der Zuwachs an Geschwindigkeit bezogen auf die Zeit. Sie ist nämlich um so größer, je größer die resultierende Geschwindigkeit ist, und in je kürzerer Zeit dies geschieht.

$$a = \frac{v}{t}$$

¹ Die üblichen Abkürzungen sind: *v* oder *c* für Geschwindigkeit (velocitas oder celeritas), *a* für Beschleunigung (acceleratio), *g* für Beschleunigung durch Erdanziehung (gravitas), *s* für Weg (spatium), *t* für Zeit (tempus). —

² Die Dimension [§ 5] der Geschwindigkeit ist also $\frac{l}{t}$ bzw. $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$, oder anders geschrieben, lt^{-1} bzw. cm sec^{-1} .

Einheit der Beschleunigung ist die, bei der die Einheit der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit erreicht wird¹. Die Beschleunigung kann ebenfalls wieder gleichförmig oder ungleichförmig sein. Eine gleichförmige Beschleunigung ist z. B. beim freien Fall vorhanden, eine gleichförmige Verlangsamung beim Wurf in die Höhe.

Eine gleichförmig beschleunigte Bewegung kann man sich auch ersetzt denken durch eine Bewegung von mittlerer gleichförmiger Geschwindigkeit. Hat z. B. ein Körper zuerst die Geschwindigkeit 0, und steigt dieselbe innerhalb einer Sekunde an bis v , so ist das Resultat dasselbe, als hätte er sich mit der gleichförmigen Geschwindigkeit $\frac{v}{2}$ bewegt. Der Körper legt somit in 1 Sekunde $\frac{v}{2}$ cm zurück, in t Sekunden einen Weg $s = \frac{1}{2}vt$.

§ 11. **Kraft** ist nach dem zweiten NEWTONSchen Gesetze Ursache einer Bewegungsänderung, und dadurch auch allein wahrnehmbar und meßbar. Bezeichnet man das Produkt aus Masse in ihre Geschwindigkeit ($m \cdot v$) als Bewegungsgröße, so ist eine Kraft proportional der Bewegungsgröße, die sie in der Zeiteinheit hervorbringen kann.

$$F = \frac{(mv)}{t}$$

Da man $\frac{(mv)}{t}$ auch $m \frac{v}{t}$ schreiben kann, $\frac{v}{t}$ aber, wie gezeigt, = Beschleunigung (a) ist, so kann man Kraft^b auch definieren als Produkt aus Masse (m) und ihrer Beschleunigung (a). Andererseits kann man auch sagen, daß die unter dem Einfluß einer Kraft eintretende Beschleunigung der Kraft direkt, der Masse umgekehrt proportional ist, $a = \frac{F}{m}$.

Einheit ist diejenige Kraft, die der Masseneinheit in der Zeiteinheit die Geschwindigkeit 1, oder mit anderen Worten, die der Masseneinheit die Beschleunigung 1 erteilt. Diese absolute Kraft-einheit heißt Dyne oder Dyn².

Allen Massen wird nun durch die Erde die Beschleunigung $g = 9,81m$ erteilt [§ 17], d. h. sie werden von der Erde angezogen mit einer Kraft P (Pondus) = mg . Diese auf sie ausgeübte Kraft äußern sie durch den Druck auf ihre Unterlage, mit anderen Worten durch ihr Gewicht. Daraus folgt: 1. Kräfte können durch Gewichte gemessen werden; als praktische Einheit der Kraft wird daher in der Mechanik das (Gewichts-)Kilogramm bzw. Gramm³ benutzt, das somit das

¹ Die Dimension der Beschleunigung ist also lt^{-2} bzw. $cm \text{ sec}^{-2}$. —

² Abkürzung von *dynamis* Kraft. Die Dimension [§ 5] der Kraft ist mlt^{-2} bzw. $gr \text{ cm sec}^{-2}$. — ³ Das Grammgewicht darf nicht mit dem Massengramm [§ 4] verwechselt werden. Ersteres ist ein Kraftmaß, welches ausdrückt, daß der Masseneinheit (dem Massengramm) durch die Erdanziehung die Be-

Gravitationsmaß der Kraft vorstellt. 2. Die Gewichte sind den Massen proportional, da g für jeden Ort auf der Erde eine konstante Zahl ist.

Kräfte sind sogenannte gerichtete Größen, d. h. sie haben neben einer bestimmten Größe auch eine bestimmte Richtung. Daher lassen sie sich durch Linien von bestimmter Länge und Richtung graphisch darstellen. Wenn also eine Kraft positiv genannt wird, heißt die entgegengesetzt gerichtete Kraft negativ.

Die wichtigste Form der Kraft, auf die sich in letzter Linie alle anderen zurückführen lassen, ist die Anziehung und Abstoßung zweier Massen. Die Anziehung zwischen den Teilchen desselben Körpers heißt Kohäsion, zwischen zwei verschiedenen Körpern Adhäsion¹ [vgl. § 41]. Speziell die Anziehungskraft der Weltkörper heißt Gravitation, zu der auch die Anziehungskraft der Erde, die Schwerkraft, gehört [vgl. § 17].

Nach NEWTON ziehen sich nun zwei Massen M und m in der Entfernung r an mit der Kraft

$$F = \frac{Mm}{r^2} k,$$

wobei k , der sog. Proportionalitätsfaktor, eine Zahl darstellt, die von der Natur der Körper abhängt. In Worten: die anziehende Kraft ist direkt proportional dem Produkte der Massen, umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer Entfernung.

Ist m ein Gramm an der Erdoberfläche, so läßt sich aus obiger Formel die Masse M der Erde berechnen; denn r ist der Erdradius, k ist experimentell bestimmt, und F beträgt 981 Dynen [§ 11, Anmerkung 3]. Aus der Masse und dem bekannten Volumen der Erde ergibt sich nach § 39 ihre mittlere Dichte zu 5,5.

§ 12. Arbeit einer Kraft im mechanischen Sinne heißt jede durch diese Kraft unter Überwindung einer Gegenkraft („Last“, „Widerstand“) bewirkte Verschiebung. Arbeit wird also gemessen durch das Produkt aus Kraft in den von ihr zurückgelegten Weg.

$$A = F.s.$$

Einheit der mechanischen Arbeit ist vorhanden, wenn die Kraftschleunigung $g = 981 \text{ cm sec}^{-2}$ erteilt ist. Berücksichtigt man die Definition der Dyne (s. o.), so ergibt sich folgendes: Um ein Grammgewicht in Dynen (also die Kräfteinheit des Gewichtssystems in die des Massensystems) umzuwandeln, oder auch, um das Gewicht einer Masse zu finden, hat man mit 981 zu multiplizieren. Will man umgekehrt Dynen durch Grammgewichte ausdrücken oder die einem Gewichte entsprechende Masse finden, so hat man durch 981 zu dividieren. Es ist also:

$$1 \text{ (Gewichts-)Gramm} = 981 \text{ Dynen; } 1 \text{ kg} = 981000 \text{ Dynen.}$$

$$1 \text{ Dyne} = \frac{1}{981} \text{ Gramm} = 1,02 \text{ Milligramm.}$$

¹ Kohäsion und Adhäsion werden auch „Molekularkräfte“ genannt. Dagegen handelt es sich bei der chemischen „Affinität“ um anziehende Kräfte zwischen einzelnen Atomen.

$\frac{\text{cm gr. cm}}{\text{sec}} = \text{gr cm}^2 \text{ sec}^{-2}$
8

einheit eine Verschiebung um die Längeneinheit bewirkt. Die absolute Arbeitseinheit [§ 5] heißt Zentimeterdyn oder Erg¹.

Als praktisches Arbeitsmaß gilt das Meterkilogramm, d. i. die Arbeit, welche geleistet wird, wenn 1 kg 1 m gehoben wird.

Die Arbeit wird = 0, wenn in dem Produkte Fs ein Faktor 0 wird. Hängt z. B. ein Gewicht an einem Faden, so wirkt hier zwar eine Kraft, nämlich die Anziehung der Erde, aber der Körper wird nicht verschoben. Folglich ist s und somit auch die geleistete Arbeit = 0.

Es kann aber auch $F = 0$ werden, wie dies z. B. der Fall ist, wenn sich ein Gas in einen luftleeren Raum ausdehnt [vgl. auch § 18]; dann wird ebenfalls keine Arbeit geleistet.

gramm
10 MC sec
 $\text{gr cm}^2 \text{ sec}^{-3}$

§ 13. **Effekt oder Leistung** heißt die Arbeit, die in einer gegebenen Zeit geleistet wird². Einheit des Effektes ist vorhanden, wenn die Einheit der Arbeit in der Zeiteinheit geleistet wird. Die absolute Einheit heißt Sekundenerg³. Als praktische Einheit dient die Pferdekraft (PS), d. i. eine Arbeit von 75 Meterkilogramm pro Sekunde. Sie entspricht ungefähr der Arbeitsleistung von sieben kräftigen Männern in einer Sekunde.

§ 14. **Energie**. Die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu leisten, bzw. sein Arbeitsvorrat, wird Energie genannt, und zwar unterscheidet man aktuelle und potentielle Energie.

Aktuelle⁴ oder kinetische⁵ Energie, Energie der Be-

¹ Die Dimension der Arbeit [§ 5] ist $\text{ml}^2 \text{t}^{-2}$ bzw. $\text{gr cm}^2 \text{sec}^{-2}$. — 1 Million oder 10^6 Erg heißen Megaerg. 10 Megaerg bezeichnet man in der Praxis als 1 Joule. Das gewöhnliche praktische Arbeitsmaß, das Meterkilogramm, ist = 100,000 Zentimetergramm; da es sich hier um Grammgewichte handelt, hat man zur Umwandlung in das absolute Massensystem mit 981 zu multiplizieren (s. o.), mithin $1 \text{ mkg} = 98100000 \text{ Erg}$. Es ist also: $981 \cdot 100000$

$$1 \text{ Meterkilogramm} = 9,81 \text{ Joule.}$$

$$1 \text{ Joule} = 0,1019 \text{ Meterkilogramm.}$$

² Bei Maschinen versteht man unter indizierter Leistung die theoretisch berechnete, unter effektiver Leistung die praktisch wirklich erzielte Leistung. Das Verhältnis der effektiven zu indizierten Leistung, gewöhnlich in Prozenten ausgedrückt, heißt mechanischer Wirkungsgrad (oder Nutzeffekt) der Maschine. — ³ Die Dimension des Effektes [§ 5] ist $\text{ml}^2 \text{t}^{-3}$ bzw. $\text{gr cm}^2 \text{sec}^{-3}$. — 10^7 Sekundenerg = 10 Sekunden-Megaerg werden in der Praxis 1 Watt genannt. 1 Watt kann auch definiert werden als 1 Joule pro Sekunde. 1 Pferdekraft (PS) = 75 Meterkilogramm pro Sekunde = $75 \cdot 98,1$ Megaerg pro Sekunde = 7360 Sekunden-Megaerg = 736 Watt = 0,736 Kilowatt. — Multipliziert man den Effekt mit der Zeit, so erhält man natürlich wieder die Arbeit während der betreffenden Zeit. In diesem Sinne spricht man daher in der Praxis von Wattstunden, Kilowattstunden usw. — ⁴ *actualis* tätig. — ⁵ *κίνητος* zur Bewegung gehörig.

1 kWh

1 kWh Wasserwerk, Volt x Coulomb = 10^7 Joule
1 kWh Wasserwerk = $3600 \text{ sec} \times 1000 \text{ Joule} = 3,6 \times 10^{13} \text{ Erg}$

wegung, auch wohl lebendige Kraft¹ genannt, ist die Arbeitsfähigkeit eines bewegten Körpers, also die Energie, die ein Körper jeden Augenblick durch seine Bewegung besitzt. Sie entspricht der Arbeit, die er leistet, wenn er diese Bewegung verliert. So kann z. B. ein abgefeuertes Gewehrsgeschoß infolge seiner großen Geschwindigkeit trotz seiner geringen Masse einen viele Kilogramm schweren Steinblock usw. verschieben.

Als eine Form der Arbeit wird die kinetische Energie ausgedrückt durch $Fs = \frac{mv}{t} \cdot s$. Da es sich hier nun um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung handelt, bei der die Geschwindigkeit am Anfange 0, am Ende v ist, so ist hier nach § 10 $s = \frac{1}{2}vt$. Daraus folgt:

$$\text{kinetische Energie} = \frac{mv}{t} \cdot \frac{1}{2}vt = \frac{1}{2}mv^2.$$

Die kinetische Energie ist also direkt proportional der Masse und dem Quadrate der Geschwindigkeit. Bei der Wucht, wie die kinetische Energie auch noch genannt wird, spielt also die Geschwindigkeit des bewegten Körpers die Hauptrolle.

Potentielle oder statische Energie², auch Energie der Lage oder Spannungsenergie (früher auch Spannkraft) genannt, ist die in einem ruhenden Körper durch eine vorangegangene andere Arbeitsleistung gewissermaßen aufgespeicherte Energie. Hier leistet ein Körper zwar noch nicht Arbeit, aber er besitzt vermöge seiner Lage oder Spannung die Fähigkeit, sie jeden Augenblick zu leisten. So erklären sich die Namen. Ein Stein auf dem Dache hat z. B. durch seine Lage zur Erdoberfläche potentielle Energie; denn wenn er fällt, kann er Arbeit leisten. Hieraus geht schon hervor, daß potentielle Energie eine relative Größe ist, da man ja von Lage eines Punktes immer nur in Beziehung auf einen andern sprechen kann. Also ein Stein auf dem Dache hat potentielle Energie in bezug auf das Niveau der Erdoberfläche, ein Stein auf dieser potentielle Energie etwa in bezug auf einen tiefen Schacht usw. Auch die Atome in einem Molekül besitzen potentielle Energie, wie sich dies besonders markant bei den explosiven Körpern zeigt. Wenn durch äußere Einwirkung die Moleküle gesprengt werden, so nehmen die Atome zueinander ganz andere Lagen ein; es entstehen Gase mit großem Ausdehnungsbestreben, wodurch die Sprengwirkung erklärt wird. Auch eine gespannte Feder hat potentielle Energie.

¹ Die „lebendige Kraft“ ist also im heutigen Sinne keine Kraft, sondern eine Form der Energie; dasselbe gilt von der „Spannkraft“, während die „Pferdekraft“ ein bestimmter Effekt ist. — ² Von *potens* fähig etwas zu tun.

1 Kilowatt = 1,36 PS

Interessant ist der Gegensatz zwischen Tier- und Pflanzenwelt. Letztere bereitet durch Reduktionsprozesse Spannkkräfte, die im tierischen Organismus durch Oxydation in kinetische Energie (Bewegung, Wärme, Elektrizität usw.) übergeführt werden.

§ 15. **Gesetz von der Erhaltung der Energie.** Diese beiden Formen der Energie sind der Ausdruck für alle existierenden Kräfte resp. Arbeitsleistungen. Wie die einzelnen Formen der kinetischen Energie ineinander übergeführt werden können, z. B. mechanische Arbeit in Wärme, so kann auch die kinetische Energie übergehen in potentielle, und umgekehrt. Nie aber kann Energie aus nichts entstehen, nie kann bei solchen Umwandlungen ein Plus oder Minus an Energie resultieren. In einem abgeschlossenen System, z. B. im Sonnensystem, ist die Summe der kinetischen und potentiellen Energie eine konstante Größe. Die Vermehrung der einen von beiden Formen bedingt eine Verminderung der anderen. Dieses Gesetz, welches das schon durch die Erfahrung widerlegte Prinzip des Perpetuum mobile auch logisch für immer beseitigt, heißt das Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kraft, besser das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Zuerst ausgesprochen wurde es

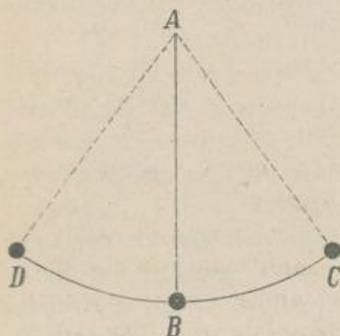


Fig. 2.

1842 von ROBERT MAYER, einem Arzte in Heilbronn, mathematisch formuliert von HELMHOLTZ.

Zwei Beispiele mögen es noch besser erläutern:

1. Wenn ein Pendel (Fig. 2) durch einen Stoß aus der Ruhelage AB gebracht wird und nach einer Seite schwingt, wird seine potentielle Energie, d. h. seine Entfernung von der Erde, größer. Nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie muß seine kinetische Energie um ebensoviel kleiner werden. Das beweist auch die Erfahrung; denn nach einer gewissen Zeit bleibt das Pendel stehen, etwa in C . Dann kommt es wieder langsam in Bewegung und schwingt in umgekehrter Richtung ebensoweit über den Ruhepunkt hinaus, etwa bis D , und so fort. Bei C ist also die kinetische Energie = 0, die potentielle hat ihr Maximum erreicht. Bei der umgekehrten Bewegung wird die potentielle Energie kleiner, dafür wächst die kinetische, die dann in B ihr Maximum hat.

2. Die Planeten bewegen sich um die Sonne in elliptischen Bahnen. In der Sonnennähe (dem „Perihel“) ist ihre potentielle Energie klein, folglich muß ihre kinetische Energie groß sein, d. h. sie bewegen sich an dieser Stelle schnell. Fern von der Sonne (im „Aphel“) ist es natürlich umgekehrt. Daraus folgt ohne weiteres, daß ihre Verbindungslinien mit der Sonne, die Radii vectores, in gleichen Zeiten gleiche Flächen durchmessen (zweites Gesetz von KEPLER).

B. Gesetze der festen Körper.

§ 16. **Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften.** Für manche Betrachtungen ist es nötig, mehrere Kräfte durch eine einzige Kraft zu ersetzen, und umgekehrt.

1. Es handele sich zunächst um zwei an einem Punkte angreifende Kräfte. Haben diese beiden Kräfte entweder genau die gleiche oder genau die entgegengesetzte Richtung, so können sie im ersten Falle ersetzt werden durch eine Kraft gleich ihrer Summe, im zweiten durch eine Kraft gleich ihrer Differenz. Zwischen diesen Extremen liegen noch viele andere Möglichkeiten, wenn nämlich die Kräfte miteinander einen Winkel bilden. In Punkt A (Fig. 3) greifen z. B. die Kräfte AB und AC an. Dann ist die Wirkung die gleiche, wie wenn allein die Kraft AD angegriffen hätte. AD heißt die Resultante, AB und AC die Komponenten. Die Resultante läßt sich nun leicht finden: sie ist die Diagonale des Parallelogramms, zu dem sich die ursprünglichen Kräfte vervollständigen lassen (Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte). In gleicher Weise kann man beliebig viele Kräfte zu einer vereinigen, indem man nacheinander immer zu je zwei derselben die Resultante konstruiert (Kräftepolygon). Umgekehrt läßt sich jede Kraft in zwei oder beliebig viele Komponenten zerlegen.

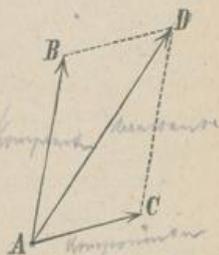


Fig. 3.

2. Die Resultante zweier nicht paralleler Kräfte, die an verschiedenen Punkten angreifen, findet man, wenn man die Kräfte in ihrer eigenen Richtung verschiebt, bis sie sich schneiden, und dann wieder das Parallelogramm der Kräfte konstruiert.

3. Die Resultante paralleler Kräfte kann nur auf einem Umwege gefunden werden.

Um z. B. die Resultante der an AB (Fig. 4) angreifenden parallelen Kräfte P und Q zu finden, denke man sich auf A und B die gleichgroßen, aber entgegengesetzt gerichtete

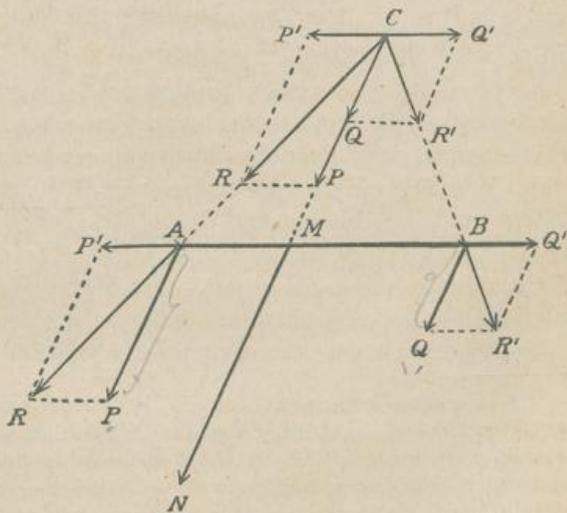


Fig. 4.

ten Kräfte P' und Q' wirkend, wodurch ja der Bewegungszustand des Systems nicht geändert wird. Aus P und P' ergibt sich die Resultante R , aus Q und Q' die Resultante R' . Nun kann man R und R' in ihrer eigenen Richtung verschieben, bis sie sich in C schneiden, und dann in je 2 Komponenten P und P' bzw. Q und Q' zerlegen, welche gleiche Größe und gleiche Richtung wie die Komponenten haben, aus denen R und R' entstanden. P' und Q' heben sich somit wieder auf; P und Q fallen in dieselbe Richtung, summieren sich also zu $P + Q$. Die Kräfte R und R' , somit auch die ursprünglichen Kräfte P und Q sind also ersetzt durch die ihnen parallele Kraft $P + Q$. Verschiebt man nun diese resultierende Kraft in ihrer eigenen Richtung so weit, daß ihr Angriffspunkt auf die Strecke AB zu liegen kommt, dann ist MN die gesuchte Größe.

Zwei (und natürlich auch beliebig viele) parallele, gleichgerichtete Kräfte lassen sich also ersetzen durch eine Resultante, die gleich ihrer Summe ist und dieselbe Richtung hat wie sie. M heißt Mittelpunkt der parallelen Kräfte und ist von der Richtung der parallelen Kräfte ganz unabhängig.

4. Wenn parallele Kräfte nach entgegengesetzten Richtungen angreifen, so läßt sich eine Resultante nur finden, wenn sie verschieden groß sind. Zwei gleichgroße, parallele, entgegengesetzt gerichtete Kräfte lassen sich nämlich nicht zu einer einzigen vereinigen. Sie bewirken eine Drehung des Körpers, an dem sie angreifen, und heißen ein Kräftepaar.

§ 17. **Schwere und Schwerpunkt.** Alle Körper sind der Schwere unterworfen. Damit bezeichnet man die Kraft, mit der sie von der Erde angezogen werden. Diese Kraft denkt man sich im Mittelpunkt der Erde lokalisiert. Ein nicht unterstützter Körper fällt also in der Richtung nach dem Erdzentrum. Diese Richtung heißt vertikal, die dazu senkrechte Ebene horizontal. Die Größe der Schwerkraft (gravitas) wird gemessen durch die Beschleunigung g , die sie einem fallenden Körper erteilt; dieselbe ist identisch mit der Geschwindigkeit desselben am Ende der ersten Sekunde (9,81 m). Da nach dem Gravitationsgesetze (S. 7) die Anziehung zwischen zwei Körpern um so größer wird, je kleiner die Entfernung ist, so muß g um so größer sein, je näher ein Körper dem Erdzentrum ist¹. Das Produkt aus Masse und Beschleunigung durch die Schwerkraft, mg , heißt nun das Gewicht eines Körpers [vgl. § 11]. Daraus folgt, daß ein Körper nicht überall gleichviel wiegt. An den abgeplatteten Polen wird g und damit das Gewicht eines Körpers größer sein als am Äquator². Die Schwerkraft wirkt nun vom Erdmittelpunkt aus auf alle Teilchen

¹ Dies gilt aber nur für Körper, die sich auf bzw. über der Erdoberfläche befinden. Dagegen nimmt g von der Erdoberfläche nach dem Erdinneren zu im allgemeinen ab, weil dann die für die Anziehung in Betracht kommende Masse der Erde immer kleiner wird. — ² Dasselbe gilt natürlich auch für das Grammgewicht, während das Massengramm überall gleich ist. [Vgl. auch § 31].

des Körpers. Die Teilkräfte kann man sich wegen der großen Entfernung als parallel vorstellen, mithin in ihrer Gesamtheit durch eine einzige Resultante ersetzt denken, die in einem Punkte angreift [§ 16³]. Dieser Angriffspunkt aller parallelen anziehenden Kräfte der Erde in einem Körper heißt dessen Schwerpunkt.

Bei homogenen Körpern fällt er mit dem geometrischen Mittelpunkt zusammen und kann somit bei regelmäßiger Gestalt des Körpers durch Rechnung gefunden werden. Sonst findet man ihn experimentell: Man hängt den Körper in zwei verschiedenen Stellungen auf; da der Schwerpunkt sich immer möglichst tief stellt, liegt er im Schnittpunkt der beiden Lote, die von den zwei verschiedenen Aufhängungspunkten auf die Erdoberfläche gefällt werden.

§ 18. **Gleichgewicht.** Wie schon erwähnt, ist ein Körper in Ruhe, wenn die verschiedenen auf ihn wirkenden Kräfte sich aufheben. Man nennt den Zustand der Ruhe auch Gleichgewicht, besonders wenn eine der wirkenden Kräfte die Schwerkraft ist, und unterscheidet drei Arten desselben:

1. **Indifferentes oder neutrales Gleichgewicht** ist vorhanden, wenn Schwerpunkt und Unterstützungspunkt zusammenfallen (z. B. bei Rädern), oder wenn der Schwerpunkt stets senkrecht über dem Unterstützungspunkte liegt (z. B. bei Kugeln). Die Folge hiervon ist, daß der Körper bei jeder Verschiebung in der neuen Lage verharrt. Da also der Schwerpunkt in derselben Entfernung vom Erdmittelpunkt bleibt, bleibt auch die potentielle Energie des Körpers gleichgroß. Mit anderen Worten, die Arbeit (gegen die Schwerkraft) ist hier bei der Verschiebung theoretisch = 0 [vgl. § 12]. In Wirklichkeit ändert die Reibung usw. dieses Resultat. Trotzdem bleibt ein Rad und eine Kugel sehr leicht beweglich.

2. **Stabiles Gleichgewicht** ist vorhanden, wenn ein Körper so aufgehängt ist, daß der Schwerpunkt unter den Unterstützungspunkt fällt. Macht man eine Verschiebung, so kehrt der Körper in die ursprüngliche Lage zurück. Ein charakteristisches Beispiel hierfür ist das Pendel. Beim stabilen Gleichgewicht liegt also der Schwerpunkt so tief wie möglich, die potentielle Energie ist somit ein Minimum.

3. **Labiles Gleichgewicht** ist vorhanden, wenn der Schwerpunkt senkrecht über dem Unterstützungspunkt liegt. Hier genügt der geringste Anstoß, um den Körper in einen neuen Gleichgewichtszustand, nämlich den stabilen, überzuführen. Dies ist z. B. bei einem auf die Spitze gestellten Pendel der Fall. Hier ist also die potentielle Energie ein Maximum. Übrigens ist auch der Mensch im labilen Gleichgewicht; daher fallen kleine Kinder und Bewußtlose hin.

Für gewisse Betrachtungen, z. B. in der Physiologie, ist noch das sog. dynamische Gleichgewicht aufgestellt worden. Darunter versteht man denjenigen Zustand einer bewegten Masse, wenn in der Zeiteinheit ebensoviel hinzukommt wie fortgeht.

§ 19. **Maschinen** sind Vorrichtungen zur Umwandlung (Transformation) von Energieformen oder zur Übertragung derselben an einen andern Ort. Für alle Maschinen gilt der Satz, daß die Arbeitsleistung der Kraft P stets der durch Überwindung der Last Q verrichteten Arbeitsleistung gleich ist. Macht man also mittelst einer Maschine eine Verschiebung, so ist

$$Ps = Qs'$$

$$P:Q = s':s.$$

Die Kraft verhält sich also zur Last wie der Weg der Last zum Wege der Kraft. Wenn daher auch durch Maschinen eine kleine Kraft eine große Last überwinden kann, so muß sie dafür einen um so größeren Weg zurücklegen. Kurz ausgedrückt: Was an Kraft gewonnen wird, geht an Weg verloren. Die Arbeit bleibt also stets dieselbe. Mit anderen Worten heißt dies, daß niemals eine Maschine, ohne daß von außen Energie zugeführt wird,

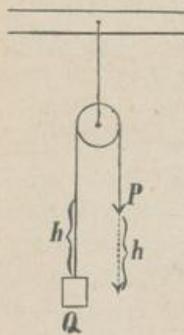


Fig. 5.

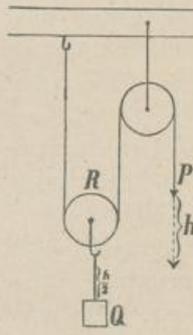


Fig. 6.

selbsttätig Arbeit erzeugen kann, daß also ein Perpetuum mobile unmöglich ist. Man nennt dies auch die „goldene Regel der Mechanik“ [vgl. § 15].

Auch die Organismen, die auf den ersten Blick als selbständige Kräftequellen erscheinen könnten, sind ja von den zugeführten Spannkraften, der Nahrung usw., durchaus abhängig.

Im folgenden sollen nur

die einfachen Maschinen besprochen werden.

§ 20. Die **Rolle** ist eine kreisförmige Scheibe, die um eine durch den Mittelpunkt gehende Achse drehbar ist und an ihrem Umfange Seile usw. aufnehmen kann. Es gibt feste und bewegliche Rollen.

a) Bei der festen Rolle (Fig. 5) ist die Achse befestigt. Verschiebt man die Kraft P um die Strecke h , so wird die Arbeit Ph geleistet. Die Last Q geht um ebensoviel in die Höhe, erfordert also die Arbeit Qh . Gleichgewicht ist vorhanden, wenn $Ph = Qh$ oder $P = Q$ ist.

Das heißt, die angewandte Kraft ist ebensogroß wie die Last. Die feste Rolle dient also nicht zur Kraftersparnis, sondern nur, um die Richtung der Kraft zu ändern, bzw. die Reibung zu vermindern.

b) Bei der beweglichen oder losen Rolle (Fig. 6) ist auch die Achse beweglich. Verschiebt man die Kraft P um h , so wird die Arbeit Ph geleistet. Diese Verschiebung h verteilt sich nun auf beide Schnüre

der beweglichen Rolle R . Q wird also nur um $\frac{h}{2}$ gehoben, somit die Arbeit $Q \frac{h}{2}$ geleistet. Gleichgewicht besteht, wenn

$$Ph = Q \frac{h}{2} \text{ oder } P = \frac{Q}{2} \text{ ist.}$$

Um die Last zu heben, ist also nur die halbe Kraft nötig. Freilich muß sie den doppelten Weg wie die Last zurücklegen.

§ 21. Der **Flaschenzug** ist eine Kombination von festen und beweglichen Rollen.

a) Der gewöhnliche Flaschenzug (Fig. 7) besteht aus einer Anzahl fester und ebensoviel beweglicher Rollen, die durch ein Seil

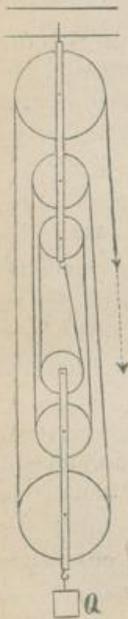


Fig. 7.

verbunden sind, das immer von einer festen zu der entsprechenden beweglichen Rolle geht. Verschiebt man P um h , so wird die Arbeit Ph geleistet. Dann wird Q nur um den sovielten Teil von h gehoben, als Rollen vorhanden sind. In Fig. 7 herrscht also Gleichgewicht,* wenn

$$Ph = Q \frac{h}{6} \text{ ist. Daraus folgt } P = \frac{Q}{6}.$$

Um die Last zu heben, ist hier also nur der sechste Teil der Kraft nötig.

b) Der Potenzflaschenzug (Fig. 8) besteht aus einer festen und einer Anzahl beweglicher Rollen, von denen die unterste die Last trägt. Verschiebt man bei n beweglichen Rollen P um h , so wird Q um den 2^n ten Teil von h gehoben.

Gleichgewicht ist also vorhanden, wenn

$$Ph = Q \frac{h}{2^n} \text{ ist; daraus folgt } P = \frac{Q}{2^n}.$$

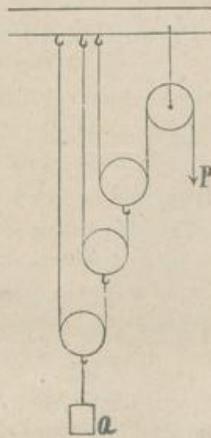


Fig. 8.

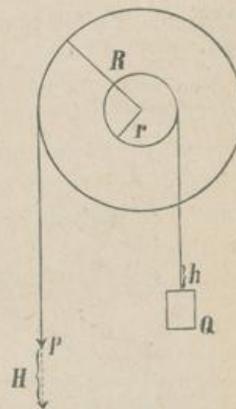


Fig. 9.

Also zum Heben der Last ist nur ein Teil der Kraft nötig, welcher der sovielten Potenz von 2 entspricht, als bewegliche Rollen vorhanden sind. In Fig. 8 wäre somit nur der $2^3 =$ achte Teil der Kraft nötig.

§ 22. Das **Wellrad** (Fig. 9) besteht aus einer Walze, der sogenannten Welle, vom Radius r , die um ihre Achse drehbar ist, und aus einem mit ihr fest verbundenen Rade vom Radius R , das oft auch gezähnt ist. Die Kraft P greift am Umfange des Rades an, die Last Q am Umfange der Welle. Verschiebt man nun P um H , so bewegt sich auch das Rad um den Bogen H , die damit verbundene Welle um den Bogen h . Q wird also um h gehoben. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$PH = Qh \text{ ist.}$$

Nun verhalten sich aber die Bogen H und h wie die entsprechenden Radien. Es ist also auch

$$PR = Qr$$

$$P = \frac{r}{R} Q.$$

Zum Heben der Last ist daher nur ein Bruchteil der Kraft nötig, der um so geringer ist, je größer das Rad und je kleiner die Welle ist. Dieselbe Wirkung erzielt man natürlich, wenn man zwei verschie-

den große Räder durch Ketten oder Riemen verbindet, bzw. sie mittelst Zähne ineinandergreifen läßt.

§ 23. **Schiefe Ebene** heißt eine gegen den Horizont geneigte Ebene, die zum Heben von Lasten dient (Fig. 10). AB heißt die Basis (b), BC die Höhe (h), AC die Länge (l) der

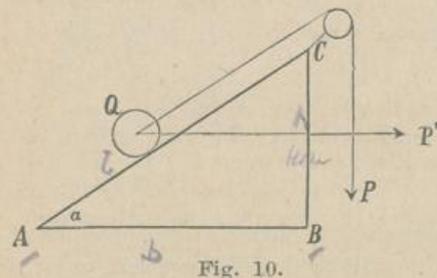


Fig. 10.

schiefen Ebene. Die Arbeit beim Heben über die schiefe Ebene ist natürlich nur abhängig von dem Gewicht der Last und der Höhe (Qh). — Die Last Q soll heraufgezogen werden:

a) durch eine der schiefen Ebene parallele Kraft P . Wird Q von A nach C gezogen, so legt P den Weg l zurück, leistet also die Arbeit Pl . Die Last wird dabei um BC gehoben, also die Arbeit Qh geleistet. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$Pl = Qh$$

$$P:Q = h:l.$$

Die aufgewandte Kraft ist also um so geringer, je kleiner die Höhe im Verhältnis zur Länge, d. h. je weniger steil die Ebene ist. Bezeichnet man den „Neigungswinkel“ CAB mit α , so ist $h:l = \sin \alpha$, folglich

$P = Q \sin a$. Man kann also auch sagen: Gleichgewicht ist hier vorhanden, wenn Kraft = Last \times Sinus des Neigungswinkels ist.

b) Wirkt die Kraft P' parallel zur Basis, so legt sie, um Q von A nach C zu bringen, in ihrer eigenen Richtung den Weg AB zurück, leistet also die Arbeit $P'b$. Die Hebung der Last erfordert wieder die Arbeit Qh . Bedingungen des Gleichgewichts:

$$P'b = Qh$$

$$P':Q = h:b.$$

Die angewandte Kraft ist also um so geringer, je kleiner die Höhe im Verhältnis zur Basis, d. h. wieder je weniger steil die Ebene ist. Da $h:b = \tan a$, ist auch $P' = Q \cdot \tan a$.

Diese Gesetze kommen bei Straßen, Eisenbahnen, Treppen, Rampen usw. zur Anwendung.

§ 24. Eine **Schraube** kann man sich dadurch entstanden denken, daß eine schiefe Ebene um einen Zylinder von kreisförmigem Querschnitt gewickelt wird. Bei der Schraubenspindel sind die Windungen erhaben; die Schraubenmutter ist ein Hohlzylinder mit entsprechenden Vertiefungen. Nach den Gesetzen der schiefen Ebene verhält sich die Kraft zur Last wie die Höhe zur Basis, hier also wie die Höhe einer ganzen Windung (Ganghöhe) zum Umfang der Schraube. Es wird daher um so mehr Kraft gespart, je flacher die Schraubengänge sind.

Unter anderm dient die Schraube zu feinen Dickenmessungen als Mikrometerschraube: Wird der oberste Teil der Schraube, der sogenannte Schraubenkopf, einmal ganz herumgedreht, so bewegt sich die Spindel in der Schraubenmutter um die Höhe einer Windung, die bekannt ist. Eine teilweise Umdrehung des Schraubenkopfes, deren Größe an einer Kreiseinteilung abgelesen wird, entspricht natürlich einem Bruchteil dieser Höhe. Eine Schraube z. B. mit 10 Gängen auf 1 cm Höhe, also mit einer Ganghöhe von 1 mm, würde bei $\frac{1}{100}$ Umdrehung des Schraubenkopfes eine Bewegung (Messung) von $\frac{1}{100}$ mm machen.

§ 25. **Hebel**. Ein mathematischer Hebel ist eine Linie, die sich um einen Punkt dreht. In Wirklichkeit gibt es nur einen physischen Hebel, d. i. eine unbiegsame, um eine feste Achse drehbare Stange, an der Kräfte angreifen. Der Punkt, um den die Drehung erfolgt, heißt Drehungsachse (auch Unterstützungspunkt, Drehungspunkt oder Hypomochlion); von ihm gehen die Hebelarme aus. Beim zweiarmigen Hebel (Fig. 12) greifen Kraft und Last auf verschiedenen Seiten des Unterstützungspunktes an, wirken aber nach derselben Richtung. Beim einarmigen Hebel (besser „einseitiger“ Hebel genannt) greifen sie auf derselben Seite an, wirken aber nach entgegengesetzten Richtungen (Fig. 11). Beim Winkelhebel bilden die Hebelarme einen Winkel.

Um die Gleichgewichtsbedingungen am Hebel zu finden, werde (Fig. 12) die Kraft P um h verschoben, dann wird Q um h' gehoben.

Nach der Verschiebung hat der Hebel die Lage $A'CB'$. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$Ph = Qh' \text{ oder } P:Q = h':h.$$

Aus den ähnlichen Dreiecken $A'CD$ und $B'CE$ folgt nun

$$h':h = B'C:A'C = BC:AC.$$

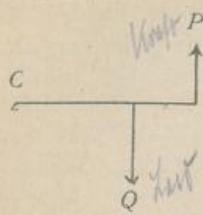


Fig. 11.

Bezeichnet man den Hebelarm AC mit p und BC mit q , so ist

$$P:Q = q:p,$$

d. h. Gleichgewicht besteht, wenn Kraft und Last sich umgekehrt wie ihre Hebelarme verhalten.

Man nennt nun die Senkrechte, die man von einem Punkte (z. B. dem Drehungspunkte) auf die Angriffsrichtung einer Kraft fällt, — oder, anders ausgedrückt, den senkrechten Abstand der Kraftrichtung von der Achse — den Arm

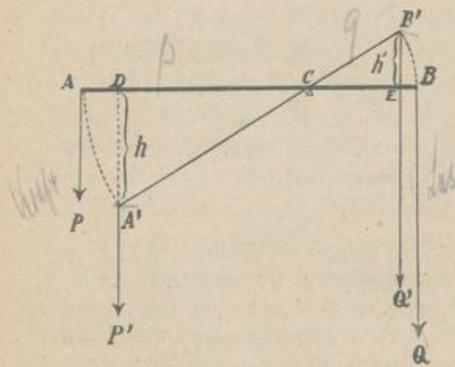


Fig. 12.

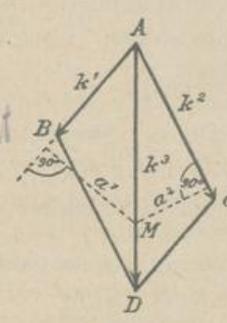


Fig. 13.

der Kraft in bezug auf diesen Punkt (bzw. diese Achse). Das Produkt aus angreifender Kraft mit ihrem Kraftarm heißt Moment¹ (auch Kraftmoment, Drehungsmoment oder statisches Moment). Greifen z. B. in Punkt A (Fig. 13) die Kräfte $AB = k^1$, $AC = k^2$, $AD = k^3$ an (die Komponenten bzw. Resultante eines Kräfteparallelogramms sind), so ist in bezug auf Punkt M das Moment von $AB = k^1 \cdot a^1$, das Moment von $AC = k^2 \cdot a^2$, das Moment von $AD = k^3 \cdot 0$, also gleich Null.

Aus obiger Gleichung für den Hebel $P:Q = q:p$ ergibt sich durch einfache Umstellung

$$P \cdot p = Q \cdot q.$$

¹ momentum (von moveo bewegen) das, was eine Sache bewegt. Die Namen „Drehungsmoment“ und „statisches Moment“ erklären sich daraus, daß je nach den Umständen das starre System (der Hebel) eine Drehbewegung durchmacht oder in Ruhe bleibt.

Da nun aber beim Hebel in der Ruhelage die Hebelarme (p und q) identisch mit den Kraftarmen sind, kann man das Hebelgesetz auch so formulieren: Gleichgewicht am Hebel ist vorhanden, wenn die Momente der angreifenden Kräfte gleich sind. Auch folgt aus der Gleichung ohne weiteres, daß eine kleine Kraft, die am langen Hebelarm angreift, einer großen am kurzen Arm angreifenden das Gleichgewicht hält. Bezeichnet man entgegengesetzt wirkende Kräfte und Momente mit verschiedenen (+ und -) Vorzeichen, so gilt ganz allgemein der Satz: In einem starren, um eine feste Achse drehbaren System halten sich alle angreifenden Kräfte das Gleichgewicht, rufen also keine Drehung hervor, wenn die algebraische Summe ihrer Momente in bezug auf die Drehungsachse Null ist.

Angewandt wird der Hebel vielfach, z. B. als Schere, ein einarmiger Hebel als Nußknacker, als Hebebaum, als Schubkarren, ein Winkelhebel beim Klingelzuge usw. Eine der wichtigsten Formen des Hebels ist die

§ 26. **Wage.** Nur die wenigsten Wagen dienen dazu, wie man vermuten könnte, das Gewicht der Körper direkt zu bestimmen, d. h. das Produkt aus Masse und Beschleunigung durch die Schwerkraft mg [§ 17].

Das ist z. B. der Fall bei der Federwage. Hier wird der zu wägende Körper an eine Feder gehängt, die er natürlich bis zu einem gewissen Punkte, der von seiner Schwere abhängt, ausdehnt. Dieser Punkt, der an einer dahinter angebrachten empirischen Skala abgelesen wird, gibt also direkt das Gewicht des Körpers an.

Die meisten Wagen dienen dagegen zur Massenvergleichung. Das ist deshalb vorteilhaft, weil ja, wie erwähnt, g und damit das Gewicht der Körper an verschiedenen Orten nicht ganz gleich ist. Wenn nun auf der gewöhnlichen Hebelwage zwei Körper von der Masse m und m' sich das Gleichgewicht halten, so ist $mg = m'g$. Dadurch wird also g eliminiert, und es ist $m = m'$.

Die gewöhnliche Schalenwage, die zu den feinsten Messungen benutzt werden kann, ist ein zweiarmiger, gleicharmiger Hebel, an dem man den Wagebalken, die Schalen und die Zunge (Zeiger) unterscheidet. Da beim Hebel Gleichgewicht herrscht, wenn die statischen Momente gleich sind, also $Pp = Qq$ ist, so besteht beim gleicharmigen Hebel und somit auch bei der Wage, wo $p = q$ ist, Gleichgewicht, wenn $P = Q$, Kraft gleich Last ist. Eine gute Wage muß folgende Bedingungen erfüllen:

1) Sie muß im stabilen Gleichgewicht sein, d. h. der Schwerpunkt des Wagebalkens muß bei horizontaler Lage desselben senkrecht unter der Drehungsachse liegen.

2) Sie muß richtig sein, d. h. beide Arme des Wagebalkens

müssen in einer Ebene liegen, gleich Länge und gleiche statische Momente haben; die Wagschalen müssen ferner gleich schwer sein und genau horizontal stehen; der Nullpunkt darf sich nicht ändern.

3) Sie muß empfindlich sein, d. h. sie muß bei einem kleinen Übergewicht auf der einen Seite einen gewissen Ausschlag geben. Als Maß der Empfindlichkeit nimmt man gewöhnlich den Ausschlag an, den eine Mehrbelastung von 0,001 gr bewirkt.

Die Empfindlichkeit ist u. a. um so größer,

a) je näher der Schwerpunkt des Wagebalkens der Drehungsachse liegt. Es sei (Fig. 14) C die Drehungsachse, S der Schwerpunkt.

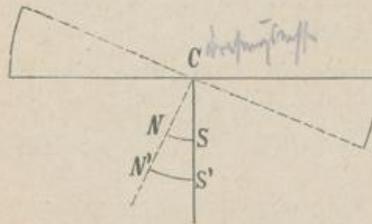


Fig. 14.

Durch ein Übergewicht rechts nehme die Wage die punktierte Stellung ein. Dann beschreibt S den Weg SN . Ein in S' liegender Schwerpunkt müßte bei demselben Ausschlag den größeren Weg $S'N'$ beschreiben, wozu natürlich eine größere Belastung nötig ist;

b) je leichter (deshalb durchbrochen!) Wagebalken und Wagschalen sind;

c) je länger der Wagebalken ist;

denn dadurch wachsen ja die statischen Momente. Indes darf er auch wieder nicht zu lang sein, da er sonst zu schwer wird (s. o.).

Zu genauen Resultaten ist das Mittel aus vielen Wägungen zu nehmen, Temperatur und Barometerstand zu berücksichtigen, sowie das gefundene Gewicht auf den leeren Raum zu reduzieren [vgl. § 51]. Sind die Wagebalken nicht genau gleich lang, so umgeht man diesen Fehler durch Trieren. Hierbei kommt die zu wägende Substanz auf die eine Schale, auf die andere legt man z. B. Schrotkugeln, bis die Zunge auf dem 0-Punkte der Skala steht. Dann ersetzt man die Substanz durch Gewichte, bis die Zunge wieder auf 0 steht. Wenn zwei Größen (Substanz und Gewichte) einer dritten (den Schrotkugeln) gleich sind, sind sie untereinander gleich. Man kann auch den Gegenstand zuerst auf einer Wagschale, dann auf der andern wiegen und das Mittel beider Gewichte nehmen (Doppelwägung).

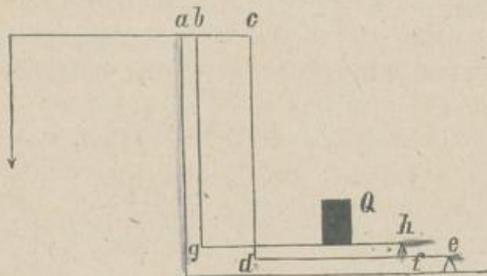


Fig. 15.

Sehr wichtig sind die Brückenwagen, wozu die Dezimal-, Zentesimalwagen usw. gehören. Nicht das ist hierbei das wesentliche, daß durch 10- oder 100mal kleinere Gewichte der Last das Gleichgewicht gehalten

de. ef. 2. 4. 6. d. minomigefehl

wird; das ist ja leicht zu erreichen, wenn der Hebelarm des Gewichts 10- oder 100mal länger gemacht wird als der der Last; sondern die Hauptsache ist, daß die Wagschale („Brücke“) für die Last stets mit sich selbst parallel verschoben wird, mag der Körper in der Mitte oder am Rande liegen.

Es ist nämlich (Fig. 15) $ab:ac = ef:ed$ konstruiert, z. B. $= 1:4$. Durch die Belastung Q geht h und dadurch auch f ein bestimmtes Stück n herunter, folglich d 4mal soviel, ebenso auch der mit d verbundene Punkt c ; andererseits b und der damit verbundene Punkt g wieder um n . g und h werden also gleichmäßig um n verschoben, bewegen sich mithin parallel zur früheren Ebene.

Im Verkehr vielfach benutzt wird die Schnellwage und die Zeiger- oder Briefwage.

Die Schnellwage ist ein ungleicharmiger Hebel, an dessen kürzerem Arm ein Haken zum Aufhängen der Last angebracht ist, während an dem längeren, graduirten Arme ein Laufgewicht verschoben werden kann. Je weiter letzteres vom Drehpunkte entfernt ist, einer desto größeren Last hält es das Gleichgewicht. Die Einteilung des längeren Armes ist derartig gemacht, daß man das Gewicht der Last direkt ablesen kann.

Bei der Zeigerwage (Fig. 16) ist der Wagebalken ein Winkelhebel, dessen längerer mit Gewicht (Q) beschwerter, vor einer empirischen Skala¹ beweglicher Arm je nach Belastung der Wagschale eine bestimmte Stellung einnimmt. Es werden hier also alle Lasten zwar mit demselben Gewicht gemessen, jedoch ändert sich das Drehmoment [S. 18] des Gewichtesarmes von Fall zu Fall.

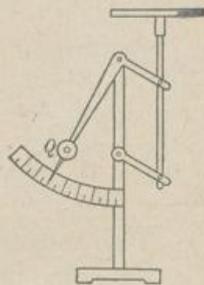


Fig. 16.

§ 27. Fallgesetze.

1) Der freie Fall ist eine durch die Anziehungskraft der Erde gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die Geschwindigkeit ist am Anfang $= 0$, am Ende der ersten Sekunde $g = 9,81$ m, am Ende der zweiten Sekunde $2g$, nach t Sekunden tg .

$$v = gt.$$

Es sind also die Fallgeschwindigkeiten proportional den Fallzeiten. Diese Formel geht auch unmittelbar aus der Definition der Beschleunigung $g = \frac{v}{t}$ hervor [§ 10].

2) Die Fallgeschwindigkeit läßt sich auch aus der durchfallenen Strecke (Höhe) berechnen.

Um einen Stein vom Gewicht mg auf ein Dach von der Höhe h zu bringen, ist eine Arbeit mgh (Kraft mal Weg) nötig. Die potentielle Energie des Steines ist natürlich auch $= mgh$, da nach dem

¹ Lat. *scala* Stufe, Treppe; *ἐμπειρικόν*, auf Erfahrung (*ἐμπειρία*) beruhend. Also ein durch Ausprobieren hergestellter Maßstab.

Gesetze von der Erhaltung der Energie keine Kraft verschwunden oder zugekommen sein kann. Fällt der Stein dieselbe Höhe herab, so verwandelt sich die potentielle Energie in die entsprechende gleichgroße, kinetische Energie $\frac{1}{2}mv^2$. Also

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$v^2 = \frac{2mgh}{m} \quad v = \sqrt{2gh}$$

d. h. die Fallgeschwindigkeiten sind auch proportional den Quadratwurzeln aus den Fallhöhen.

3) Die Fallhöhe läßt sich leicht aus 1) und 2) finden, wenn man die beiden Werte für v einander gleichsetzt. Aus $gt = \sqrt{2gh}$ folgt sofort

$$h = \frac{1}{2}gt^2$$

$$gt = \sqrt{2gh} \quad h = \frac{g^2 t^2}{2g} = \frac{gt^2}{2}$$

Die Fallhöhen sind also proportional den Quadraten der Fallzeiten. Man erhält übrigens dasselbe Resultat, wenn man in der Gleichung $s = \frac{1}{2}vt$ [§ 10] für v den Wert gt einsetzt.

Alle Fallgesetze sind nur für den luftleeren Raum streng gültig. Nur im luftleeren Raum fallen also alle Körper, unabhängig vom Gewichte und der stofflichen Beschaffenheit, gleich schnell. In Wirklichkeit hat der Widerstand der Luft und das spezifische Gewicht großen Einfluß auf die Fallgeschwindigkeit.

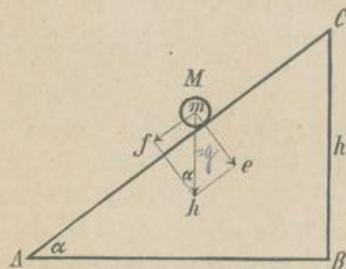


Fig. 17.

§ 28. Beim Fall über die schiefe Ebene kann man sich die auf den Körper M einwirkende Schwerkraft g , in Fig. 17 dargestellt durch mh , in die beiden Komponenten mf und me zerlegt denken, von denen erstere parallel AC , letztere senkrecht dazu gerichtet ist. Da me durch den Widerstand der Unterlage AC aufgehoben wird, kommt für die Fortbewegung von M nur $mf = g'$ in Betracht. Fällt M von C nach

B , so ist $v = \sqrt{2g'h}$ [§ 27]; fällt es von C nach A , so ist $v' = \sqrt{2g' \cdot AC}$. Da nun $g' = g \cdot \sin a$ und $AC = \frac{h}{\sin a}$ ist, so folgt daraus $v' = v$,

d. h. die Endgeschwindigkeit bzw. Wucht ist beim Falle von C nach A dieselbe wie beim Falle von C nach B , also von der Neigung der schiefen Ebene ganz unabhängig. Dagegen dauert natürlich die Fallbewegung um so länger, je mehr die Ebene geneigt ist.

§ 29. Bei der Wurfbewegung erhält ein Körper eine willkürliche

Anfangsbeschleunigung und wird dann der Wirkung der Schwerkraft überlassen. Die Wurfbewegung ist geradlinig, wenn der Körper senkrecht auf- oder abwärts geworfen wird. Im letzteren Falle wirkt die Summe von Anfangsgeschwindigkeit c und Fallgeschwindigkeit gt (§ 27), im ersteren die Differenz. Hier muß also ein Zeitpunkt kommen, wo der Körper frei in der Luft schwebt, um bald darauf zu fallen. Dieser Punkt ist erreicht, wenn die aufwärts gerichtete Geschwindigkeit $c - gt$ gleich Null geworden ist, wenn also $c = gt$ ist.

Dann ist die Dauer des Aufstieges $t = \frac{c}{g}$. Da die Steighöhe identisch mit der entsprechenden Fallhöhe ist, so ergibt sie sich, wenn man in die Formel $h = \frac{1}{2}gt^2$ (§ 27) für t den eben gefundenen Wert

$\frac{c}{g}$ einträgt: sie ist $= \frac{c^2}{2g}$. Setzt man diesen Wert von h in die Formel $v = \sqrt{2gh}$ (§ 27) ein, so ergibt sich $v = c$, s. h. der Körper kommt beim Herunterfallen auf der Erde wieder mit derselben Geschwindigkeit an, die er zu Beginn deswurfes hatte. Daraus folgt unmittelbar, daß auch die Fallzeit gleich der Steigzeit ist.

Bei allen anderen Richtungen des Wurfes ist die Wurfbahn eine Parabel, als Resultante der die Anfangsrichtung bedingenden Kraft und der Schwerkraft.

§ 30. **Winkelgeschwindigkeit. Trägheitsmoment.** Dreht sich (rotiert) ein Körper um eine Achse, so ist zu unterscheiden: 1) die lineare¹ Geschwindigkeit, d. i. die lineare Strecke, die der Körper in gegebener Zeit zurücklegt; 2) die sog. Winkelgeschwindigkeit, d. i. der Winkel, der in einer gegebenen Zeit vom Radius beschrieben wird. Unter Winkelbeschleunigung versteht man wieder die Zunahme der Winkelgeschwindigkeit in 1 Sekunde [vgl. § 10]. Die Winkelgeschwindigkeit ist für alle Massenteilchen eines rotierenden Körpers gleich groß, während ihre lineare Geschwindigkeit verschieden ist. Es sollen sich z. B. zwei Körper M und m (Fig. 18) im Abstände R und r (dieser Abstand heißt Radius oder Radius vector) um die feste Achse C bewegen. Bei gleicher Winkelgeschwindigkeit, d. h. um den Winkel α in gleicher Zeit zu durchmessen, muß der entferntere Körper M natürlich eine größere lineare Geschwindigkeit haben. Die linearen Geschwindigkeiten sind also bei gleicher Winkelgeschwindigkeit direkt proportional den Radien. Andererseits sind die Winkel-

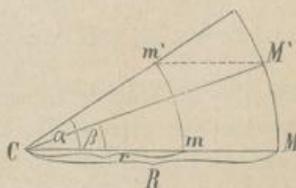


Fig. 18.

¹ Auch periphere oder Bahngeschwindigkeit genannt.

geschwindigkeiten bei gleicher linearer Geschwindigkeit umgekehrt proportional den Radien. Bedeutet w Winkelgeschwindigkeit, v lineare Geschwindigkeit, r den Radius, so ist

$$v = wr \qquad w = \frac{v}{r}$$

Ist $r = 1$, so ist $w = v$. Man kann also auch sagen: Die Winkelgeschwindigkeit ist gleich der linearen Geschwindigkeit für den Radius 1.

Jedes Massenteilchen eines rotierenden Körpers hat nun die kinetische Energie oder Wucht $\frac{1}{2}mv^2$ [§ 14]. Da $v = wr$, so ist die Wucht eines Massenteilchens im Abstände r von der Drehachse auch $\frac{1}{2}mr^2w^2$. Die Wucht des ganzen rotierenden Körpers, bei dem es sich ja um die Summe¹ seiner Massenteilchen und die Summe der Quadrate ihrer Abstände von der Achse handelt, ist daher $\frac{1}{2}w^2 \Sigma mr^2$. Zur Vereinfachung der Betrachtungsweise denkt man sich die Gesamtmasse M des rotierenden Körpers durch eine andere (verschieden große) Masse \mathfrak{M} im Abstände 1 von der Drehachse ersetzt, die bei gleicher Winkelgeschwindigkeit dieselbe Wucht (also auch dasselbe Beharrungsvermögen, dieselbe Trägheit) hat wie der rotierende Körper. Diese gedachte Masse \mathfrak{M} nennt man das Massen- oder Trägheitsmoment des rotierenden Körpers in bezug auf seine jeweilige Drehachse. Man kann diese Größe sowohl rechnerisch wie experimentell finden. Da, wie erwähnt, für den Radius 1 lineare und Winkelgeschwindigkeit gleich sind, so besteht die Beziehung

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\mathfrak{M} \cdot w^2 &= \frac{1}{2}w^2 \Sigma mr^2 \\ \mathfrak{M} &= \Sigma mr^2. \end{aligned}$$

Die Wucht eines rotierenden Körpers läßt sich demnach kurz und zweckmäßig durch das halbe Produkt aus Trägheitsmoment und Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ausdrücken. Das Beharrungsvermögen eines Körpers ist um so größer, je größer sein Trägheitsmoment, je weiter also die Hauptmasse von der Drehachse entfernt ist. Hiervon macht man u. a. bei den Schwungrädern Gebrauch, deren größte Masse an der Peripherie konzentriert ist und die durch ihr großes Beharrungsvermögen den Gang einer Maschine gleichmäßig machen und ihr über die sog. toten Punkte hinweghelfen. —

Wie bei der fortschreitenden Bewegung Beschleunigung = $\frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}}$ ist [§ 11], so gilt für die drehende Bewegung die analoge Beziehung

$$\text{Winkelbeschleunigung} = \frac{\text{Drehungsmoment}}{\text{Trägheitsmoment}}$$

Eine wichtige Form der drehenden Bewegung ist

¹ Als Summenzeichen gebraucht man den griechischen Buchstaben Σ .

§ 31. die **Zentralbewegung**, bei der ein Körper in Kreisen, Ellipsen usw. sich um einen Punkt bewegt. Sie heißt gebunden, wenn der Körper mit demselben verbunden ist, wenn also z. B. ein Gewicht an einem Seil herumgeschwungen wird, andernfalls frei, wie z. B. die Bewegung der Planeten um die Sonne. Eine kreisförmige Bewegung, die hier allein betrachtet werden soll, setzt nun das fortwährende Bestehen einer Kraft voraus, da ohne diese nach dem Trägheitsgesetz [§ 7] der Körper geradlinig in der Richtung der Tangente fortfliegen würde. So würde sich z. B. (Fig. 19) eine um C im Abstände r mit der gleichförmigen Geschwindigkeit v rotierende Masse m , wenn sie, in A angelangt, sich selbst überlassen würde, in der Zeiteinheit von A nach B bewegen, wobei die Strecke AB nach der Formel $s = vt$ (da $t = 1$) der Geschwindigkeit v entspricht. Da die Masse in Wirklichkeit aber nach D gelangt, so muß auch noch eine nach dem Zentrum hin gerichtete Kraft, die sogenannte Zentripetalkraft¹, auf sie eingewirkt und ihr eine gleichförmige Beschleunigung nach dem Zentrum hin erteilt haben, die in der Zeiteinheit von 0 bis γ wächst. Der von m unter dem Einfluß dieser Beschleunigung zurückgelegte Weg BD entspricht daher einer mittleren Geschwindigkeit $\frac{\gamma}{2}$ [vgl. § 10]. Es ist nun $r^2 + v^2 = \left(r + \frac{\gamma}{2}\right)^2 = r^2 + r\gamma + \frac{\gamma^2}{4}$. Betrachtet man die Bewegung während eines sehr kleinen Zeitraums, rückt also D dicht an A heran, so wird $BD = \frac{\gamma}{2}$ so klein, daß $\frac{\gamma^2}{4}$ unberücksichtigt bleiben kann. Es ist dann die durch die Zentripetalkraft erzeugte Beschleunigung $\gamma = \frac{v^2}{r}$, und die Zentripetalkraft selbst

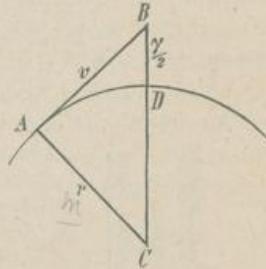


Fig. 19.

nach § 11

$$K = m\gamma = \frac{mv^2}{r}.$$

Setzt man für v den Wert wr ein [§ 30], so erhält man

$$K = \frac{mr^2w^2}{r} = mrw^2.$$

Die Zentripetalkraft ist also direkt proportional der Masse und dem Quadrate der linearen bzw. Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Körpers. Sie ist ferner dem Radius seiner Bahn bei konstanter linearer Geschwindigkeit umgekehrt proportional, bei konstanter Winkelgeschwindigkeit direkt proportional.

¹ κέντρον, centrum urspr. Stachel, dann eingehakter fester Schenkel des Zirkels, dann Mittelpunkt; peto zu erreichen suchen.

Der Zentripetalkraft gleich, aber entgegengesetzt gerichtet, ist die Zentrifugalkraft¹ (Flieh- oder Schwungkraft), die also strebt, den Körper in tangentialer Richtung vom Zentrum zu entfernen. Sie repräsentiert den Beharrungswiderstand der Masse gegen die durch die Zentripetalkraft dauernd bewirkte Richtungsänderung der Bewegung. Auf ihr beruht es z. B., daß man an scharfen Kurven leicht nach außen zu aus dem Wagen geschleudert wird, daß aus einem mittelst einer Schnur schnell im Kreise bewegten Glase Wasser nichts ausfließt usw. Mittels der Zentrifugalkraft kann man auch in einer Flüssigkeit suspendierte feste Bestandteile bequem und rasch von dieser trennen. Hierauf beruhende Apparate heißen **Zentrifugen**.

Fig. 20 zeigt z. B. eine in der Medizin verwandte Harnzentrifuge. Durch rasche Rotation der vertikalen Achse werden die verbundenen Hülsen, in denen sich mit Urin gefüllte Gläschen befinden, ebenfalls in Rotation versetzt und nehmen dabei eine horizontale Stellung ein; die festen Bestandteile des Harns werden an das periphere Ende geschleudert und bleiben dort nach Beendigung der Drehbewegung als Niederschlag liegen.

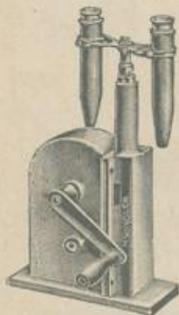


Fig. 20.

Auf der Zentrifugalkraft beruht auch die Abplattung der Erde an den Polen und die Anhäufung der größten Masse am Äquator. Die Zentrifugalkraft ist natürlich der Schwerkraft entgegengerichtet, da diese ja zentripetal wirkt; sie muß sie also schwächen. Auch aus diesem Grunde folgt, daß g am Äquator kleiner ist als an den Polen [§ 17].

§ 32. **Keplers Gesetze.** Für die freie Zentralbewegung der Planeten um die Sonne gelten folgende Gesetze:

1) Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

2) Die Radii vectores beschreiben in gleichen Zeiten gleiche Flächen [vgl. § 15].

3) Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Kuben ihrer mittleren Entfernungen von der Sonne.

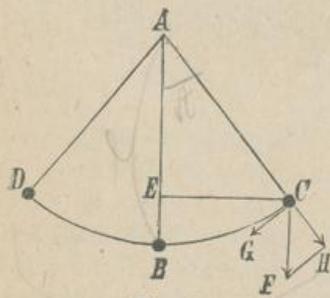


Fig. 21.

§ 33. **Pendel.** Ein Pendel² ist ein Körper, der um eine horizontale Achse schwingen kann (physisches Pendel). Die Pendelgesetze sind zunächst für das mathematische Pendel abgeleitet, das

man sich als punktförmige Masse an einem gewichtslosen Faden befestigt denkt.

¹ fugio fliehen. — ² pendulus herabhängend.

Wird das Pendel AB (Fig. 21) aus der Gleichgewichtslage gebracht, so schwingt es etwa bis C , bleibt stehen, schwingt dann umgekehrt über den Ruhepunkt B hinaus bis D und wieder zurück usf. Ein mathematisches Pendel, das aber nicht wirklich existiert, wäre somit ein Perpetuum mobile, insofern es, einmal in Gang gebracht, sich selbst in Bewegung erhielte. Man nennt nun AB die Länge des Pendels (l), die Entfernung aus der Gleichgewichtslage EC bzw. $\sphericalangle BAC$ die Schwingungsweite oder Amplitude, und die Zeit, in der es den Weg $BCBDB$, d. i. eine ganze Schwingung, beschreibt, Schwingungsdauer (T).

Die Kraft, welche das Pendel von C zurückführt, ist die Schwerkraft, dargestellt durch CF . Diese läßt sich in zwei Komponenten zerlegen: CH , welche durch die Festigkeit des Fadens kompensiert wird, und die für die Pendelbewegung allein in Betracht kommende $CG = HF$. Aus den ähnlichen Dreiecken HCF und EAC folgt $HF:CF = EC:AC$; mithin HF , somit auch $CG = \frac{CF \cdot EC}{AC}$. Hierbei stellt CF die Schwerkraft dar, gemessen durch g , AC die Pendellänge, EC die Schwingungsweite. Da die beiden ersten Größen konstant sind, folgt also als erstes Pendelgesetz:

Die Kraft, welche ein Pendel in die Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt, ist direkt proportional der Schwingungsweite; anders ausgedrückt, die Intensität der Pendelschwingung, die Geschwindigkeitsänderung, also die Beschleunigung bzw. Verzögerung der Pendelbewegung (nicht die Geschwindigkeit!), ist am größten an den Umkehrungspunkten, am kleinsten, wenn das Pendel die Ruhelage passiert.

Das zweite Pendelgesetz, dessen mathematische Ableitung zu weit führen würde, lautet, wenn T die Schwingungsdauer, l die Pendellänge, g die Beschleunigung durch die Erdanziehung bedeutet:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Daraus folgt:

a) Die Schwingungszeit ist proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge (GALILEI), umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Beschleunigung durch die Erdanziehung.

b) Die Schwingungszeit ist unabhängig von der Schwingungsweite (falls sie 5° nicht übersteigt) und von dem Gewichte und der Substanz des Pendels (GALILEI, NEWTON). Bei kleinen Schwingungsweiten sind die Pendelschwingungen also isochron¹.

¹ *ισος* gleich, *χρόνος* Zeit.

Diese Formel ist sehr wichtig. Wenn von den 3 Größen T , l , g zwei bekannt sind, läßt sich ja ohne weiteres die dritte finden. So kann man z. B. die Länge eines **Sekundenpendels**, d. h. eines Pendels, dessen halbe Schwingungszeit 1 Sekunde beträgt, berechnen, wenn g bekannt ist. Sie beträgt z. B. für Berlin 99,4 cm. Andererseits kann man aus der Schwingungsdauer eines Pendels von bekannter Länge (und zwar kommt hier die im folgenden erläuterte korrespondierende Pendellänge in Betracht) g an den verschiedenen Orten der Erde finden.

Ein physisches Pendel kann man sich aus vielen, verschieden langen mathematischen Pendeln zusammengesetzt denken, deren Schwingungsdauer — vorausgesetzt, daß sie für sich schwingen würden — teils größer, teils kleiner wäre als die Schwingungsdauer der analogen Punkte der Pendelstange; denn diese schwingen wegen ihrer starren Verbindung natürlich alle gleichmäßig mit einer mittleren Geschwindigkeit. Es wird nun ein mathematisches Pendel geben, das genau so schwingt wie das physische Pendel. Der Länge dieses mathematischen Pendels entspricht die sogenannte **reduzierte** oder **korrespondierende** Länge des physischen Pendels. Der Punkt der Pendelstange, der um die reduzierte Länge von der

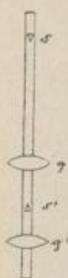


Fig. 22.

Drehungsachse entfernt ist, heißt **Schwingungspunkt**. Vertauscht man Schwingungspunkt und Unterstützungspunkt, so wird die Schwingungszeit nicht geändert (HUYGENS). Ein Pendel, das dafür eingerichtet ist, indem die Pendelstange zwei Schneiden (s und s' in Fig. 22) zum Aufhängen des Pendels besitzt, die ihre Schärfe einander zukehren, heißt **Reversionspendel**¹. Durch Verschiebung von Gewichten (g und g'), die an der Pendelstange angebracht sind, kann man nun erzielen, daß das Pendel gleich schwingt, mag es nun um die eine oder die andere Schneide schwingen. Ein solches Reversionspendel dient daher zur experimentellen Bestimmung der korrespondierenden Pendellänge, die eben dem Abstand der beiden Schneiden entspricht, somit auch als Ersatz der nicht herstellbaren, aber für die praktische Verwertung der Pendelgesetze erforderlichen mathematischen Pendel.



Fig. 23.

Da die Schwingungszeit eines Pendels von seiner Länge abhängt, alle Körper aber durch Wärme ausgedehnt werden, so gibt es sogenannte **Kompensationspendel**², bei denen die Pendelstange aus zwei Metallen von verschiedener Aus-

¹ *revertō* umkehren. — ² *compenso* ausgleichen.

dehnungsfähigkeit in entsprechender Anordnung so zusammengesetzt ist, daß ihre Länge unabhängig von der Temperatur gleich bleibt. Fig. 23 zeigt ein solches Pendel; wenn sich hier die (schraffierten) Eisenstäbe nach unten verlängern, dehnen sich die (hellen) Zinkstäbe ebensoviel nach oben aus.

Von den vielen Anwendungen des Pendels sei hier nur das Echappement der Pendeluhr besprochen. An der Welle s (Fig. 24) ist ein Gewicht g aufgewunden, das durch seinen Fall die Welle dreht. Um die Beschleunigung durch das Gewicht in eine gleichmäßige Geschwindigkeit zu verwandeln, greift der mit der Pendelstange p verbundene Doppelhaken h in das mit der Welle s verbundene Zahnrad r ein, so daß das Rad, und damit auch die Welle, bei jeder Doppelschwingung nur um einen Zahn vorrücken kann. Zugleich wird aber auch die Reibung, welche die Pendelbewegung allmählich vernichten würde, kompensiert, indem das Pendel jedesmal einen kleinen Stoß bekommt, wenn der Haken aus dem Zahnrad herausgeht.

Erwähnt sei noch der Foucaultsche Pendelversuch. FOUCAULT zeigt nämlich, daß ein sehr langes, mit möglichst geringer Reibung aufgehängtes, schweres Pendel allmählich scheinbar seine Schwingungsebene ändert. In Wirklichkeit beruht dies auf der Achsendrehung der Erde, die somit hierdurch zum ersten Male direkt nachgewiesen wurde. An den Polen würde die scheinbare Drehung der Pendelebene innerhalb von 24 Stunden 360° betragen; am Äquator ist sie 0; an anderen Orten ist sie 360° multipliziert mit dem Sinus der geographischen Breite.

§ 34. **Elastizität**¹ heißt die Eigenschaft eines Körpers, nach einer Formänderung (Deformation) die ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen. Je größer die Kraft ist, mit der dies geschieht, desto größeren Widerstand wird auch der betreffende Körper einer Deformation entgegensetzen. So kommt es, daß man unter Elastizität (genauer Kraft oder Größe der Elastizität) auch den Widerstand gegen eine Form- bzw. Volumsänderung versteht (s. u.). Alle elastischen Körper — und dazu gehören auch Gase und Flüssigkeiten — sind im Pendelgleichgewicht. Die elastischen Deformationen, andererseits aber auch die dadurch erzeugten elastischen Gegenkräfte, sind den formändernden Kräften proportional (Gesetz von HOOKE). Nach den einwirkenden Kräften unterscheidet man Zug-, Biegungs-, Druck-, Drehungs- (Drillungs- oder Torsions-), Schub- (oder Scherungs-) Elastizität. Unter letzterer versteht man den Widerstand gegen Kräfte, die einen Teil eines Körpers über einen anderen hinwegzu-

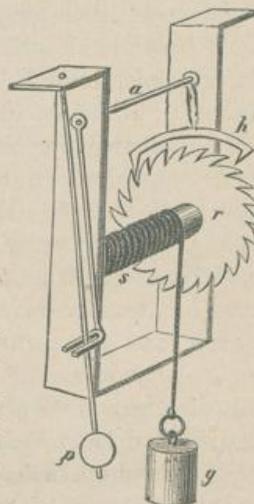


Fig. 24.

¹ ἰλαστής der Treiber, von ἰλαίνω treiben, stoßen.

schieben trachten (wie es z. B. beim Zerschneiden eines Körpers mit einer Schere der Fall ist), bzw. die Eigenschaft, nach einer solchen Deformation wieder die ursprüngliche Gestalt anzunehmen. Alle diese Formen der Elastizität werden mit zusammenfassendem Namen Gestaltelastizität genannt¹. Außerdem gibt es auch eine Volumselastizität, d. h. die Eigenschaft eines durch allseitigen Druck komprimierten Körpers, sein früheres Volum wiederzugewinnen, bzw. seinen Widerstand gegen volumsverringende Kräfte. Ein Körper heißt vollkommen elastisch, wenn er nach Aufhören der deformierenden Kraft seine frühere Gestalt wieder vollkommen annimmt, z. B. Gase, Flüssigkeiten, Kautschuk. (Bleibt zunächst eine kleine Deformation bestehen, die sich erst allmählich ausgleicht, so nennt man das elastische Nachwirkung.) Im Gegensatz dazu steht z. B. Wachs. Elastische Wirkung findet aber stets nur bis zu einer gewissen Grenze, der Elastizitätsgrenze, statt. Wird die einwirkende Kraft zu groß, so nimmt der Körper dauernd eine andere Form an, er wird zertrümmert, reißt usw. Der sog. Elastizitätskoeffizient gibt an, um wieviel ein Stab einer bestimmten Substanz von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt durch 1 kg gedehnt wird. Er mißt also, genauer ausgedrückt, die Dehnbarkeit. Der Elastizitätskoeffizient des Stahls z. B. ist sehr klein (ca. $\frac{1}{20000}$), der des Kautschuks sehr groß. Die Größe der Elastizität, also der Widerstand gegen eine bestimmte Formveränderung (s. o.), wird dagegen ausgedrückt durch den reziproken Wert des Elastizitätskoeffizienten, den sog. Elastizitätsmodul². Diesen kann man auch definieren als das Gewicht, welches einen Stab einer bestimmten Substanz von 1 qmm Querschnitt um seine eigene Länge dehnen würde, falls er nicht vorher reißen würde. Der Elastizitätsmodul des Stahls ist nach dem Gesagten also sehr groß (ca. 20000), der des Kautschuks sehr klein. Während man also im gewöhnlichen Leben Kautschuk als „sehr elastisch“ bezeichnet, besitzt er im physikalischen Sinne eine große Dehnbarkeit, aber eine kleine, jedoch vollkommene Elastizität.

§ 35. **Bewegungshindernisse.** Die Bewegungsfähigkeit der Körper findet wesentliche Einschränkungen durch die verschiedenen Bewegungshindernisse. Vor allem gehört hierzu die Reibung, die durch die Unebenheiten zweier sich gegeneinander verschiebender Körper bedingt ist. Sie ist, abgesehen vom Drucke, um so größer,

¹ Verwandt damit ist der Begriff Festigkeit. Man versteht darunter den Widerstand, den ein Körper der Trennung seiner Masse entgegensetzt und mißt ihn durch die Kraft, die eine solche Trennung gerade hervorbringt. Auch hier unterscheidet man eine Zug- (oder absolute), Biegungs- (oder relative), Druck- (oder rückwirkende), Drehungs- und Schub-Festigkeit.

² *modulus* kleines Maß.

je rauher die Oberflächen sind; darum schmiert man die der Reibung ausgesetzten Teile mit Öl, Fett usw. ein. Man unterscheidet gleitende Reibung, bei der immer dieselben Teile eines Körpers betroffen sind, und rollende Reibung, bei der die Berührungsfläche wechselt. Im allgemeinen ist letztere geringer; daher setzt man z. B. Wagen auf Räder, wendet beim Transport schwerer Gegenstände Rollen an, setzt Achsen in Kugellager. Die Reibung ist z. B. Ursache davon, daß so viel vom theoretischen Effekt der Maschinen verloren geht. Andererseits bewirkt sie, daß eine Lokomotive einen Zug fortbewegt; überwiegt nämlich die Schwere des Zuges die Reibung der Lokomotivräder, so drehen diese sich nur auf derselben Stelle um ihre Achse. Reibung findet auch zwischen den kleinsten, unsichtbaren Teilchen der Körper statt; diese sogenannte innere Reibung spielt besonders bei Flüssigkeiten und Gasen eine wichtige Rolle. — Ein Bewegungshindernis ist ferner der Widerstand des Mediums. Derselbe wächst mit der Dichte desselben, sowie mit der Geschwindigkeit und der Oberfläche des bewegten Körpers.

C. Gesetze der flüssigen Körper.

§ 36. **Grundeigenschaften der Flüssigkeiten.** Flüssige Körper haben zwar ein bestimmtes Volumen, aber keine bestimmte Gestalt, da ihre Teilchen leicht gegeneinander verschieblich sind. Man kann dies auch so ausdrücken: Flüssigkeiten besitzen nur Elastizität des Volumens¹, aber nicht (wie die festen Körper) auch Elastizität der Gestalt. Zur Erklärung nimmt man an, daß ihre Moleküle in labilem Gleichgewicht schwingen und zugleich eine fortschreitende Bewegung haben. Aus dieser leichten Verschieblichkeit folgt, daß die einzelnen Teilchen unter dem Einflusse der Schwerkraft sich möglichst tief stellen; mit anderen Worten, die Oberfläche einer Flüssigkeit ist genau horizontal. Nur in engen Röhren findet eine Ausnahme statt [vgl. § 41]. Da den Flüssigkeiten Poren fehlen, so sind sie auch fast inkompressibel. Sehr wichtig ist ferner, daß ein an beliebiger Stelle ausgeübter Druck sich in einer Flüssigkeit gleichmäßig nach allen Richtungen mit gleicher Stärke fortpflanzt. Darauf beruht z. B. das Messen des Blutdruckes, da derselbe ja im Arterien-

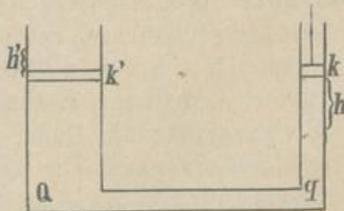


Fig. 25.

¹ Die Volumselastizität [§ 34] der Flüssigkeiten ist sehr groß, ihre Zusammendrückbarkeit daher sehr gering.

rohr auch seitlich wahrnehmbar ist. Eine Anwendung dieses Gesetzes ist ferner die hydraulische¹ oder Bramahsche Presse, deren Prinzip aus Fig. 25 erhellt.

Wird der Kolben k durch eine Kraft p um h verschoben, so wird die Arbeit ph geleistet. Dadurch wird ein Druck auf das Wasser in dem Röhrensystem erzeugt, und der Kolben k' mit einer Kraft p' um h' gehoben, also die Arbeit $p'h'$ geleistet. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

$$ph = p'h' \text{ oder} \\ p:p' = h':h \text{ ist.}$$

Da nun in beiden Schenkeln eine gleiche Wassermasse bewegt wird, ist, wenn q und Q die betreffenden Querschnitte bedeuten:

$$h':h = q:Q, \text{ mithin} \\ p:p' = q:Q.$$

Der im weiten Rohr erzeugte Druck übertrifft also um so mehr die angewandte Kraft, je größer der Querschnitt des weiten Rohrs im Verhältnis zu dem des engen ist. Natürlich ist dies wieder nur auf Kosten des Weges möglich [§ 19].

§ 37. **Hydrostatischer Druck** heißt der Druck, den eine Flüssigkeit auf die Flächeneinheit ausübt. Betrachten wir zunächst den Bodendruck. Für diesen gilt das sogenannte hydrostatische

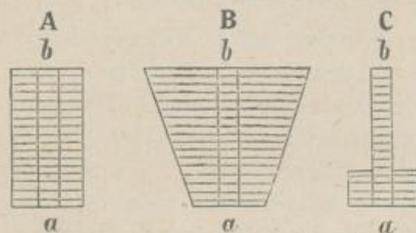


Fig. 26.

Paradoxon: er hängt nämlich für dieselbe Flüssigkeit ausschließlich ab von der Größe der Grundfläche und der Höhe der Flüssigkeitssäule, aber nicht von der Form des Gefäßes. Es ist also z. B. in Fig. 26 A—C der Bodendruck überall gleichgroß. Dies kann experimentell bewiesen werden, ergibt sich

aber auch durch folgende Überlegung: Das Flächenteilchen a trägt die Flüssigkeitssäule ab , erleidet also einen Druck entsprechend ihrem Gewicht. Da sich nun in Flüssigkeiten der Druck allseitig gleichmäßig fortpflanzt, erleiden alle Flächenteile des Bodens denselben Druck, auch wenn direkt über ihnen die Flüssigkeit nicht so hoch steht. Ihre Gesamtheit entspricht aber der Grundfläche. Ferner folgt auch, daß der Seitendruck an einer Seite der Wand nur abhängt von der Größe dieser Stelle und von ihrer mittleren Entfernung von der Oberfläche der Flüssigkeit. Daraus ergibt sich unmittelbar das

Gesetz der kommunizierenden Röhren: Sind zwei miteinander verbundene Röhren mit ein und derselben Flüssigkeit gefüllt,

¹ Hydraulik (von $\nu\delta\omega\varphi$ Wasser, $\alpha\lambda\delta\epsilon$ Röhre) = Hydromechanik, Mechanik der flüssigen Körper.

so steht diese in beiden gleichhoch, ganz unabhängig von der Form der Röhren. Denn wenn Gleichgewicht vorhanden sein soll, muß z. B. an der Stelle *ab* (Fig. 27) beiderseits gleicher Druck herrschen. Das kann aber, da die Fläche *ab* beiderseits gleichgroß ist, nur dann der Fall sein, wenn die Flüssigkeit in den Röhren gleichhoch steht. [Vgl. § 40,5.] Kommunizierende Röhren dienen z. B. als Wasserstandsgläser dazu, die Höhe des Wassers in einem Kessel von außen zu erkennen. Da die Wasserspiegel in beiden Röhren in der gleichen wagerechten Ebene liegen, so erhält man beim Hinblicken über sie die Horizontale. Man bedient sich daher einer solchen Vorrichtung auch zum Nivellieren im Felde (Wasser- oder Kanalwage). Ist eine Röhre kürzer als die andere, so spritzt hier die Flüssigkeit heraus bis zum Niveau in der längeren Röhre. Darauf beruhen z. B. die Springbrunnen.

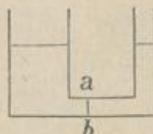


Fig. 27.

Die Ausflußgeschwindigkeit einer Flüssigkeit aus einem Gefäß unter der Wirkung ihrer eigenen Schwere ist theoretisch $v = \sqrt{2gh}$, also ebensogroß, als wäre die Flüssigkeit die Strecke zwischen Spiegel und Ausflußöffnung heruntergefallen (Torricellis Theorem). In Wirklichkeit ist sie infolge der Reibung usw. etwas kleiner, ebenso wie die Ausflußmenge um etwa $\frac{1}{3}$ kleiner ist als das Produkt aus Ausflußgeschwindigkeit und Größe der Ausflußöffnung, da die Flüssigkeit eine Zusammenziehung (Contraction venae) erfährt.

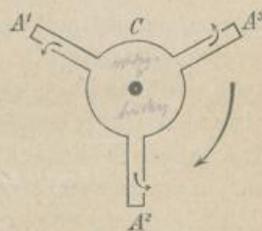


Fig. 28.

Auf dem Seitendruck beruht auch das SEG-
NERSche Wasserrad: An dem um seine Achse drehbaren vertikalen Hohlzylinder *C*, den Fig. 28 im Querschnitt darstellt, befinden sich unten die gleichfalls hohlen Arme *A'*, *A''*, *A'''*, aus denen Wasser in der Richtung der kleinen Pfeile ausfließt, wenn *C* damit gefüllt wird. Da der Seitendruck an der Ausflußöffnung verringert wird, bekommt er an der gegenüberliegenden Stelle das Übergewicht und dreht den Apparat in der Richtung des großen Pfeiles (sog. Reaktionswirkung).

Auch die Wasserturbinen gehören hierher. Dieselben bestehen im wesentlichen aus zwei konzentrischen horizontalen Rädern mit gekrümmten Schaufeln (Fig. 29), von denen das „Leitrad“ (*L*) feststeht und das von oben kommende Wasser zu dem beweglichen „Lauf-
rad“ (*L'*) leitet, dessen Schaufeln in entgegengesetzter Richtung gekrümmt sind. Das aus dem Leitrade kommende Wasser bewirkt durch seinen Anprall gegen die Schaufeln des Laufrades

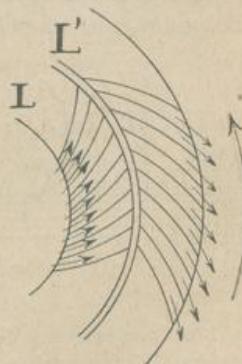


Fig. 29.

und zugleich durch den Rückstoß beim Ausfließen am Rande eine Drehung in der Richtung des großen Pfeils. Bei neueren Turbinen ist das Laufrad innen.

§ 38. **Archimedisches Prinzip.** Aus den Grundeigenschaften der Flüssigkeiten [§ 36] folgt ferner, daß der hydrostatische Druck auch nach oben gerichtet sein muß (sog. Auftrieb). Auf einen festen Körper A (Fig. 30) wirkt also in einer Flüssigkeit der hydrostatische Druck von allen Richtungen her. Die Seiten erleiden dabei einen gleichgroßen, aber entgegengesetzt gerichteten Druck. Dieser kommt für das Gewicht nicht in Betracht; denn der Körper kann dadurch nur komprimiert werden, was in großen Tiefen auch wirklich geschieht. Beeinflußt wird aber das Körpergewicht durch den hydrostatischen Druck von oben her (Abtrieb) und von unten her (Auftrieb). Der Auftrieb

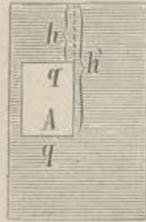


Fig. 30.

muß größer sein als der Abtrieb, weil er dem Gewicht der Flüssigkeitssäule qh' entspricht, der Abtrieb nur dem der kleineren Flüssigkeitsmenge qh . Das Körpergewicht wird also vermindert um die Differenz zwischen Auf- und Abtrieb, oder um die Gewichts-differenz der Flüssigkeitssäulen qh' und qh . Nun ist aber $qh' - qh$ das Volumen des Körpers A , somit auch das Volumen der von A verdrängten Flüssigkeitsmenge. Daraus ergibt sich: Jeder Körper erfährt in einer Flüssigkeit scheinbar einen Gewichtsverlust, in Wirklichkeit einen Auftrieb, der dem Gewicht der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmasse entspricht. Der Auftrieb wirkt dem Körpergewicht entgegen. Daraus folgt, daß ein Körper, dessen Gewicht genau so groß ist wie das eines gleichen Volumens Flüssigkeit, in dieser Flüssigkeit weder sinkt noch aufsteigt, sondern schwebt; denn Körpergewicht und Auftrieb halten sich hier das Gleichgewicht. Ist der Körper dagegen schwerer als die verdrängte Flüssigkeitsmasse, so wird er untersinken; ist er leichter, so wird er schwimmen, d. h. so weit über die Oberfläche der Flüssigkeit herausragen, daß der Auftrieb oder, was dasselbe ist, das Gewicht der durch den eingetauchten

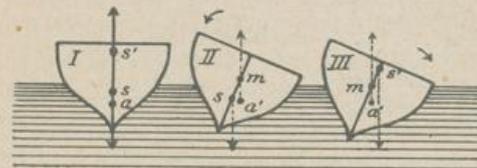


Fig. 31.

Körperteil verdrängten Flüssigkeit gleich dem (wirklichen) Gewicht des ganzen Körpers ist. [Vgl. § 39.]

Beim Schwimmen kommt es nicht nur auf die Tiefe des Einsinkens, sondern auch auf die Stabilität an; von ersterer hängt z. B. der Tiefgang eines

Schiffes, von letzterer die Sicherheit gegen das Kentern ab. Auf einen schwimmenden Körper wirken nun zwei Kräfte: nach unten die Schwerkraft, deren Angriffspunkt der Schwerpunkt ist; nach oben der Auftrieb, dessen Angriffs-

punkt im Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit liegt. Stabilität ist nicht nur vorhanden, wenn der Schwerpunkt tiefer liegt als der Angriffspunkt des Auftriebes, sondern auch, wenn er höher liegt als dieser, aber tiefer als das sog. Metazentrum. Fig. 31 I stellt z. B. einen Schiffsrumpf, s dessen Schwerpunkt, a den Angriffspunkt des Auftriebes vor. Gerät das Schiff aus der lotrechten Lage (Fig. II), so bleibt s an derselben Stelle, a nimmt, da jetzt eine andere Flüssigkeitsmenge verdrängt wird, die Lage a' ein. Es wirkt also jetzt ein Kräftepaar auf das Schiff ein und dreht es in die alte Lage zurück, wenn s tiefer liegt als das Metazentrum m (der Schnittpunkt der Auftriebsrichtung mit der Mittellinie). Läge dagegen der Schwerpunkt bei I etwa in s' , nach der Verschiebung also höher als das Metazentrum (Fig. III), so würde das Schiff umkippen. Die Stabilität ist im allgemeinen um so größer, je tiefer der Schwerpunkt liegt, daher bringt man die schwersten Lasten in den untersten Teil der Schiffe usw.

§ 39. **Dichte und spezifisches Gewicht.** Je mehr Masse in einem gegebenen Volumen (Rauminhalt) ist, desto größer ist die Dichte. Dichte ist mithin die Masse eines Körpers bezogen auf sein Volumen

$$D = \frac{M}{V}$$

Man kann auch sagen: Dichte ist die Masse der Volumeneinheit. Dichte ist also eine physikalische Größe von einer bestimmten Dimension¹ [§ 5]. Das Gewicht eines Körpers ist nach § 17 $P = Mg = D \cdot V \cdot g$. Ein anderer Körper von gleichem Volumen, aber verschiedener Dichte wiegt $P' = D'Vg$. Daraus folgt $P:P' = D:D'$. Das Gewicht gleicher Volumina hängt also von der Dichte der Körper ab; größere Dichtigkeit bedeutet ja eben mehr Masse in der Volumeneinheit. 1 Liter Quecksilber z. B. wiegt mehr als 1 Liter Weingeist. Es ist nun ein praktisches Bedürfnis, dadurch schnell die Dichte resp. das Gewicht eines Körpers zu beurteilen, daß man sie mit der Dichte resp. dem Gewicht eines bekannten Körpers, gewöhnlich Wasser von 4° C, vergleicht. In diesem Sinne spricht man vom spezifischen Gewichte (s) eines Körpers.

Spezifisches Gewicht eines Körpers heißt also das Verhältnis seiner Dichte zur (Einheits-) Dichte des Wassers. Anders ausgedrückt: das spezifische Gewicht gibt an, wieviel mehr ein Körper wiegt als das gleiche Volumen Wasser von 4° C. Man kann daher das spezifische Gewicht auch definieren als das Gewicht der Volumeneinheit oder das Verhältnis des Gewichts eines Körpers zu seinem Volumen.

$$s = \frac{P}{V}$$

Nicht immer wird Wasser als Einheit gewählt, sondern bei Gasen meistens Luft, bei den Elementen der Chemie Wasserstoff oder Sauerstoff. Jedenfalls ist spezifisches Gewicht stets nur eine Verhältniszahl, der natürlich keine Dimension zukommt. Es wird jetzt klar sein,

¹ Die Dimension der Dichte ist ml^{-3} bzw. $gr\ cm^{-3}$

gr
cm³ (Kubik)

daß man die Gesetze vom Schwimmen auch so aussprechen kann: Ein Körper schwebt, schwimmt oder sinkt in einer Flüssigkeit, je nachdem er gleiches, kleineres oder größeres spezifisches Gewicht im Vergleich zur Flüssigkeit hat.

Hierauf beruht z. B. eine Methode zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes des Blutes. Man bringt einen Tropfen Blut in eine Mischung von Benzol und Chloroform, die man so reguliert, daß der Blutstropfen in der Mischung gerade schwebt, und bestimmt dann das spezifische Gewicht der Mischung, welches identisch mit dem des Blutes sein muß.

Da luftförmige Körper spezifisch leichter sind als Flüssigkeiten, so steigen sie in ihnen auf. Darauf beruht u. a. die Libelle¹ (Fig. 32), die zur Bestimmung

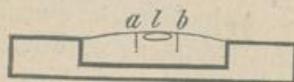


Fig. 32.

der Horizontalebene dient. Es ist dies eine kleine Glasröhre oder Dose, die bis auf eine kleine Luftblase mit Wasser usw. gefüllt ist. Die Blase *l* steigt immer so hoch wie möglich, steht also bei horizontaler Lage des Behälters genau unter der etwas ausgebuchteten Mitte *ab* der oberen Wand.

§ 40. Bestimmung des spezifischen Gewichtes. Da das spezifische Gewicht eines Körpers $s = \frac{P}{V}$ ist [§ 39], so handelt es sich darum, das Volumen des Körpers zu finden. Dies entspricht aber nach dem Archimedischen Prinzip dem Gewicht des von ihm verdrängten Wassers bzw. der Gewichts-differenz des Körpers in Luft und Wasser. Beim Wasser besteht ja bekanntlich die Beziehung, daß die Einheit des Volumens auch die Einheit des Gewichts besitzt, Volumen und Gewicht also durch dieselben Zahlen ausgedrückt werden [§ 4]. Nennt man das Gewicht des Körpers in der Luft P , im Wasser P' , so ist $s = \frac{P}{P - P'}$. Darauf beruhen die meisten Methoden.

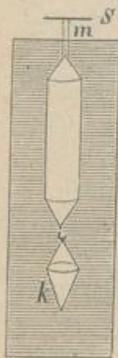


Fig. 33.

1) Hydrostatische Wage. Das absolute Gewicht wird festgestellt, indem der Körper an einen Waagebalken gehängt und die Wagschale der anderen Seite mit den entsprechenden Gewichten belastet wird. Dann wird unter den Körper ein Gefäß mit Wasser geschoben, so daß er ganz hineintaucht, und sein Gewicht wieder bestimmt. Die Differenz ergibt sein Volumen.

2) Nicholson's Gewichtsaräometer². Wird der Körper auf die Schale *S* (Fig. 33) gebracht, so sinkt der Apparat im Wasser etwa bis *m* ein. An Stelle des Körpers werden nun so viele Gewichte auf den Teller gelegt, bis derselbe Effekt erreicht ist. So wird das absolute Körpergewicht bestimmt. Bringt man dann den Körper in das Körbchen *k* und legt oben auf den Teller so viel Gewichte zu, daß der Apparat wieder bis *m* einsinkt, so erhält man den Gewichtsverlust im Wasser, mithin das Volumen des Körpers.

¹ *libella* Diminutiv von *libra* Wage. — ² *ἀραιός* dünn.

3) Das Skalenaräometer dient zur Bestimmung des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten. Es besteht (Fig. 34) aus einer geschlossenen, unten mit Quecksilber usw. beschwerten Glasröhre mit einer empirischen Skala, an der das spezifische Gewicht direkt abgelesen wird. Je größer nämlich das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit ist, um so weniger tief wird das Aräometer einsinken. Auf diesem Prinzip beruhen u. a. die Urometer (für Urin). In der Technik benutzt man Aräometer, deren Skala so geeicht ist, daß sie unmittelbar den vom spezifischen Gewicht abhängigen Gehalt der Flüssigkeit an einer bestimmten Substanz, z. B. den Konzentrationsgrad von Salz- und Alkohollösungen angibt (Alkoholometer usw.).



Fig. 34.

4) Das Pyknometer¹ dient ebenfalls zur Bestimmung des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten. Es ist ein kleines Fläschchen, das man bis zu einer bestimmten Marke einmal mit Wasser und dann mit der betreffenden Flüssigkeit füllt und wiegt. Das Verhältnis der gefundenen Gewichte (von denen natürlich das Gewicht des Fläschchens abgezogen werden muß) ergibt unmittelbar das spezifische Gewicht. Das Pyknometer ist aber auch für zerkleinerte feste Substanzen, besonders solche in Pulverform, verwendbar. Wiegt es nämlich mit Wasser gefüllt P , mit Wasser und der Substanz gefüllt P' , während letztere G wiegt, so ist das Gewicht des durch die Substanz verdrängten Wassers, somit auch das Volumen der Substanz, $P + G - P'$.

5) Auch durch kommunizierende Röhren läßt sich das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten finden. Bringt man in die Röhren (Fig. 35) zwei verschiedene, miteinander nicht mischbare Flüssigkeiten vom spezifischen Gewicht s^1 und s^2 , so wirkt auf ihre Grenzfläche q dann einerseits der Druck $q \cdot h^2 \cdot s^2$, andererseits (da unterhalb des Niveaus der Grenzfläche der in beiden Schenkeln vorhandene gleiche, aber entgegengesetzte Druck sich aufhebt) der Druck $q \cdot h^1 \cdot s^1$. Hierbei ist es gleichgültig, ob beide Röhren dieselbe Weite haben oder nicht [§ 37]. Gleichgewicht ist dann vorhanden, wenn $q \cdot h^1 \cdot s^1 = q \cdot h^2 \cdot s^2$. Daraus folgt $h^1 \cdot s^1 = h^2 \cdot s^2$ oder $h^1 : h^2 = s^2 : s^1$. Die (von der Grenzschicht an gerechneten) Höhen der Flüssigkeitssäulen verhalten sich also umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte. Ist z. B. die eine Flüssigkeit Quecksilber, dessen spezifisches Gewicht 13,6 ist, die andere Wasser, so wird die Wassersäule 13,6mal höher sein als die Quecksilbersäule. Kennt man nun das spezifische Gewicht der einen Flüssigkeit, so läßt sich das der anderen leicht berechnen.



Fig. 35.

§ 41. **Kohäsion und Adhäsion.** Zwischen den einzelnen Teilchen der Flüssigkeiten (und festen Körper) findet eine Anziehung statt, die Kohäsion² genannt wird [vgl. § 11]. Darauf beruht es, daß kleine Tropfen Kugelform annehmen. Gewöhnlich wirkt dieser Kohäsion die Schwerkraft entgegen [vgl. § 36]. Schaltet man aber dieselbe aus, so nehmen auch größere Flüssigkeitsmengen Kugelform an. Zuerst zeigte dies PLATEAU, indem er Öl vorsichtig in eine Flüssigkeit von gleichem spezifischem Gewicht (Gemisch von Alkohol und Wasser) brachte.

Unter Adhäsion³ versteht man dagegen die Anziehung zwischen

¹ *πυκνός* dicht. — ² *cohaereo* zusammenhängen. — ³ *adhaereo* anhaften.

Teilchen verschiedener Körper. Hierauf beruht z. B. das Leimen, das Schreiben mit Tinte, Kreide usw., sowie die Benetzung eines Körpers durch eine Flüssigkeit. Letztere findet aber nur statt, wenn die Adhäsion größer ist als die Kohäsion der Flüssigkeit (z. B. beim Eintauchen eines Fingers in Wasser); andernfalls bleibt sie aus (z. B. beim Eintauchen des Fingers in Quecksilber).

Durch das Verhältnis zwischen Kohäsion und Adhäsion (und Schwerkraft) wird auch die Oberfläche von Flüssigkeiten an der Wand ihrer Behälter bestimmt. Überwiegt die Adhäsion, d. h. hier die Anziehung zwischen Gefäßwand und Flüssigkeit, so steigt die Flüssigkeit etwas am Rande empor (z. B. bei Wasser in Glasbehälter); überwiegt die Kohäsion, so steht die Flüssigkeit am Rande etwas tiefer (z. B. bei Quecksilber in Glasbehälter). Der Randwinkel (d. i. der Winkel zwischen Gefäßwand und Flüssigkeit), der für zwei gegebene Stoffe eine konstante Größe besitzt, ist im ersten Falle ein spitzer, im zweiten ein stumpfer. In engen Röhren sind die erwähnten Erscheinungen besonders deutlich, da hier nicht nur der Randbezirk, sondern die gesamte Oberfläche konkav oder konvex gekrümmt ist, je nachdem die Adhäsion oder Kohäsion überwiegt. Eine solche gekrümmte Oberfläche wird auch Meniskus¹ genannt [vgl. § 42].

§ 42. **Oberflächenspannung und Kapillarität.** Die obersten Schichten von Flüssigkeiten sind **dichter** als die übrigen. Sie bilden gewissermaßen ein Häutchen. Da auf beruht es, daß manche Insekten auf dem Wasser laufen können, daß eine (eingefettete) Nadel auf Wasser schwimmt usw. Diese, auch **Oberflächenspannung** genannte, Erscheinung läßt sich so erklären: Während bei einem kugelförmigen Teilchen im Innern einer Flüssigkeit die anziehenden Kräfte sich von allen Seiten das Gleichgewicht halten, werden an der Oberfläche die

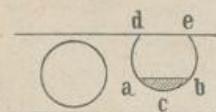


Fig. 36.

anziehenden Kräfte in *abc* (Fig. 36) nicht kompensiert, sie werden also *de* nach unten zu ziehen suchen. Aus Fig. 37 erhellt nun ohne weiteres, daß die Spannung bei konvexen Oberflächen (*A*) größer, bei konkaven (*C*) aber kleiner ist als bei ebenen (*B*). Das geht aus den betreffenden Größen

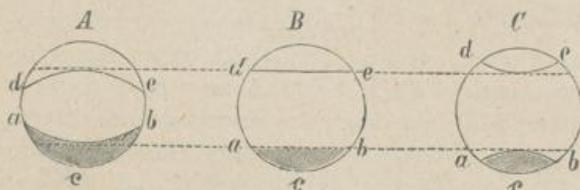


Fig. 37.

des Stückes *abc* hervor, das ja durch seine Anziehung die Oberflächenspannung hervorruft. Hierdurch finden die Erscheinungen in Kapillaren²

¹ *μηνίσκος* Halbmond. — ² *capillus* Haar; also Haarröhrchen, d. h. sehr feine Röhrchen.

ihre Erklärung. Ohne auf die komplizierten Verhältnisse hier näher einzugehen, sei nur bemerkt, daß, wenn man ein solches enges Röhrchen in eine Flüssigkeit einsetzt, das Niveau im Röhrchen entweder höher ist als das der anderen Flüssigkeit (Kapillarattraktion) oder tiefer (Kapillardep^{re}ssion). Kapillarattraktion, die gewöhnliche Erscheinung, muß stattfinden, wenn die Oberflächenspannung im Röhrchen geringer ist als in der anderen Flüssigkeit, wenn also der Meniskus in ihm konkav ist; Kapillardep^{re}ssion findet sich demgemäß bei konvexem Meniskus. Auf der Kapillarität beruhen viele wichtige Erscheinungen, z. B. das Sickersen von Wasser durch poröse Wände, das Aufsteigen von Wasser in Zucker, wenn nur eine Stelle benetzt ist, das Eindringen von Flüssigkeiten unter das Deckgläschen bei mikroskopischen Präparaten, usw.

§ 43. **Lösungen.** Eine Lösung ist ein physikalisch und chemisch homogenes Gemenge verschiedenartiger Körper. Abgesehen von den Metallegerungen, die als feste Lösungen bezeichnet werden können, handelt es sich um Flüssigkeiten. Eine Lösung entsteht dadurch, daß in einer Flüssigkeit, dem sog. Lösungsmittel, gasförmige [§ 53], flüssige oder feste Stoffe aufgelöst werden. Der Gehalt einer Lösung an dem aufgelösten Stoffe heißt Konzentration; das Lösungsvermögen wächst meist mit der Temperatur [vgl. § 89]. Gesättigt ist eine Lösung, die bei einer bestimmten Temperatur nichts mehr von dem betreffenden Stoff aufnehmen kann, also eine maximale Konzentration für diese Temperatur besitzt. Unter Umständen, z. B. durch langsames Abkühlen, kann man auch übersättigte Lösungen erhalten, bei denen also mehr Substanz aufgelöst ist, als es unter gewöhnlichen Verhältnissen bei der betreffenden Temperatur der Fall ist¹. — In verdünnten Lösungen wird der Zustand des gelösten Körpers dem Gaszustand ähnlich. Man nennt Lösungen, welche dieselbe Anzahl Moleküle des gelösten Stoffes enthalten, äquimolekular oder isomolekular. Es verhalten sich hier die in gleichen Volumina enthaltenen Massen der gelösten Stoffe wie ihre Molekulargewichte [vgl. §§ 44 u. 45]. Äquimolekulare Lösungen sind isotonisch, zeigen gleiche Erniedrigung des Gefrierpunktes und Dampfdruckes sowie gleiche Erhöhung des Siedepunktes [§§ 44, 89, 90, 93]. Betreffs Dissoziation in Lösungen s. § 185.

§ 44. **Diffusion und Osmose.** Diffusion² heißt die Eigenschaft zweier Flüssigkeiten (oder Gase), sich, wenn sie übereinandergeschichtet sind, allmählich zu durchdringen. Das ist z. B. bei Wasser und

¹ Erschüttert man aber eine solche übersättigte Lösung oder bringt in sie einen kleinen Kristall des gelösten Stoffes, so wird die überschüssig gelöste Substanz sofort wieder ausgeschieden. — ² *diffusio* das Sich-Ausbreiten.

Alkohol der Fall. Flüssigkeiten, deren Kohäsion größer ist als die gegenseitige Adhäsion, diffundieren aber nicht, z. B. Wasser und Öl. Sind die Flüssigkeiten (oder Gase) durch poröse Scheidewände (Tonzellen, Schweinsblasen, Pergamentpapier usw.) getrennt, so erfolgt die Vermischung eventuell durch diese hindurch und heißt dann Osmose¹. Der Vorgang der Osmose spielt u. a. bei der Ernährung der Zellen eine große Rolle. Ist auf der einen Seite der Membran Wasser, auf der andern eine beliebige Flüssigkeit, so heißt das osmotische Äquivalent dieser Flüssigkeit die Menge Wasser, die gegen 1 Gramm dieser Flüssigkeit ausgetauscht wird. Nicht alle Körper diffundieren gleich gut durch Membranen. GRAHAM theilte in dieser Hinsicht die Körper ein in kolloide², zu denen besonders Eiweiß, Leim, Kautschuk usw. gehören, und kristalloide. Die ersteren diffundieren fast gar nicht durch Membranen, mit anderen Worten, ihr osmotisches Äquivalent ist unendlich groß; letztere gehen leicht hindurch. Man hat somit ein bequemes Mittel, kolloide von kristalloiden Körpern zu trennen. Das Verfahren heißt Dialyse, der Apparat Dialysator.

Besonders geeignet zum Studium der Osmose sind die sog. halbdurchlässigen Membranen, die nur Wasser, nicht aber den in ihm gelösten Stoff hindurchlassen. Eine natürliche halbdurchlässige Membran ist z. B. die Membran der Pflanzenzellen; eine künstliche erhält man u. a., wenn man ein poröses Tongefäß in eine Lösung von Kupfersulfat und dann von Ferrocyankalium taucht.

Füllt man eine so behandelte Tonzelle *A* (Fig. 38) mit wässriger Zuckerslösung und bringt sie in ein Gefäß *B* mit reinem Wasser, so tritt Wasser durch die Tonwand nach *A* über. Hierdurch entsteht in *A* ein Überdruck, der sog. osmotische Druck, der im angeschlossenen Manometer *M* [§ 49] so lange das Quecksilber verschiebt, bis ihm die Quecksilbersäule *h* das Gleichgewicht hält; letztere dient daher zu seiner Messung. Befindet sich die Lösung in einer allseitig geschlossenen Membran, so wird diese nach außen vorgewölbt, bis der von ihr ausgeübte Gegendruck einen Gleichgewichtszustand herbeiführt.

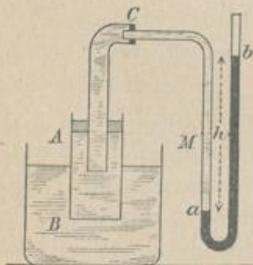


Fig. 38.

Der osmotische Druck ist also eine Folge des Bestrebens der Moleküle einer Lösung, noch mehr Lösungsmittel aufzunehmen und sich darin weiter auszudehnen, so daß hier eine Analogie mit dem Ausbreitungsbestreben der Gasmoleküle besteht. Solche osmotische Vorgänge treten nicht nur ein, wenn reines Wasser auf der einen Seite ist, sondern überhaupt zwischen allen nicht isotonischen³ Lö-

¹ ὄσμος das Stoßen. — ² leimähnlich, von κόλλα Leim, εἶδος Aussehen. — ³ ἴσος Spannung, ἴσος gleich, ἐπίρ über, ὑπό unter.

Lehrbuch d. Physik von Struve

sungen. Hierunter versteht man eben Lösungen, deren osmotischer Druck gleich ist, während man eine Lösung hypertonisch bzw. hypotonisch nennt, deren osmotischer Druck größer oder kleiner ist als der einer anderen Lösung.

Der osmotische Druck hängt nach VAN'T HOFF nicht von der Natur der halbdurchlässigen Membran, wohl aber von der chemischen Beschaffenheit der Lösung ab und ist ferner direkt proportional deren Konzentration und Temperatur. Bei hinreichender Verdünnung haben also äquimolekulare Lösungen, die mit gleichen Volumina desselben Lösungsmittels hergestellt sind, bei gleicher Temperatur den gleichen osmotischen Druck; und zwar ist dieser (von den Molekülen ausgeübte) osmotische Druck gleich dem Druck eines Gases von gleicher Temperatur, das in gleichen Raunteilen ebensoviel Moleküle enthält wie die Lösung Moleküle gelösten Stoffes (VAN'T HOFFSche Gesetze). [Vgl. § 185 Anm.]

Der osmotische Druck läßt sich also bei bekannter Temperatur aus dem Molekulargewicht berechnen. Bezeichnet man als Gramm-Molekel oder Mol eine solche Anzahl Gramm, die dem Molekulargewicht der betreffenden Substanz entspricht (also z. B. 2 Gramm Wasserstoff, 32 Gramm Sauerstoff, 28 Gramm Stickstoff usw.) so haben offenbar alle Gramm-Molekel gleichviel Moleküle. Da nun nach AVOGADRO auch gleichgroße Volumina der Gase gleichviel Moleküle enthalten (§ 45), so folgt zunächst der Satz: Die Gramm-Moleküle der Gase besitzen bei gleichen Druck- und Temperaturverhältnissen alle dasselbe Volumen. Was für Gase gilt, gilt aber nach VAN'T HOFF auch für verdünnte Lösungen [s. o.] Da nun 1 Mol Wasserstoff bei 0° und 760 mm Druck das Volumen von 22,4 Liter besitzt, muß auch jedes andere Mol eines Gases bzw. einer Substanz in sehr verdünntem Lösungsmittel das gleiche Volumen einnehmen. 1 Mol Rohrzucker z. B. ($C_{12}H_{22}O_{11}$) wiegt 342 Gramm. 1 Gramm Rohrzucker würde daher in Gasform bei 0° und 760 mm Druck $\frac{22,4}{342}$ Liter = 65,5 Kubikzentimeter ausfüllen. Löst man dagegen 1 Gramm Rohrzucker in 100 Gramm Wasser auf, so beträgt das Volumen dieser Lösung bei 0° und 760 mm Druck 100,6 Kubikzentimeter. Zur Berechnung des osmotischen Druckes dient nun das BOYLE-MARIOTTESche Gesetz (§ 48), das auch für verdünnte Lösungen gilt. Es verhält sich also der (osmotische) Druck in der Lösung zum Druck des Dampfes umgekehrt wie die entsprechenden Volumina, $x:760 = 65,5:100,6$. Der osmotische Druck in der 1% Zuckerlösung beträgt somit bei 0° $x = \frac{760 \cdot 65,5}{100,6} =$ zirka 495 mm Quecksilber. Bei t° beträgt er nach dem GAY-LUSSACschen Gesetze (§ 83) $\frac{495 \cdot T}{273}$. — Umgekehrt läßt sich auch aus dem osmotischen Druck einer Lösung das Molekulargewicht der gelösten Substanz berechnen [vgl. auch § 89].

D. Gesetze der luftförmigen Körper.

§ 45. **Grundeigenschaften.** Die luftförmigen Körper oder gasförmigen Flüssigkeiten teilt man ein in Gase und Dämpfe, die sich

dadurch unterscheiden, daß Gase schon bei gewöhnlicher Temperatur luftförmig sind, Dämpfe erst bei erhöhter Temperatur [vgl. § 95]. Luftförmige Körper sind ohne bestimmtes Volumen und ohne bestimmte Gestalt; sie haben das Bestreben, sich auszudehnen und jeden gegebenen Raum als homogene Masse auszufüllen. Das erklärt man durch die Annahme, daß die Moleküle sich gegenseitig nicht anziehen, sondern im Gegenteil eine geradlinige, fortschreitende Bewegung besitzen, bis sie aneinander oder an die Wand anprallen (sog. kinetische Gastheorie). Die Gesamtheit der die Wand treffenden Stöße der Moleküle äußert sich als Druck des Gases gegen die Wand. Da die Größe der Molekel gegenüber den Intermolekularräumen verschwindend klein ist, so sind nach der Hypothese von AVOGADRO in gleichen Volumina von Gasen bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl Moleküle enthalten. Gase und Dämpfe haben mit Flüssigkeiten das gemein, daß ein Druck in ihnen allseitig fortgepflanzt wird, daß sie infolge ihres Gewichts einen bestimmten Druck auf den Boden ausüben, der allerdings gewöhnlich sehr klein ist, und daß ein Körper in ihnen so viel an Gewicht verliert, als das gleiche Volumen des betreffenden Gases wiegt. Sie unterscheiden sich aber dadurch von ihnen, daß sie sehr leicht kompressibel sind, und daß abgeschlossene, nicht zu große Gasvolumina auf alle Wände des Gefäßes an allen Stellen gleichen Druck ausüben. Letztere Tatsache findet ihre Erklärung darin, daß die Moleküle fortwährend an die Wände des Gefäßes anprallen.

§ 46. **Luftdruck.** Daß luftförmige Körper auch der Schwere unterworfen sind, erkennt man wegen ihrer geringen Dichte (1 l Luft wiegt z. B. ca. 1 g) nur bei großen Gasmassen, z. B. bei der Atmosphäre¹. Diese ist im wesentlichen ein Gemenge von 80% Stickstoff und 20% Sauerstoff und hat eine Höhe von ca. 150 km. Die große Bedeutung des Luftdrucks erkannte zuerst TORRICELLI, indem er auf ihn die Erscheinung zurückführte, daß Wasser in luftleere Räume eindringt. Vorher hatte man angenommen, dies geschehe, weil die Natur keine leeren Räume dulde (horror vacui). Um zu zeigen, daß doch ein Vakuum vorkommt, füllte er eine am oberen Ende geschlossene 1 m lange Röhre mit Quecksilber und stülpte sie in ein ebenfalls mit Quecksilber gefülltes Gefäß um; hierbei fiel zuerst das Quecksilber in der Röhre, blieb dann aber in einer Höhe von 76 cm stehen; darüber ist ein luftleerer Raum (Torricellis Vakuum). Der Luftdruck, der von oben auf das Gefäß drückt, hält also der 76 cm hohen Quecksilbersäule in der Röhre das Gleichgewicht. Man sagt dann: der Luftdruck beträgt 76 cm Quecksilber. (Da Wasser

¹ Die die Erde umgebende Luft, von ἀτμός Dunst, οὐρανός Kugel.

leichter ist als Quecksilber [spez. Gew. 13,6], so gehört eine ungefähr 10 m hohe Wassersäule dazu, dem Luftdruck das Gleichgewicht zu halten.) Demnach ist die Größe des Luftdrucks auf 1 qcm = $76 \cdot 13,6$, also ca. 1 kg. Diese Druckeinheit nennt man eine Atmosphäre; demnach ist z. B. ein Druck von 2 Atmosphären vorhanden, wenn ein Dampf oder eine Flüssigkeit auf 1 qcm ihrer Wandung einen Druck von 2 kg ausübt. Der Luftdruck auf die gesamte Oberfläche eines Menschen beträgt ca. 15000 kg. Daß dadurch der Mensch nicht zerdrückt wird, beruht darauf, daß auch im Innern des Körpers der gleiche Luftdruck herrscht. Der Luftdruck ist es auch z. B., der den Ober-schenkelknochen in der Pfanne des Beckens hält.

§ 47. Das **Barometer**¹ dient zum Messen des Luftdrucks.

1) Die Gefäßbarometer (Fig. 39) entsprechen genau dem TORRICELLI'schen Apparate [§ 46] und sind deshalb nicht sehr praktisch, weil sie schlecht transportabel sind, und weil das Flüssigkeitsniveau im unteren Gefäß, und damit auch der Nullpunkt der Skala, fortwährend wechselt. Das beste Gefäßbarometer ist das von FORTIN, bei dem das Quecksilber sich unten in einem Lederbeutel befindet, der durch eine Schraube gehoben und gesenkt werden kann. So kann das Quecksilberniveau stets auf die gleiche Höhe eingestellt werden.

2) Die Heberbarometer (Fig. 40) bestehen aus einer heberartigen Glasröhre mit offenem kurzen und geschlossenem langen Schenkel. Die Größe des Luftdrucks wird hier durch den Niveauunterschied der Quecksilbersäulen in beiden Röhren gemessen.

Gute (Gefäß- und Heber-) Barometer müssen folgende Bedingungen erfüllen.

1) Das TORRICELLI'sche Vakuum muß ganz luftleer sein. Man erreicht das durch Auskochen des Quecksilbers in der Röhre; dadurch wird nämlich die der Glaswand anhaftende Wasserhaut beseitigt, die sonst in das Vakuum verdampfen würde.

2) Die Glasröhre muß genau kalibriert sein, d. h. die einzelnen Striche der Skala müssen gleichen Volumsteilen der Röhre entsprechen.

3) Das Quecksilber muß rein sein, da sonst sein spezifisches Gewicht beeinflußt wird.

4) Die Barometeröhre darf nicht zu eng sein, weil sonst die Kapillardepression [§ 42] zu groß wird. Beim Heberbarometer ist dieses Übel eliminiert, da es in beiden Röhren gleich ist. —

Beim Ablesen des Barometerstandes muß das Auge senkrecht über das obere Ende der Quecksilbersäule auf die Skala sehen, da man sonst ein falsches

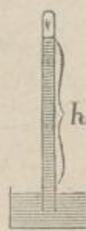


Fig. 39.



Fig. 40.

¹ βάρος Schwere, μέτρον Maß.

Resultat erhält (sog. parallaxischer¹ Fehler.) Dies gilt übrigens für alle Instrumente mit Skalenablesung.

Zur richtigen Bewertung des abgelesenen Barometerstandes muß die herrschende Temperatur berücksichtigt werden, da ja das Quecksilber infolge der Ausdehnung bei Erwärmung ein kleineres spezifisches Gewicht bekommt. Man berechnet daher, wie groß die abgelesene Höhe der Quecksilbersäule bei 0° sein würde und spricht dann von reduziertem Barometerstand.

3) Die Aneroid-² oder Metallbarometer beruhen darauf, daß eine kreisförmig gebogene, luftleere Röhre aus dünnem Blech, die sog. Hohlfeder (*ab* Fig. 41), sich um so stärker krümmt, je größer der äußere Luftdruck wird. Dabei nähern sich also ihre Enden, während sie bei abnehmendem Luftdruck auseinandergehen. Diese Bewegung der Enden wird durch Hebelübersetzungen vergrößert und auf einen Zeiger übertragen, der an einer empirisch bestimmten Skala vorbeigeht. Diese Barometer sind bequem zum Transport, aber nicht sehr genau.

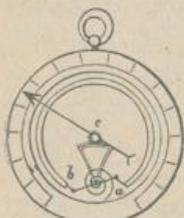


Fig. 41.

Das Barometer dient also vor allem zur Bestimmung des Luftdrucks, dann aber auch zur Höhenmessung. Es ist ja klar, daß in höheren Regionen, auf denen eine kleinere und weniger dichte Luftsäule lastet, der Luftdruck geringer sein muß. Eine einfache Rechnung ergibt als annähernd richtige barometrische Höhenformel $h = 18400 (\log b_0 - \log b_h)$ wenn b_0 und b_h den mittleren Barometerstand im unteren bzw. oberen Niveau bedeuten. Schließlich dient das Barometer auch zur Wetterbestimmung. Es steigt z. B., wenn die Lufttemperatur sinkt, wenn die Luft trockner wird, dagegen fällt es, wenn starke Luftströmungen herrschen. Die Linien, welche Orte gleichen Luftdrucks verbinden, heißen Isobaren³. Sie wechseln natürlich beständig.

§ 48. **Boyle-Mariottesches Gesetz.** Unter Spannung eines Gases (oder Dampfes) versteht man sein mehr oder minder großes Bestreben sich auszubreiten, mithin auch den Druck, den es auf die Wand des einschließenden Gefäßes ausübt. Dieser Druck ist natürlich ebenso groß wie der Druck der Wand auf das Gas. Wird nun ein Gas vom Volumen v und dem Druck p auf ein kleineres Volumen v_1 zusammengedrückt, so wird es unter höheren Druck p_1 gebracht, oder, anders ausgedrückt, seine Spannung wird größer:

$$p:p_1 = v_1:v.$$

Also: bei gleichbleibender Temperatur ist die Spannung eines Gases dem Volumen umgekehrt proportional.

¹ παράλλαξις Abweichung. — ² a privativum, υηρός feucht, flüssig. — ³ ἴσος gleich, βάρος Schwere.

Da nun ein und dieselbe Gasmenge in einem größeren Raume weniger dicht ist als in einem kleineren, so heißt das Gesetz auch:

Bei gleichbleibender Temperatur ist die Spannung eines Gases der Dichte proportional.

Da $p_1 v_1 = p_2 v_2 = p_x v_x$ ist, so folgt daraus, daß pv für eine bestimmte Gasmenge (bei derselben Temperatur) eine konstante Größe vorstellt [vgl. § 82]. Das BOYLE-MARIOTTESCHE Gesetz gilt indes nur innerhalb bestimmter Grenzen.

§ 49. Auf diese Gesetzen beruhen u. a. folgende Erscheinungen:

Das **Saugen** geschieht dadurch, daß im Munde ein luftverdünnter Raum hergestellt wird, in den durch den äußeren Luftdruck Flüssigkeit hineingetrieben wird. Man benutzt oft eine **Pipette** dazu, d. i. eine beiderseits offene graduierte Glasröhre mit Bauch in der Mitte (Fig. 42). Nimmt man sie nach dem Ansaugen aus dem Munde und hält schnell das obere Ende mit dem Finger zu, so kann die Flüssigkeit nicht herausfließen, da sie vom äußeren Luftdruck getragen wird. Man kann übrigens mittels einer Pipette auch ohne Ansaugen Flüssigkeit aus einem Behälter entnehmen, wenn man sie in denselben unverschlossen eintaucht, wobei sie sich entsprechend dem Flüssigkeitsniveau füllt, und dann beim Herausheben das obere Ende zuhält („Stechheber“).



Fig. 42.

Das **Einatmen** beruht darauf, daß der Brustraum durch die Atmungsmuskeln erweitert wird, wodurch gleichzeitig eine Ausdehnung der Lungen bedingt ist. Dadurch entsteht innerhalb der Lungen eine Verdünnung der Luft bzw. Erniedrigung des Luftdrucks, und zum Ausgleich strömt Luft von außen her in die Lungen. Beim Ausatmen ist es umgekehrt.

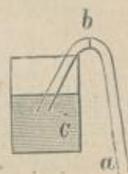


Fig. 43.

Der **Schenkelheber** (Fig. 43) besteht aus einer gekrümmten Röhre, deren eines Ende in die Flüssigkeit c taucht. Solange bei a gesaugt wird, fließt natürlich wieder wegen der Differenz des Luftdruckes die Flüssigkeit durch die Röhre nach unten. Dies dauert aber noch fort, auch nachdem das Saugen aufgehört hat. Denn sonst würde ja bei b ein luftleerer Raum entstehen. Es ist ohne weiteres klar, daß der aufsteigende Schenkel des Hebers, wenn die Flüssigkeit z. B. Quecksilber ist, nicht höher als 76 cm sein darf.

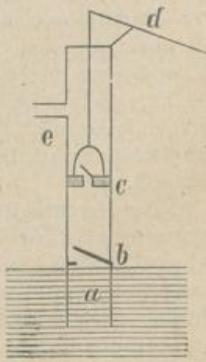


Fig. 44.

Wasserpumpen sind Apparate, um Wasser in die Höhe zu befördern.

Die Saugpumpen haben folgendes Prinzip: In dem Saugrohr a (Fig. 44) ist oberhalb des Wasserspiegels ein Ventil b (Bodenventil), das sich nur nach oben öffnet. Darüber kann der in der Mitte durchbohrte Kolben c durch das Hebelwerk d wasser- und luftdicht auf- und niederbewegt werden. Die Öffnung im Kolben ist durch ein Kolbenventil geschlossen, das sich auch nur nach oben öffnet. Wird nun der Kolben von unten nach oben gezogen, so entsteht unter ihm ein luftverdünnter Raum, in den Wasser einströmt. Da nun durch das Bodenventil nichts zurückfließen kann, sammelt sich nach einigen Zügen über

demselben so viel Wasser an, daß es durch den Kolben hindurchdringt. Ist es einmal über dem Kolben, so kann es nicht mehr zurück und wird bis zur Ausflußöffnung *e* gehoben. Es ist leicht einzusehen, daß Saugpumpen Wasser nie über 10 m heben können.

Die Druckpumpen haben ebenfalls ein Bodenventil *a* (Fig. 45). Der Kolben ist aber nicht durchbohrt; über dem Bodenventil ist seitlich eine Steigröhre mit einem Ventil, das sich in der Richtung des Pfeils öffnet. Wenn hier das Wasser über das Bodenventil gekommen ist, wird es durch den niedergehenden Kolben, der eventuell durch Dampfkraft getrieben wird, in die Steigröhre zu beliebiger Höhe gepreßt.

Manometer¹ sind Apparate, um die Spannung (Druck) von Gasen in einem Raum von außen anzuzeigen. Die offenen M. bestehen aus doppelt gebogenen

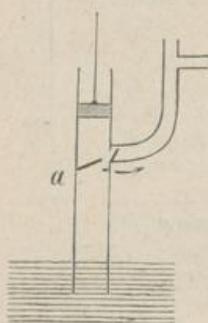


Fig. 45.

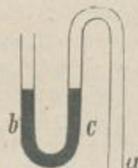


Fig. 46.

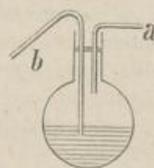


Fig. 47.

Röhren (Fig. 46), die mit einer Flüssigkeit, z. B. Quecksilber, gefüllt sind und durch das eine Ende *b* mit der Luft, durch das andere *a* mit dem betreffenden Raum, z. B. einem Dampfkessel, kommunizieren. Ist der Druck in letzterem gleich dem Atmosphärendruck, so steht

beiderseits die Flüssigkeit gleich hoch. Ist aber der Druck im Kessel höher, so steigt die Flüssigkeit im Schenkel *b*. Die Höhendifferenz plus dem äußeren Luftdruck (Barometerstand) entspricht dann dem Druck im Kessel. Für hohe Spannungen verwendet

man geschlossene M., bei denen der Schenkel *b* oben geschlossen ist und über der Sperrflüssigkeit eine bestimmte Luftmenge enthält. Ist deren Volumen bei einer Atmosphäre bekannt, so entspricht nach dem BOYLE-MARIOTTE'schen Gesetze der halben Länge der Luftsäule ein Druck von 2 Atmosphären usw. — Für technische Zwecke gebraucht man u. a. Metallmanometer, die ähnlich konstruiert sind wie die Metallbarometer. Man verbindet hier das Innere der Hohlfeder *ab* (Fig. 41) mit dem Raume, dessen Gasdruck gemessen werden soll.

Der **Heron'sball²** ist ein Gefäß, aus dem durch komprimierte Luft Flüssigkeit herausgespritzt wird. Hierher gehört z. B. die Spritzflasche der Chemiker (Fig. 47). Wird durch *a* Luft eingeblasen, so wird die Luft in der Flasche komprimiert und drückt das Wasser durch die Röhre *b* heraus. Auf diesem Prinzip beruht auch der Windkessel der Feuerspritze, in dem die Kompression der Luft durch Wasser erfolgt, das abwechselnd von zwei Seiten her durch Ventile hindurch eingepumpt wird.

§ 50. Die **Luftpumpe** dient dazu, die Luft in einem Raum zu verdünnen; ein vollständig luftleerer Raum läßt sich natürlich nicht herstellen. Erfunden wurde sie 1650 von dem Magdeburger Bürgermeister OTTO v. GUERICKE.

In der einfachsten Form besteht sie aus einem Stiefel *A* (Fig. 48), in dem ein Kolben *B* luftdicht auf und nieder bewegt wird. Vom Stiefel geht eine Röhre

¹ *μαρός* dünn. — ² Nach d. Erfinder HERON in Alexandria, um 100 v. Chr.

Der künstliche Reiben bei der Luftpumpe

E durch den Teller *C* zu dem aus Glas bestehenden „Rezipienten“ *D*, in dem die Luft verdünnt werden soll. Der Hahn *J* hat eine doppelte Bohrung: Bevor der Kolben *B* in die Höhe gezogen wird, wird er (wie in der Hauptfigur) so gestellt, daß die Luft durch eine dieser Bohrungen aus *D* nach *A* gelangen kann. Damit beim Niedergehen des Kolbens die Luft aber nicht zurück nach *D* geht, wird der Hahn *J* jetzt um 90° gedreht, so daß dieser Weg versperrt und durch die zweite Bohrung (*g* in der Nebenfigur) eine Verbindung mit der Außenluft hergestellt wird. Die Luftverdünnung kann wegen des sogenannten schädlichen Raums, d. i. der Raum zwischen dem am unteren Ende seines Weges angelangten Kolben *B* und dem Hahn *J*, einen bestimmten Grad nicht übersteigen. Bei den zweistiefeligen Luftpumpen steigt immer der eine Kolben und saugt Luft aus dem Rezipienten, während der andere heruntergeht und Luft austreibt. Den Luftdruck im Rezipienten mißt man durch ein Manometer nach Art eines Heberbarometers mit verkürztem geschlossenen Schenkel, das auch Barometerprobe genannt wird.

Die Wirkung der Luftpumpe demonstrierte GUERICKE durch den berühmten Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln (1654). Er setzte zwei hohle Halbkugeln zusammen und pumpte aus ihnen die Luft so weit aus, daß jederseits acht Pferde sie nicht auseinanderbringen konnten; dies beruht natürlich auf dem Überwiegen des äußeren Luftdruckes.

Luftpumpen können bei entgegengesetzten Stellungen des Hahnes auch zur Verdichtung von Luft und anderen Gasen dienen (Kompressionspumpen).

Vollkommener sind die Quecksilberluftpumpen nach GEISSLER, die auf dem TORRICELLISCHEN Vakuum basieren sind und Verdünnungen von $\frac{1}{100000}$ Atmosphäre zu erreichen gestatten.

Der Glasbehälter *ca* (Fig. 49) ist unten durch den Gummischlauch *ce* mit dem oben offenen Gefäß *d* verbunden, während auf sein oberes Ende der auszupumpende Rezipient *R* aufgesetzt und durch Quecksilber nach außen abgesperrt wird. Zwischen *a* und *R* ist ein Hahn *h* mit doppelter Bohrung angebracht. In *acd* befindet sich Quecksilber. Wird *d* gesenkt, etwa bis *d*₁, so fällt das Quecksilber in *a* und es entsteht oben ein luftleerer Raum, in den bei einer bestimmten Stellung von *h* (wie in der Hauptfigur) ein Teil der Luft aus *R* einströmt. Wird nun der Hahn um 90° gedreht (wie in der Nebenfigur), dann

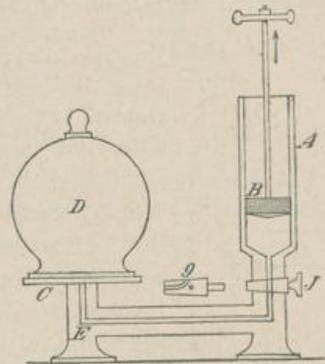


Fig. 48.

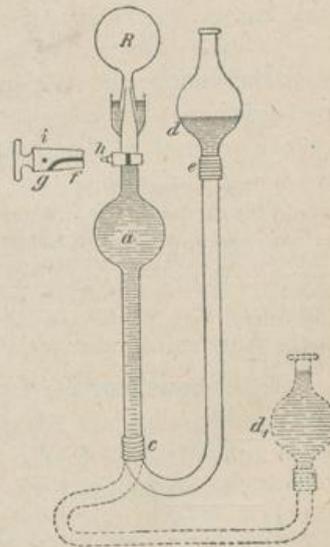


Fig. 49.

d_1 wieder bis d gehoben, so steigt das Quecksilber in a und drängt die in a eingeströmte Luft durch die Bohrung gf nach außen. Dies wird mehrfach wiederholt.

Bei den Wasserluftpumpen (BUNSEN) wird Luft durch fallendes Wasser angesaugt.

Auf demselben Prinzip beruhen auch die Quecksilbertropfpumpen nach SPRENGEL.

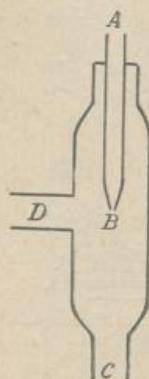


Fig. 50.

Durch das mit einer Wasserleitung verbundene Rohr A (Fig. 50) strömt Wasser in den weiteren Behälter B , um bei C abzufließen. Dabei wird die zwischen den einzelnen Wassertropfen befindliche Luft mit herabgerissen; zu ihrem Ersatz strömt andauernd Luft aus dem Rohre D , das in den auszupumpenden Behälter führt, nach.

§ 51. Das Archimedische Prinzip [§ 38] gilt auch für Luftarten; und zwar beträgt der Auftrieb in gewöhnlicher Luft 1,3 mg pro ccm, also 1,3 kg pro cbm. Da also in der Luft sowohl die zu wiegenden Körper wie die Gewichtsstücke einen Gewichtsverlust erleiden, gleich dem Gewicht der von ihnen verdrängten Luft, so ist von zwei scheinbar gleichschweren Körpern in Wirklichkeit derjenige schwerer, der das größere Volumen besitzt. Um ganz genaue Resultate zu erhalten, ist es daher nötig, die Wägungen auf den luftleeren Raum zu reduzieren. Ist p das Gewicht des Körpers, p' das der Gewichtsstücke, a und a' der Auftrieb in Luft, so ist beim Gleichgewicht $p - a = p' - a'$, also $p = p' + a - a'$. a und a' findet man als Produkt aus Volumen (= Gewicht dividiert durch spezif. Gewicht) und 1,3 mg. — Ferner müssen spezifisch leichtere Körper als die Luft in ihr aufsteigen. Darauf beruhen die Luftballons. Die ersten von MONTGOLFIER konstruierten waren mit erwärmter Luft gefüllt. Später wendete man Wasserstoff und jetzt meist Leuchtgas an.

§ 52. Bewegung der Luftarten. Auch für die Gase gilt theoretisch das Gesetz, daß die Ausflußgeschwindigkeit aus einem Gefäß $v = \sqrt{2gh}$ ist [vgl. § 37]. Da indes die Höhe einer Gassäule keine konstante Größe ist, gilt hier die etwas modifizierte Formel:

$$v = \sqrt{2g \cdot \frac{p}{s}},$$

wo p die Differenz zwischen dem Druck im Innern des Gefäßes und dem Außendruck, s das spezifische Gewicht des Gases bedeutet. Es sind daher die Ausflußgeschwindigkeiten zweier Gase umgekehrt proportional den Quadratwurzeln aus ihren spezifischen Gewichten. Dasselbe Gesetz gilt übrigens, wie GRAHAM zeigte, auch für die Geschwindigkeit der Diffusion und Osmose von Gasen [§ 44].

Wenn ein Gas aus einem engen Rohr in ein weites mit einer

gewissen Geschwindigkeit überströmt, so reißt es daselbst, wie das Wasser in der Wasserluftpumpe, Luftteilchen mit sich. Es entsteht daher ein negativer Druck, der Luft und Flüssigkeiten ansaugen kann. Bläst man z. B. durch *ab* (Fig. 51) in Richtung des Pfeils, so steigt die Flüssigkeit im Manometerschenkel *c*. Darauf beruhen verschiedene Vorrichtungen zum Zerstäuben von Flüssigkeiten, z. B. die medizinisch benutzten Inhalationsapparate, ferner auch der

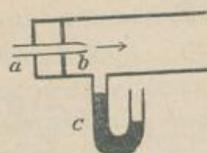


Fig. 51.

Bunsenbrenner. Durch *R* (Fig. 52) zugeleitetes Leuchtgas strömt bei *a* aus und saugt durch die Öffnungen *b* des Mantels Luft an, mit der es sich innig mengt. Zündet man das Gasgemenge an der oberen Öffnung des Brenners an, so resultiert infolge der reichlichen Sauerstoffzufuhr eine vollkommene Verbrennung des Kohlenstoffes, und man erhält eine sehr heiße, nicht rußende, aber wenig leuchtende Flamme. Durch Verschuß von *b* entsteht natürlich eine gewöhnliche Gasflamme.

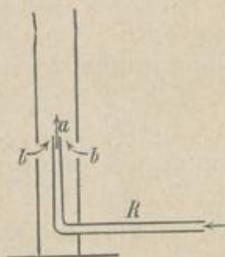


Fig. 52.

§ 53. **Absorption**¹ heißt die Erscheinung, daß Gase von festen und flüssigen Körpern aufgenommen werden können. Bei den festen Körpern kann die Absorption sich entweder auf die Oberfläche beschränken (Adsorption), oder das Gas kann auch in das Innere eindringen (Absorption im engeren Sinne, auch Okklusion² genannt).

Adsorption zeigen besonders poröse feste Körper; so kann z. B. Holzkohle das 90fache ihres Volumens an Ammoniak aufnehmen. Bei der Adsorption findet eine Verdichtung des Gases an der Oberfläche des festen Körpers statt. Auf diese Weise entsteht z. B. aus dem Wasserdampf der Luft an der Oberfläche von Glas ein Wasserhäutchen. Auch noch andere Körper, z. B. Chlorkalzium, haben die Fähigkeit, den Wasserdampf der Luft aufzunehmen und zu Wasser zu verdichten; solche Körper heißen hygroskopisch³. Bei der Verdichtung der Gase entsteht Wärme [§ 95], die mitunter sehr groß ist. Wenn z. B. Wasserstoff auf mit Sauerstoff gesättigten Platinschwamm (d. i. feinpores Platin) strömt, wird diese Wärmeentwicklung so stark, daß das Platin glühend wird und der Wasserstoff sich entzündet (DOEBEREINERS Feuerzeug). Hierauf beruhen auch einige moderne Gasselbstzünder.

Okklusion findet sich besonders bei Metallen. So kann z. B. Palladium das 900fache seines Volumens an Wasserstoff aufnehmen.

Bei der Absorption durch Flüssigkeiten ist zu unterscheiden

¹ *absorbeo* verschlucken. — ² *occludo* einschließen. — ³ *hygros* feucht, *σκοπέω* untersuchen.

die chemische und physikalische. Bei ersterer verbindet sich das Gas mit der Flüssigkeit zu einer festen Verbindung, aus der es nur auf chemischem Wege freigemacht werden kann, z. B. Absorption von Kohlensäure in Kalilauge.

Die physikalische Absorption hängt ab 1) von der Natur der Flüssigkeit und des Gases; so absorbiert Wasser bei gleichem Druck von Sauerstoff etwa das doppelte Volumen wie von Stickstoff (s. u.). Das Gasvolumen, das von der Volumeneinheit der Flüssigkeit bei 760 mm Quecksilberdruck aufgenommen wird, bezeichnet man als Absorptionskoeffizienten. Die physikalische Absorption hängt 2) ab vom Drucke. Nach dem Gesetze von HENRY absorbiert ein bestimmtes Volumen Flüssigkeit auch bei verschiedenen Drucken stets gleiche Volumina Gas; da nun aber diese Gasvolumina nach dem BOYLE-MARIOTTESchen Gesetze eine dem Druck proportionale Gasmenge enthalten, so kann man auch sagen, daß die unter sonst gleichen Umständen absorbierten Gasmengen den Drucken proportional sind. Bezüglich des Druckes ist noch zu bemerken, daß bei Gasgemischen nur der Partiärdruck in Frage kommt, d. h. der Druck jedes einzelnen Gases, unabhängig von dem der anderen Gase [vgl. § 93]. So hängt z. B. die Absorption von Sauerstoff im Wasser nicht vom ganzen Luftdruck, sondern nur vom Druck des Sauerstoffs der Luft ab. Wird also z. B. über eine Flüssigkeit, die ein Gas absorbiert enthält, ein anderes Gas geleitet, so wird, da jetzt der Partiärdruck des ersten Gases = 0 wird, das Gas aus der Flüssigkeit entweichen. Die physikalische Absorption hängt 3) auch noch ab von der Temperatur; im allgemeinen nimmt das Absorptionsvermögen mit steigender Temperatur ab. Um also Gase aus Flüssigkeiten freizumachen, hat man zwei Wege: den Druck herabzusetzen (wie das z. B. beim Öffnen einer Flasche Selterwasser geschieht) oder die Temperatur zu erhöhen.

Die atmosphärische Luft besteht im wesentlichen aus ca. 21 Volumprozent Sauerstoff (*O*) und 78 Volumprozent Stickstoff (*N*). Bei ihrer Absorption in Wasser kommt in Betracht 1) der Absorptionskoeffizient für *O* und *N* (0,048 bzw. 0,023), und 2) der Partiärdruck beider (0,21 bzw. 0,78 Atmosphären). Demnach absorbiert ein Liter Wasser bei 0° aus der atmosphärischen Luft $0,048 \cdot 0,21 = \text{ca. } 10 \text{ ccm } O$ und $0,023 \cdot 0,78 = \text{ca. } 18 \text{ ccm } N$. Die im Wasser absorbierte Luft ist also zwar dünner, aber relativ reicher an Sauerstoff als die atmosphärische Luft, was für das Leben der Wassertiere von Bedeutung ist.

§ 54. **Reibung.** Wenn Gase und auch Flüssigkeiten in Gefäßen strömen, so erleiden sie an der Wand und auch in ihrem Innern eine Reibung (äußere und innere R.). Bei Flüssigkeiten bedingt die innere Reibung ihre mehr oder weniger große Zähigkeit (Viskosität¹). Man stellt sich nun vor, daß die äußerste Schicht infolge

¹ viscosus klebrig, zähe; viscum Mistel bzw. der daraus bereitete Vogelleim.

Der totale Partialdruck von CO_2 ist die Aufnahmefähigkeit
40% CO_2 10% O_2
nicht abhängig von Partialdruck des Sauerstoffs

der Adhäsion zur Wand sich gar nicht bewegt, die mittelste Schicht am schnellsten, und daß zwischen beiden Extremen ein allmählicher Übergang der Geschwindigkeiten stattfindet.

*und diesen
Wärmer
für alle Luftschichten
Reibung*

Allgemeine Wellenlehre.

§ 55. **Definition.** Unsere Wahrnehmungen von der Außenwelt beruhen darauf, daß die spezifischen Sinnesapparate in einer jedem eigentümlichen Weise durch Impulse der Außenwelt in Schwingungen versetzt werden und diese Schwingungen zum Gehirn fortpflanzen, wo sie dann ins Bewußtsein übertragen werden. Die Bewegungsvorgänge der Außenwelt können nun direkt oder indirekt auf uns einwirken. Ersteres ist der Fall, wenn der ursprünglich bewegte Körper selbst die Endigungen unserer Sinnesorgane erregt, wenn also z. B. jemand von einer Kugel getroffen wird, wenn die (gasförmigen) Riechstoffe unmittelbar auf die Enden des Riechnerven einwirken usw. Bei der zweiten Kategorie dagegen, zu der besonders (Schall, Wärme und Licht) gehören, gelangen nicht die ursprünglich in Bewegung befindlichen Körper oder Teile von ihnen zu uns, sondern ihre Bewegung wird erst durch ein Medium auf uns übertragen. Diese Übertragung geschieht nun in einer eigentümlichen Form, nämlich durch Wellenbewegung. Wellenbewegung ist die Fortpflanzung einer Gleichgewichtsstörung (eines Impulses) durch pendelartige Schwingungen kleinster Teilchen, wobei immer die Bewegung der folgenden durch die der vorhergehenden hervorgerufen wird. Die Ortsbewegung der Teilchen selbst ist hierbei nur gering, dagegen wird der Impuls oft außerordentlich schnell fortgepflanzt. Es findet also nur ein Transport von Energie, nicht von Massen statt.

*fall
Reibung
Licht*

§ 56. **Intensität.** Da die Wellenbewegung sich (in homogenen Medien) gleichmäßig nach allen Seiten ausbreitet, sind die Wellenflächen Kugelschalen, verhalten sich also wie die Quadrate der Radien. Letztere, also die Verbindungslinien eines Punktes der Wellenfläche mit dem Störungszentrum, heißen auch Wellenstrahlen. Da die anfängliche Gleichgewichtsstörung sich auf immer größere Flächen verteilt, muß die Bewegung entsprechend schwächer werden. Die Intensität der Wellenbewegung ist also umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung vom Störungszentrum.

§ 57. **Wasserwellen.** Die Bezeichnung Wellenbewegung rührt von den Wasserwellen her, von denen auch wir zum besseren Ver-

ständnis ausgehen wollen. Fällt nämlich ein Stein ins Wasser, so entstehen bekanntlich um diesen Punkt konzentrische Kreise, die immer größer und zugleich schwächer werden. Hierbei wechseln stets Erhebungen über das allgemeine Niveau (Wellenberge) mit Senkungen (Wellentälern) ab. Durch den niederfallenden Stein wird nämlich ein Druck aufs Wasser ausgeübt; es entsteht daher an dieser Stelle ein Wellental. Das hierdurch verdrängte Wasser muß ausweichen, und da dies am leichtesten nach oben möglich ist, so entsteht rings um den Störungsmittelpunkt ein Wellenberg. Durch den Einfluß der Schwere sinken aber die gehobenen Wasserteilchen wieder zurück, sogar unter das Niveau, ebenso wie ein Pendel nach einem Ausschlag über den Ruhepunkt nach der anderen Seite hinausgeht. Dort, wo eben ein Wellenberg war, entsteht somit jetzt ein Wellental. Die dadurch verdrängten Teilchen bilden wieder, wie zuerst, um das Wellental einen kreisförmigen Wellenberg, und so setzt sich das Spiel fort, bis endlich die Welle erlischt resp. durch ein Hindernis vernichtet wird. Schon aus dieser Beschreibung geht hervor, daß bei der Wellenbewegung nicht die Wassermasse selbst horizontal verschoben wird, wie es zuerst scheinen könnte. Ein einfacher Versuch bestätigt das: Ein Stückchen Holz nämlich, das auf dem Wasser schwimmt, bleibt ruhig auf derselben Stelle, während die Wellen unter ihm fortschreiten. Genauere Aufschlüsse gaben die Untersuchungen der Gebrüder WEBER. Sie zeigten, daß die einzelnen Wasserteilchen kleine Kurven beschreiben, gewöhnlich Kreise oder Ellipsen. Fig. 53 zeigt, wie dadurch eine Wellenbewegung zustande kommt. Es stellen I—IX benachbarte Wasserteilchen im Stadium der Ruhe vor. Wenn nun I eine Schwingung (Oszillation¹) ausführt, werden auch die andern Teilchen, z. B. bis VIII, dazu veranlaßt, nur daß jedes folgende immer etwas später damit beginnt. In Fig. 53 ist nun der Fall dargestellt, daß I eben eine ganze Schwingung

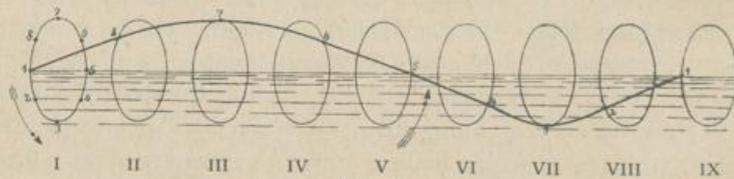


Fig. 53.

in der Richtung des Pfeils vollendet hat, also sich in Punkt 1 seiner Bahn befindet. Dann ist II noch nicht so weit, sondern erst in 8, III in 7 usw. Verbindet man die Stellung der einzelnen Teilchen, so resultiert eine Wellenlinie, und zwar stellt der Teil derselben

¹ *oscillo* sich schaukeln.

zwischen I und V den Wellenberg, zwischen V und IX das Wellental vor. Selbstverständlich gilt diese graphische Darstellung der Welle nur für einen Augenblick; im nächsten Moment werden ja die Teilchen eine andere Stellung einnehmen, die Welle wird fortschreiten. Auch ist natürlich die hier gewählte Zahl der zu einer Welle gehörenden Wasserteilchen ganz willkürlich. Die Strecke I—IX heißt nun Wellenlänge; mit anderen Worten, es ist diejenige Strecke, um die sich die Wellenbewegung fortpflanzt, während Teilchen I eine ganze Oszillation ausführt. Denn wenn I nach Punkt 2 seiner Bahn kommt, fängt II an zu schwingen, kommt z. B. I nach Punkt 4, so fängt IV an zu schwingen, und wenn schließlich I am Ende seiner Oszillation ist, so beginnt IX seine Bewegung. Während einer ganzen Schwingung von I hat sich also die Wellenbewegung bis IX fortbewegt, und diese Strecke heißt eben Wellenlänge. Man nennt nun (wie beim Pendel) die Entfernung eines Teilchens aus der Ruhelage während einer Oszillation seine Schwingungsweite, Elongation oder Amplitude². Die Zeit, welche ein Teilchen zu einer ganzen Schwingung braucht, also nach obigem auch die Zeit, in der die Wellenbewegung um eine Wellenlänge fortschreitet, heißt Schwingungszeit. Unter Phase versteht man den Bewegungszustand eines Teilchens, der charakterisiert ist durch seine Elongation und seine Bewegungsrichtung. Letztere ist deshalb wichtig, weil ja bei gleicher Elongation das Teilchen einmal im Wellenberg, das andere Mal im Wellental liegen bzw. bei geradliniger Schwingung denselben Punkt einmal in der Richtung von unten nach oben, das andere Mal von oben nach unten passieren kann. Im ersten Falle hat das Teilchen positive, im letzten negative Phase; die Phasen sind also dann entgegengesetzt. Aus Fig. 53 geht nun hervor, daß Teilchen, welche um eine ganze Wellenlänge (z. B. I und IX) oder überhaupt um eine gerade Zahl von halben Wellenlängen voneinander entfernt sind, stets dieselbe Phase haben müssen. Teilchen dagegen, die voneinander um eine halbe oder überhaupt um eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen abstehen, besitzen stets entgegengesetzte Phase.

§ 58. **Wellen durch Elastizität.** Während die Wellen an der Oberfläche des Wassers auf die Schwerkraft zurückzuführen sind, beruhen andere auf den anziehenden Kräften und der Elastizität der kleinsten Teilchen. Im übrigen sind die Verhältnisse ähnlich den oben beschriebenen. Also auch hier kommt die Wellenbewegung durch Schwingungen (Oszillationen) kleinster Teilchen zustande.

² Im engeren Sinne versteht man unter Elongation (von *elongo* sich entfernen) einen beliebigen, unter Amplitude (*amplitudo* Weite) den größten A_1 stand von der Ruhelage.

§ 59. **Transversale Wellen**, zu denen z. B. die beschriebenen Oberflächenwellen des Wassers, ferner die Licht- und Seilwellen gehören, sind solche, bei denen die kleinsten Teilchen senkrecht zur Fortpflanzungseinrichtung der Welle oszillieren. Hierbei beschreiben sie entweder Kreise oder Ellipsen oder schwingen geradlinig auf und ab. Letztere Form der Bewegung ist offenbar nur ein Spezialfall der ersteren, indem der Querdurchmesser der Kurve 0 wird.

§ 60. **Longitudinalwellen**, zu denen z. B. die Schallwellen gehören, entstehen durch Schwingungen der Teilchen in der Fortpflanzungsrichtung der Wellenbewegung. Sie sind also keine Wellen im gewöhnlichen Sinne; denn bei ihnen gibt es keine Wellenberge und -täler, sondern es entstehen abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen des Mediums. Hierzu gehören z. B. auch die durch den Wind in einem Kornfeld hervorgerufenen Bewegungen. Zur Veranschaulichung stelle man sich vor, daß in einer Reihe hintereinanderstehender Knaben, von denen jeder seine Hände auf die Schultern des Vordermannes gelegt hat, der hinterste einen Stoß nach vorn bekommt. Dann macht er natürlich eine Bewegung nach vorn, die sich der Reihe nach auf die vor ihm Stehenden überträgt. Während aber alle infolge des Widerstandes der Vordermänner sich wieder aufrichten, kann dies der Vorderste in der Reihe nicht und fällt hin. So hat sich also der Impuls durch die ganze Reihe fortgepflanzt, und die Wirkung ist die gleiche, wie wenn der Vorderste den Stoß direkt erhalten hätte. Insofern kann man auch hier von einer Wellenbewegung sprechen.

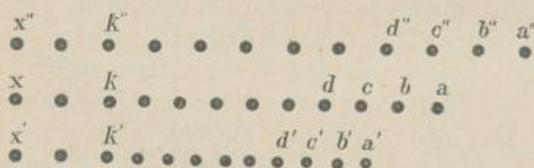


Fig. 54.

An Stelle der Armmuskeln in diesem Beispiel ist in der Natur die Elastizität des Mediums wirksam. In

Fig. 54 stelle z. B. die mittlere Reihe eine Anzahl

von Luftmolekülen im Ruhezustande dar. Durch einen Impuls werde a nach links verschoben, so daß es die Stellung a' (unterste Reihe) einnimmt. Durch seine Bewegung wirkt es aber auch auf b , das nach b' kommen wird, dieses wieder auf c usw. Kurz, in der Zeit, während a nach a' gelangt, wird sich die Bewegung nach links eine bestimmte Strecke fortpflanzen, z. B. bis k . Diese Strecke wird um so größer sein, je größer die Elastizität zwischen den Teilchen ist (in unserem obigen Beispiel, je straffer die Armmuskeln gespannt sind). Innerhalb der Strecke $a'k'$ muß also eine Verdichtung gegen vorher bestehen. Wird anderseits a nach rechts verschoben, etwa bis a'' (oberste Reihe), so muß auch b nach b'' gehen, da nun die elastische Kraft zwischen b und c größer als die zwischen b und a ist. Diese Be-

wegung nach rechts, die sich wieder entsprechend der Elastizität des Mediums eine gewisse Strecke in der Richtung $a''x''$ etwa bis k'' fortpflanzen wird, bedingt eine Verdünnung. Sowohl die Verdichtung wie die Verdünnung machen natürlich nicht Halt in k' bzw. k'' , sondern schreiten weiter fort. Bei jeder longitudinalen Wellenbewegung wechseln nun solche Verdichtungen und Verdünnungen beständig miteinander ab; denn jede Pendelbewegung — und das sind ja eben die Bewegungen der kleinsten Teilchen — geht nach zwei Richtungen. Die Strecke, um welche sich die (Verdichtungs- oder Verdünnungs-) Bewegung fortpflanzt, während ein Teilchen eine ganze Pendelschwingung ausführt, heißt wiederum Wellenlänge. Man kann auch sagen, daß eine Verdichtung und eine Verdünnung zusammen eine Wellenlänge ergeben. Trotz der verschiedenen Bewegung ist also das Wesen der Longitudinal- und Transversalwellen gleich; letztere werden daher aus Bequemlichkeit auch benutzt, um erstere graphisch darzustellen.

§ 61. **Fortpflanzungsgeschwindigkeit.** Für beide Arten der Wellenbewegung gelten folgende Sätze über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit (v): Bezeichnet λ die Wellenlänge, n die Schwingungszahl, d. h. die Zahl, welche angibt, wie oft ein Teilchen in 1 Sekunde schwingt, so ist:

$$v = n \lambda.$$

Denn jeder ganzen Schwingung eines Teilchens entspricht das Fortschreiten der Bewegung um eine Wellenlänge. Bedeutet T die Schwingungszeit eines Teilchens, so ist $n = \frac{1}{T}$ und somit auch

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Aus diesen Gleichungen folgt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ganz unabhängig von der Amplitude ist.

Es ist nun zweckmäßig, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch durch die Elastizität des Mediums auszudrücken, die, wie erwähnt, eine große Rolle spielt. Bezeichnet man dieselbe (bzw. den Elastizitätsmodul) mit e , die Dichtigkeit des Mediums mit d , so ist nach NEWTON:

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

Dichte und Elastizität dürfen nicht miteinander verwechselt werden. Je dichter ein Körper ist, desto schwerer können seine Teilchen gegeneinander verschoben werden, je größer seine Elastizität ist, um so schneller wird eine Gleichgewichtsstörung fortgepflanzt [§ 60]. Der hypothetische Äther besitzt sehr große Elastizität / außer-

ordentlich geringe Dichte; daher pflanzt sich in ihm das Licht so schnell fort.

§ 62. **Huygenssches Prinzip. Beugung.** Bisher wurde angenommen, daß die Wellenbewegung vom Störungszentrum aus in Form einfacher konzentrischer Kugelwellen vor sich geht. Da hierdurch manche Erscheinungen nicht erklärt werden, stellte HUYGENS die Hypothese auf, daß jeder Punkt einer Welle ebenso als Zentrum einer neuen Wellenbewegung betrachtet werden muß, wie der

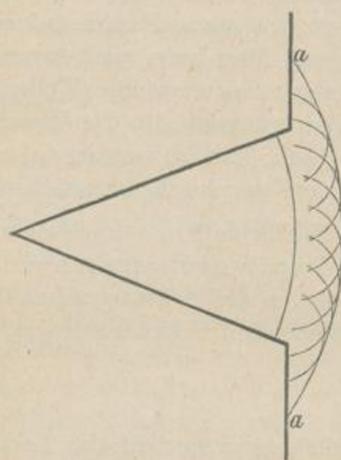


Fig. 55.

ursprüngliche Störungsmittelpunkt. Anders ausgedrückt, von jedem Punkte einer Welle gehen ebenfalls (Elementar-) Kugelwellen aus. Für gewöhnlich, in homogenen Medien, heben sich allerdings diese Elementarwellen auf, so daß eine einzige große Kugelwelle resultiert (Fig. 55). Kann sich aber die Wellenbewegung nicht gleichmäßig nach allen Seiten fortpflanzen, geht sie z. B. durch einen engen Spalt, so kommt das HUYGENSSCHE Prinzip zur Geltung. So wird verständlich, daß auch die Punkte *a* erregt werden, zu denen die Welle nicht direkt kommen kann. Sie werden nämlich, natürlich in schwächerem Maße, von den Elementarwellen getroffen. Diese Erscheinung heißt Beugung oder Diffraktion, da ja gewissermaßen der Schall und das Licht um die Ecke herum gebeugt wird.

§ 63. **Reflexion und Refraktion.** Gelangt eine Welle an ein Medium von anderer Dichte, so wird ein Teil von ihr ins alte Medium zurückgeworfen (reflektiert), der andere geht ins neue Medium und erfährt dabei eine Richtungsänderung (Brechung, Refraktion). Ist

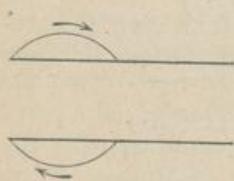


Fig. 56.

das neue Medium unendlich mal dichter, so ist die reflektierte Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben, sie hat also entgegengesetzte Phase. Mit anderen Worten, wenn die Welle als Wellental ankommt, beginnt sie den Rückweg als Wellenberg (Fig. 56). Ist das neue Medium unendlich mal dünner, so

findet keine Phasenveränderung statt. Zwischen diesen beiden Extremen existieren Übergänge, wo also die Phasendifferenz den Bruchteil einer halben Wellenlänge beträgt. Diese Verhältnisse sind ähnlich den Vorgängen beim Anprall einer elastischen Kugel gegen eine an-

dere in Ruhe befindliche. Ist letztere größer (also dem dichteren Medium vergleichbar), so prallt die erste Kugel nach der entgegengesetzten Seite, ist jene aber kleiner, so behält die erste ihre Richtung bei.

Es stelle nun (Fig. 57) df einen so kleinen Teil einer Kugelwelle dar, daß er als eben, die vom Störungszentrum dorthin gezogenen Verbindungslinien, die Wellenstrahlen, als parallel betrachtet werden können. Schreitet die Welle in der Richtung des Pfeiles vor, so stößt zuerst Strahl a in d auf die Grenzschicht MN . Während die Hauptwelle von j nach h vorschreitet, gehen nach dem HUYGENSschen Prinzip von d aus Elementarwellen nach beiden Medien, deren Radien (dr und dl) sich verhalten wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in diesen Medien. dr muß natürlich $= fh$ sein, da ja in demselben Medium die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich ist. In derselben Zeit schreitet die Bewegung im mittleren Strahl b von e nach g und von hier in die beiden Medien bis nach s und m vor. Entsprechend verhält es sich mit den anderen unendlich vielen Strahlen zwischen a und c . Aus allen diesen Elementarwellen entsteht

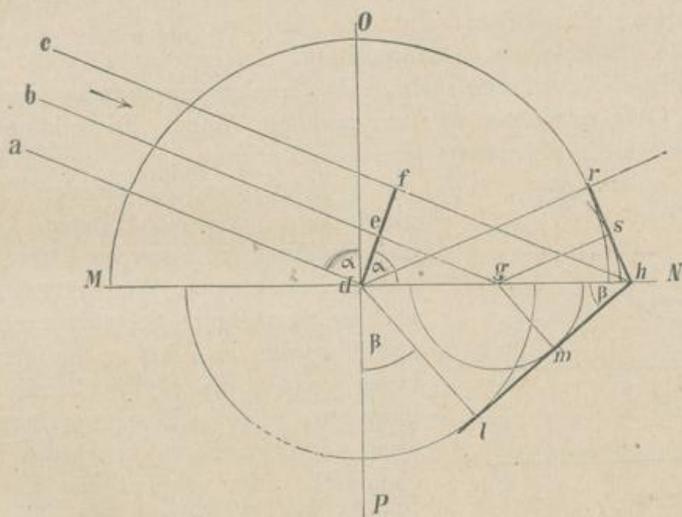


Fig. 57.

nun die reflektierte und die gebrochene Welle, dargestellt in der Figur durch die von h aus an die verschiedenen Elementarwellen gelegten gemeinsamen Tangenten hr und hl . Die Senkrechten auf letzteren sind dann die reflektierten bzw. gebrochenen Strahlen. Errichtet man nun dort, wo die „Einfallstrahlen“ an das neue Medium stoßen, eine Senkrechte, das „Einfallslot“ OP , so heißt $\angle adO$ „Einfallswinkel“ (α); er ist gleich $\angle Odr$, dem „Reflexionswinkel“. Es ist nämlich $\angle adM = \angle fhd$ als Gegenwinkel zwischen Parallelen. Da die Dreiecke djh und djh kongruent sind (beide sind rechtwinklig, haben dh gemeinsam, und $dr = fh$, wie oben erwähnt), ist auch $\angle rdh = fhd$. Folglich $\angle adM = \angle rdh$; somit sind auch ihre Ergänzungen zu einem Rechten gleich, $\angle adO = rdO$. $\angle Pdl$ heißt Brechungswinkel (β). Es ist nun auch $\angle fdh = \alpha$, weil er $\angle fhd$ zu einem Rechten ergänzt (ebenso wie $\angle adO$ den $\angle adM$). Ferner ist $\angle dh l = \beta$, weil er (ebenso wie

$\angle Pdl$ den $\angle hdl$ zu einem Rechten ergänzt. Also $\sin \alpha = \frac{fh}{dh}$, $\sin \beta = \frac{dl}{dh}$. Folglich $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{fh}{dl}$. Da letzteres Verhältnis nur von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung, nicht aber von der Größe der Winkel abhängt, so ist es für zwei bestimmte Medien stets unveränderlich. Man schreibt daher auch $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$. [Vgl. § 116.]

Die so gewonnenen Gesetze heißen also:

- 1) Einfallstrahl, Einfallslot, reflektierter und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.
- 2) Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel.
- 3) Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels für je zwei Medien in einem konstanten Verhältnis, das unabhängig ist von der Größe der Winkel, dagegen identisch ist mit dem Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den beiden Medien.

§ 64. **Interferenz. Superposition.** Interferenz¹ heißt die Erscheinung, daß zwei oder mehrere Wellenzüge miteinander zusammentreffen. Wir betrachten hier nur parallele Wellen. Diese können entweder gleiche oder entgegengesetzte Richtung haben, ferner können

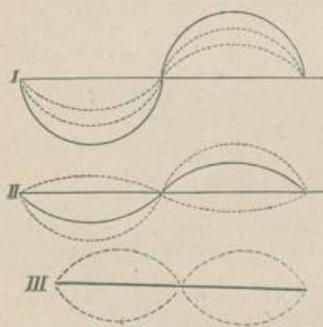


Fig. 58.

die Wellenlängen, Amplituden, Phasen, gleich oder verschieden sein. Immer gilt das Gesetz von der Superposition² kleiner Bewegungen. Wenn einem Punkte gleichzeitig mehrere Schwingungsimpulse erteilt werden, so führt er die ihrer algebraischen Summe entsprechende Bewegung aus. Gleiche Phasen addieren sich also, entgegengesetzt gerichtete schwächen sich. Man erkennt dies leicht aus Fig. 58, wo die gestrichelten Linien die ursprünglichen Wellen, die ausgezogenen

die resultierenden vorstellen. III zeigt die interessante Tatsache, daß zwei Wellenbewegungen einander nicht nur schwächen, sondern sogar ganz aufheben können. Dies ist stets der Fall, wenn zwei Wellen von gleicher Wellenlänge und Amplitude um eine halbe Wellenlänge differieren, d. h. also genau entgegengesetzte Phase haben. Wie durch Superposition mehrerer Wellen neue Wellenformen entstehen, so lassen sich andererseits alle komplizierten Wellenformen in einfache pendelartige Schwingungen zerlegen (FOURIERSCHER SATZ).

§ 65. **Stehende Schwingungen.** Die Figuren 53—58 geben alle die betreffende Wellenform nur während eines Augenblicks wieder.

¹ *interfero* dazwischentragen. — ² *superpono* darüberstellen.

Im nächsten schon muß sie sich verschieben, weil zwei benachbarte Teilchen stets verschiedene Phasen haben. Mit einem Worte, bisher war nur die Rede von fortschreitenden Wellen. Wenn dagegen ein an einem Ende befestigter Stab schwingt, so vollführen seine Teilchen stets stehende Schwingungen, d. h. sie bewegen sich gleichmäßig und isochron nach derselben Richtung: Solche stehende Schwingungen können auch dadurch entstehen, daß zwei Wellen von gleicher Wellenlänge und Amplitude gegeneinanderlaufen. Zum besseren Verständnis betrachten wir zunächst Seilwellen. Ist das Seil an einem Ende befestigt, und wird das freie Ende geschüttelt, so entstehen transversale Wellen, die bis zum befestigten Ende laufen; dort werden sie so reflektiert [vgl. § 63], daß sie den Rückweg mit entgegengesetzter Phase beginnen. Wenn nun diese reflektierten Wellen mit den ankommenden interferieren, so finden an gewissen Stellen, den Knotenpunkten, gar keine Schwingungen statt; die dazwischen liegenden Strecken, die Schwingungsbäuche, bewegen sich dafür um so mehr. Die Schwingungsrichtung der Teilchen zwischen zwei Knoten ist immer gleich, so daß die Wellenberge und -täler nicht fortschreiten, sondern auf derselben Stelle miteinander abwechseln; es handelt sich hier also um stehende Wellen. Es stelle z. B. Fig. 59 ein Stück dieses Seiles vor, dessen Enden nicht gezeichnet sind. Die punktierten Linien bedeuten die ankommenden, die gestrichelten die reflektierten, die ausgezogenen die resultierenden Wellen. I zeigt den Fall, daß die

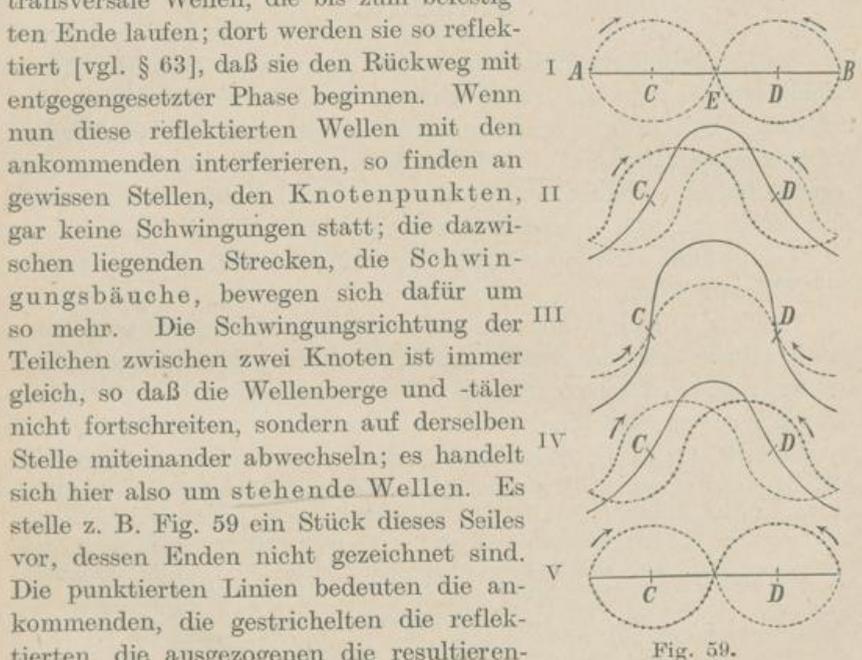


Fig. 59.

Phasen genau entgegengesetzt sind. Die Folge ist, daß eine gerade Linie resultiert, d. h. die Wellenbewegungen heben sich auf. In II ist die ankommende Welle um $\frac{1}{8}$ Wellenlänge nach rechts vorgeschritten, die reflektierte um ebensoviel nach links. Es resultiert die ausgezogene Wellenform. Man sieht, daß die Knotenpunkte *C* und *D* in Ruhe geblieben sind, daß dagegen *E* eine erhebliche Exkursion gemacht hat. In III ist die Verschiebung nach rechts bzw. links wieder um $\frac{1}{8}$ Wellenlänge weitergegangen. Die Knotenpunkte sind wiederum unverändert; die Exkursion des Bauches hat ihr Maximum erreicht. In IV geht sie wieder zurück, und in V ist der Zustand von I erreicht, aber in entgegengesetzter Richtung. Denn nun würde,

was nicht mehr gezeichnet ist, die Bewegung des Wellenbauches nach unten vor sich gehen. Immer also schwingen nur die Bäuche, die Knoten bleiben in Ruhe. Was für Seilwellen gilt, ist bei allen andern Wellen (einschließlich der longitudinalen) auch der Fall. Diese Verhältnisse lassen auch eine Umkehrung zu: wenn irgendwelche Stellen oszillierender Körper am Schwingen gehindert werden, so bilden sich daselbst Knotenpunkte.

Akustik.

§ 66. **Definition.** Akustik¹ ist die Lehre vom Schall. Unter Schall versteht man alle Schwingungen von Körpern, die durch Vermittlung der Luft oder eines anderen Mediums von dem Gehörorgan wahrgenommen werden. Sind die Schwingungen ungleich und unregelmäßig, so entsteht ein Geräusch (z. B. Knall, Krach usw.); sind sie gleich und regelmäßig, so entsteht ein Ton.

§ 67. **Töne** sind charakterisiert durch ihre Höhe, Intensität und Klangfarbe.

1) Die Höhe eines Tones hängt von der Anzahl der Schwingungen der Tonquelle ab. Je größer die Schwingungszahl ist, desto höher ist der Ton. Hält man z. B. ein Kartenblatt gegen ein rotierendes Zahnrad, so entsteht ein Ton, der um so höher ist, je schneller sich das Rad dreht, d. h. je mehr Stöße in der umgebenden Luft entstehen.

Die Schwingungszahl findet man z. B. mittels der Sirene² von CAGNIARD DE LA TOUR. Durch Rohr *B* (Fig. 60) kommt aus einem Blasebalg Luft in die Trommel *T*, deren Deckel einen oder mehrere Kreise von schräg gebohrten Löchern enthält. Auf diese Löcher passen genau Löcher der beweglichen Scheibe

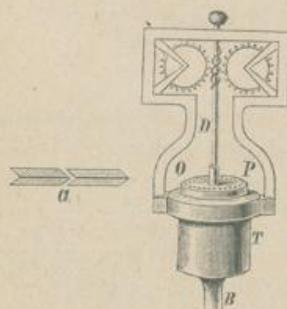


Fig. 60.

OP, die aber in entgegengesetzter Richtung schief gebohrt sind. Diese Anordnung erhält aus Fig. 56 *a* und ist der Grund, daß sich die Scheibe *OP* beim Anblasen der Sirene nach dem Prinzip des SEGNERschen Wasserrades drehen muß. Mit der Scheibe dreht sich aber zugleich die Achse *D*, die oben eine Schraube trägt. Durch diese wird die Bewegung auf Zahnräder übertragen und schließlich durch ein Uhrwerk registriert. Durch die Drehung wird bewirkt, daß die Luft stoßweise durchtritt, nämlich immer nur, wenn die Löcher der Scheibe über denen des Deckels sind. Es entstehen also Stöße in der umgebenden Luft, und zwar während einer Umdrehung so viel, wie Löcher vorhanden sind.

¹ ἀκουστική das Gehör betreffend. — ² nach den Sirenen der griechischen Sage, welche durch ihren Gesang vorbeifahrende Schiffer anlockten.

Die Anzahl der Löcher multipliziert mit der Zahl der Umdrehungen in 1 Sekunde ergibt daher die Schwingungszahl. Die Schwingungszahl einer beliebigen Tonquelle findet man, indem man die Sirene so anbläst, daß sie denselben Ton gibt.

Vibrograph nennt man eine Vorrichtung, bei der der tönende Körper, z. B. eine Stimmgabel, durch eine an ihm befestigte Feder seine Schwingungen selbsttätig auf einen beruhten Zylinder aufschreibt, der sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit senkrecht zur Schwingungsrichtung vorbeidreht. Aus der entstehenden Wellenlinie ergibt sich, wenn zugleich die Zeit markiert wird, sofort die Schwingungszahl.

2) Die Intensität (Stärke) eines Tones hängt ab von der kinetischen Energie, mit der die Enden der Hörnerven getroffen werden. Sie ist also proportional dem Quadrate der Schwingungsgeschwindigkeit, bzw. dem Quadrate der Amplitude. Ferner ist die Intensität umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung von der Schallquelle [vgl. § 56]. Dies gilt natürlich nur, wenn sich der Schall allseitig ausbreiten kann. In Röhren z. B. ist die Intensität viel größer; darauf beruht ja das Sprach- und Hörrohr. Ebenso wird der Schall längs eines ausgespannten Drahtes oder Fadens weiter übertragen als durch die Luft („Fadentelephon“). Auch die Dichte des Mediums, in dem der Schall entsteht resp. sich fortpflanzt, beeinflußt seine Stärke. Im Vakuum wird überhaupt kein Ton gehört, und Schüsse auf hohen Bergen klingen nur schwach.

3) Die Klangfarbe verleiht dem Tone die Individualität. Durch sie wird erkannt, von welchem Instrumente ein gleichhoher Ton stammt. Nach HELMHOLTZ beruht sie darauf, daß ein Ton gewöhnlich nicht isoliert erklingt, sondern zusammen mit verschiedenen seiner Obertöne [§ 68], wodurch eben nach dem Gesetz der Superposition der eigentümliche Klang entsteht, graphisch dargestellt durch die Form der Wellenlinie.

Beim Phonographen von EDISON wird eine feste Reproduktion der Schwingungsform des Klanges dadurch erzielt, daß in der Mitte einer dünnen Membran, die durch die menschliche Stimme oder eine andere Tonquelle in Schwingungen versetzt wird, ein harter Stift befestigt ist, der diese Schwingungen auf eine sich vorüber bewegende Wachswalze eingräbt. Dreht man dann die beschriebene Wachswalze wieder an dem Stift vorbei, so gerät dieser und die Membran in entsprechende Schwingungen, so daß die vorher in den Apparat gesprochenen Töne jetzt reproduziert werden. — Ähnlich ist das Grammophon von BERLINER, bei dem die Schallwellen auf eine Metallplatte aufgezeichnet werden. Die so erhaltenen spiralförmigen Wellenlinien werden dann eingätzt. Solche Platten können beliebig vervielfältigt werden.

§ 68. **Tonverhältnisse.** Das menschliche Ohr kann Töne wahrnehmen, deren Schwingungszahlen zwischen 16 und 20000 liegen. Musikalisch verwendbar sind aber nur solche mit Schwingungszahlen zwischen 40 und 5000. Indes werden nicht sämtliche Töne innerhalb dieser Grenzen benutzt, sondern es wird unter ihnen eine Auswahl getroffen, die von den Intervallen abhängt.

Unter Intervall zweier Töne versteht man den Unterschied in ihrer Höhe, ausgedrückt durch das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen. Die einfachsten Intervalle sind die zwischen einem (beliebigen) Grundton und seinen harmonischen Obertönen, deren Schwingungszahlen nämlich 2, 3, 4 usw. mal so groß wie die des Grundtons sind. Harmonisch heißen diese Obertöne, da ihr Zusammenklingen mit dem Grundton angenehm wirkt [vgl. § 75]. Verhalten sich die Schwingungszahlen wie 2:1, so heißt das Intervall Oktave. Die Oktave eines Tones von 3000 Schwingungen ist demnach ein Ton von 6000 Schwingungen. Teilt man nun eine Oktave in 8 Intervalle von möglichst einfachen Zahlenverhältnissen, so erhält man die diatonische¹ Tonleiter:

Prime	Sekunde	Terz	Quarte	Quinte	Sexte	Septime	Oktave
1:1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1

Je einfacher nun das Verhältnis der Schwingungszahlen ist, desto angenehmer klingt ein Akkord. Am angenehmsten klingt also Grundton mit Oktave (1:2). Der zweite Oberton steht zum Grundton im Verhältnis 3:1, anders geschrieben $\frac{3}{2} \cdot 2:1$; er ist also die Quinte der ersten Oktave; der dritte Oberton (4:1) ist die zweite Oktave; der vierte Oberton (5:1 resp. $\frac{5}{4} \cdot 4:1$) ist die Terz der zweiten Oktave usw. Dem entspricht, daß nächst der Oktave die Quinte und Terz mit dem Grundton zusammen am besten klingen. Wie leicht auszurechnen, sind die einzelnen Intervalle der diatonischen Tonleiter ungleich. Hauptsächlich kommt das Intervall $\frac{9}{8}$ und $\frac{10}{15}$ vor; ersteres heißt ein ganzer Ton, letzteres ein halber. Um nun jeden beliebigen Ton als Grundton verwerten zu können, schaltete man zwischen die ganzen Töne noch halbe ein. So entstand die chromatische Tonleiter, die vom Grundton bis zur Quinte 7, bis zur Oktave 12 halbe Töne enthält. Wie eine einfache Rechnung lehrt, kann sie aber nie ganz rein sein. Bei der chromatischen Tonleiter, z. B. auf dem Klavier, kommt man nämlich durch 12 Quinten auf die siebente Oktave. In Wahrheit beträgt nun das Intervall von 7 Oktaven $2^7 = 128$, das Intervall von 12 Quinten $(\frac{3}{2})^{12} = 129,74$. Es ist also eine Differenz vorhanden. Wenn die Oktaven ganz rein sind, müssen die Quinten

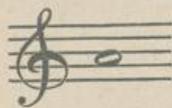


Fig. 61.

unrein sein, und umgekehrt. Derartige Widersprüche gibt es bei der chromatischen Tonleiter noch mehr. Zu ihrer Beseitigung müßte sie mehr als 12 Töne enthalten. Da dies für gewöhnlich nicht angeht, korrigiert man den Fehler durch Änderung der Intervalle innerhalb einer Oktave und nennt dies Temperatur². Die Temperatur ist gleichschwebend, wenn die Oktaven selbst

¹ *διὰ τὸν ὅλον γένος* hieß die einfachste Aufeinanderfolge der Töne in der Tonleiter. — ² *tempero*, mischen, ordnen.

alle rein sind und der Fehler gleichmäßig auf alle zwischenliegenden Töne verteilt ist, so daß nun alle genau dasselbe Intervall haben. Dieses ist leicht aus der Gleichung $x^{12} = 2$ zu finden, da ja das Intervall x , 12mal mit sich selbst multipliziert, die Oktave ergeben muß. Also $x = \sqrt[12]{2}$. Eine nähere Betrachtung zeigt, daß die temperierten Intervalle nur wenig von den reinen differieren. Als Grundton der Stimmung wird das eingestrichene a (Fig. 61), der sog. Kammerton, benutzt, dessen Schwingungszahl nach internationaler Abmachung 435 beträgt.

§ 69. **Entstehung der Töne.** Als Tonquellen dienen Körper, die leicht in Schwingungen versetzt werden können, also besonders feste und luftförmige. Die Schwingungen können sowohl transversale wie longitudinale sein, stets aber werden sie an den Grenzen des Körpers reflektiert, so daß sich stehende Schwingungen (§ 65) bilden. Töne entstehen also durch stehende Schwingungen geeigneter Körper. Die Knotenpunkte sind immer an den Stellen, die am Schwingen verhindert sind, also z. B. immer an den Enden der Körper, wenn diese befestigt sind. Ein Körper kann nun in verschiedener Weise schwingen, so daß die Zahl der Knotenpunkte variabel ist; schwingt er so, daß die Zahl der stehenden Schwingungen möglichst gering, die Schwingungsdauer der einzelnen Teilchen also möglichst groß ist, so entsteht sein Grundton.

Auf Saiten werden Töne meist durch transversale Schwingungen erzeugt, die man durch Streichen mit einem Bogen, Zupfen, Anschlagen mit einem Hammer usw. hervorruft. Zum Studium der Tonverhältnisse hierbei dient das Monochord, eine über einem Kasten durch Gewichte ausgespannte Saite, bei der durch einen beweglichen Steg die Länge des schwingenden Teils beliebig verändert werden kann. So fand man, daß die Schwingungszahl einer Saite, mit anderen Worten die Tonhöhe, umgekehrt proportional ihrer Länge und Dicke, dagegen proportional der Quadratwurzel der Spannung ist. Eine Saite kann aber nicht nur als Ganzes

schwingen, sondern auch in aliquoten Teilen. Stellt man z. B. in der Mitte einen Knotenpunkt durch Aufsetzen des Fingers her, so entstehen 2 Bäuche (Fig. 62), deren jeder nach

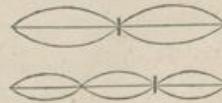


Fig. 62.

obigem Gesetz doppelt soviel Schwingungen macht, wie die ganze Saite; es entsteht also die Oktave des Grundtons. Schwingt die Saite mit drei Bäuchen, so entsteht der dritte Oberton usw. Die Knotenpunkte weist man durch Papierreiterchen nach, die nämlich an allen andern Stellen der Saite heruntergeschleudert werden.

Elastische Stäbe werden durch transversale (seltener longitudinale) Schwingungen zum Tönen gebracht. Am wichtigsten ist

die Stimmgabel, ein U förmig gebogener Stahlstab mit zwei parallelen Schenkeln (Zinken). Am einfachsten schwingt sie mit zwei Knotenpunkten, die dicht aneinander liegen, und zwar so, daß beide Zinken zusammen entweder nach innen oder nach außen schwingen (Fig. 63).

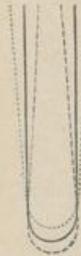


Fig. 63.

Auch Platten, Glocken und gespannte Membranen können durch (transversale) Schwingungen Töne geben. Hier sind die verschiedenen Knotenpunkte zu Knotenlinien verbunden. Bestreut man daher Platten mit einem feinen Pulver, so bleibt es nur an den nicht schwingenden Stellen, den Knotenlinien, liegen, und es entstehen die CHLADNISCHEN Klangfiguren.

Vielfach werden auch Luftsäulen als Tonquellen benutzt, die in stehende longitudinale Schwingungen versetzt werden. Bei den Pfeifen geschieht dies durch Anblasen.

a) Bei den Lippenpfeifen (Fig. 64), zu denen die Querpfeifen und meisten Orgelpfeifen gehören, dringt die durch *c* eingeblasene Luft durch einen schmalen Spalt *a* und stößt dann auf eine scharfe Kante, die „Lippe“, *b*; ein Teil von ihr geht nach dem Pfeifenrohr *p* und wird hier am oberen Ende reflektiert, so daß eben stehende Longitudinalwellen (Verdichtungen und Verdünnungen) und somit Töne entstehen [vgl. § 70]. Dasjenige Ende einer Pfeife, an dem sie angeblasen wird, ist natürlich immer offen. Je nachdem auch das andere Ende offen oder geschlossen ist, spricht man von offenen und gedeckten (gedackten) Pfeifen. Auch bei offenen Pfeifen kommt es am oberen Ende zu einer Reflexion, somit zur Bildung stehender Wellen, da zwischen der Luft in der Pfeife und der freien Luft ein Dichtigkeitsunterschied vorhanden ist [§ 63]. Die Tonhöhe ist der Länge der Pfeifen umgekehrt proportional. Da nun an dem verschlossenen Ende einer Röhre stets ein Knotenpunkt [§ 69], am offenen Ende ein Schwingungsbauch sein muß, hat bei der einfachsten Schwingungsart eine offene Pfeife in der Mitte einen Knoten, eine gedeckte Pfeife am geschlossenen Ende einen Knoten, am offenen einen Bauch. Man kann sich also eine offene Pfeife aus zwei gedeckten Pfeifen von der halben Länge zusammengesetzt denken (Fig. 65).



Fig. 64.



Fig. 65. (d. h. den bei einfachster Schwingungsart entstehenden tiefsten Ton) geben soll wie eine offene Pfeife, muß halb so lang sein wie diese; oder anders ausgedrückt, der tiefste Ton einer offenen Pfeife ist die Oktave des Grundtons einer ebenso langen gedeckten Pfeife. Durch stärkeres Anblasen geben Pfeifen auch die

Obertöne des Grundtons an, und zwar die offenen alle, die gedeckten nur die ungeraden Obertöne.

b) Die Zungenpfeifen besitzen statt der Lippe ein federndes Blättchen, die „Zunge“ (z, Fig. 66), meist aus Metall. Die bei *c* eingeblasene Luft gelangt hier in Richtung der Pfeile durch den engen Spalt neben dieser Zunge ins Zungenrohr *r*, dann ins Pfeifenrohr *p*. Hierdurch gerät die Zunge in periodische Schwingungen, welche die Luftsäule in der Pfeife zum Mittönen veranlassen [§ 70]. Außer diesen federnden Metallzungen gibt es auch membranöse Zungen, bei denen zwei membranöse Platten einen zwischen ihnen befindlichen schmalen Spalt durch ihre Schwingungen abwechselnd öffnen und schließen. Hierzu gehören z. B. die Stimmbänder des Kehlkopfes; aber auch die Lippen des Mundes können so wirken, wenn man sie fest schließt und dann Luft durchpreßt (beim Blasen von Trompeten, Posaunen usw.).



Fig. 66.

Man kann auch die Luft in einer offenen Röhre zum Tönen bringen, wenn man die Röhre über eine Flamme, am besten von Wasserstoff, hält (sog. singende Flammen oder chemische Harmonika) [vgl. § 70]. Hierbei sei bemerkt, daß Flammen ein feines Reagens auf Schallschwingungen sind. Besonders wenn sie unter Druck stehen, (z. B. Gasflammen), hüpfen sie, wenn (hohe) Töne und Geräusche in der Nähe erklingen (sensible Flammen).

§ 70. **Mittönen und Resonanz.** Bringt man in die Nähe einer tönenden Stimmgabel eine ruhende, die auf denselben Ton abgestimmt ist, so ertönt auch diese, selbst nachdem die erste aufgehört hat. Ebenso erklingt, wenn man gegen die Tasten eines Klaviers singt, der betreffende Ton spontan mit. Dieses Mittönen, auch auswählende Resonanz¹ genannt, ist eine Eigenschaft aller tönenden Körper und beruht darauf, daß ihre Moleküle durch diejenige Art der Bewegung am leichtesten zur Mitbewegung veranlaßt werden, die bei ihnen gewissermaßen präformiert ist. Um einen Vergleich zu gebrauchen, so kann auch ein Knabe schwere Kirchenglocken in Gang bringen, wenn er an dem Stricke immer in der Richtung zieht, welche die Glocke schon von selbst einzuschlagen im Begriff ist [vgl. auch § 213]. Auf diesem Prinzip des Mittönens beruhen auch die Pfeifen und singenden Flammen. An der Lippe und Zunge der Pfeifen nämlich, sowie durch das Flackern der Flamme entstehen eine große Zahl unregelmäßiger



Fig. 67.

¹ *resono* wiedertönen.

Schwingungen, also ein Gemisch von Tönen, von denen aber nur ganz bestimmte die Luftsäule in den Röhren zum Mittönen bringen. Daraus geht auch hervor, daß die Länge dieser Luftsäule bei Pfeifen und singenden Flammen einen großen Einfluß auf die Tonhöhe hat. Auf dem Mittönen beruhen ferner die Resonatoren, kugelförmige Hohlapparate mit einer weiteren und einer engeren Öffnung (Fig. 67); letztere wird ins Ohr gesteckt. Sie sind auf einen gewissen Ton abgestimmt und dienen dazu, ihn aus einem Tongemenge herauszufinden, da sie ja nur diesen einen verstärken. Auf diese Weise wies z. B. HELMHOLTZ nach, daß die verschiedenartige Klangfarbe der Musikinstrumente durch bestimmte Obertöne bedingt ist. Verwandt mit dem Mittönen, wenn auch nicht ganz identisch, ist die allgemeine Resonanz. Man versteht darunter die Verstärkung jedes beliebigen Tones. Da z. B. Saiten, Stäbe usw. eine zu geringe Luftmenge in Bewegung setzen, geben sie nur schwache Töne von sich. Um diese zu verstärken, setzt man sie auf sogenannte Resonanzböden, entweder Holzplatten oder Holzkästen usw., die durch ihr Mitschwingen mehr Luftteilchen in Schwingungen versetzen.

§ 71. **Fortpflanzung des Schalls.** Der Schall pflanzt sich ausschließlich durch longitudinale Wellen fort [vgl. § 69]. Von der Schallquelle aus gehen also abwechselnd Verdichtungs- und Verdünnungswellen in das umgebende Medium hinein. Die Träger dieser Wellen sind beim Schall materielle Moleküle (im Gegensatz zum Lichte). Bringt man daher ein Läutwerk unter eine Luftpumpe, so hört man es immer leiser, je mehr die Luft verdünnt wird, bis es schließlich ganz verstummt. Der Schall pflanzt sich nicht nur durch luftförmige, sondern auch durch flüssige u. feste Medien fort, ja sogar noch schneller als durch Luft. Diese Tatsache scheint gegen die NEWTONSche Formel

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}} \quad [\S 61] \text{ zu verstoßen. Der Widerspruch ist aber nur scheinbar, denn die größere Fortpflanzungsgeschwindigkeit in festen und flüssigen Körpern beruht nicht auf deren größerer Dichte, sondern auf ihrer erhöhten Elastizität. Aus der NEWTONSchen Formel ergibt sich durch Rechnung die Schallgeschwindigkeit in Luft zu ca. 280 m in der Sekunde, während experimentell stets höhere Werte gefunden wurden. Es wurde z. B. die Zeit gemessen, die zwischen dem Aufleuchten und der Wahrnehmung des Schalles eines in bekannter Entfernung abgefeuerten Geschützes verstrich. Daraus fand man eine Schallgeschwindigkeit von 330—335 m in der Sekunde. Erst LAPLACE erkannte den Fehler in der obigen Formel und zeigte, daß man sie mit einem bestimmten Faktor, nämlich } \sqrt{k}, multiplizieren muß [vgl. § 102].$$

§ 72. **Schallgeschwindigkeit und Wellenlänge.** Da die Schallfortpflanzung auf Wellenbewegung beruht, gilt auch hier die Formel

$v = n\lambda$ [§ 61]. Da nun v für die meisten Medien experimentell festgestellt ist, n sich leicht durch die Sirene, den Vibrographen usw. finden läßt [§ 67], so kann man daraus die Wellenlänge λ berechnen. Diese kann aber auch direkt durch die KUNDTschen Staubfiguren gefunden werden.

Man legt ein Glasrohr (ab Fig. 68) wagerecht auf einen Tisch, das auf der einen Seite durch den verschiebbaren Stempel s luftdicht abgeschlossen ist. In das offene Ende ragt ein in der Mitte (bei m) festgeklemmter Stab aus Glas oder Metall usw. hinein, der eine kleine leichte Korkscheibe k trägt. Reibt man nun die äußere Hälfte des Stabes mit einem nassen Korken oder Tuch, so gerät er in Längsschwingungen, wobei die festgeklemmte Mitte ein Knotenpunkt ist, während die Enden Bäuche sind. Diese Erschütterungen werden durch die Korkscheibe auf die Luftsäule im Glasrohr übertragen, und sie gerät ebenfalls in stehende Schwingungen, wenn einer ihrer Obertöne mit dem Stabton übereinstimmt. Man erreicht dies durch passende Stellung des Stempels s , worauf der vom Glasstab ausgehende Ton erheblich verstärkt wird. Befindet sich nun im Glasrohr ab ein leichtes Pulver (Bärlappsaamen usw.), so sammelt sich dies dabei hauptsächlich in den Knotenpunkten an, in denen

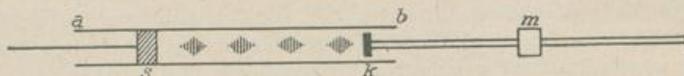


Fig. 68.

ja keine Bewegung der Luft stattfindet. Die Entfernung zwischen zwei benachbarten Knoten, die leicht gemessen werden kann, entspricht einer halben Wellenlänge des Tons in Luft. Da auch die Länge des Stabes einer halben Wellenlänge des Tons in dieser Substanz entspricht, die Schwingungszahl für Luft und Stab dieselbe ist, so ergibt sich aus den Formeln $v = n\lambda$ und $v_1 = n\lambda_1$ das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Schalls in Luft und in der festen Substanz. Ersetzt man Luft durch ein anderes Gas, so wird die Wellenlänge eine andere und man erhält so das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten für Luft und dieses Gas. Da die Schallgeschwindigkeit in Luft bekannt ist, kann man so die Schallgeschwindigkeit in Gasen und festen Körpern leicht finden. Man kann auf diesem Wege, also durch direkte Messung der Wellenlänge, aber auch die Gasdichten berechnen. Es ist nämlich nach § 71 die Schallgeschwindigkeit in Luft $v = \sqrt{\frac{e}{d}} \cdot k$, die in einem anderen Gase $v_1 = \sqrt{\frac{e}{d_1}} \cdot k$, da nach dem BOYLE-MARIOTTEschen Gesetze der Elastizitätsmodul für alle Gase gleich ist.

Somit ist $v:v_1 = \lambda:\lambda_1 = \sqrt{\frac{1}{d}}:\sqrt{\frac{1}{d_1}}$. Endlich ergeben sich auch Beziehungen zu den Molekulargewichten der Gase, die ja den Dichten proportional sind [§ 94].

Es ist also auch $\lambda:\lambda_1 = \sqrt{\frac{1}{M}}:\sqrt{\frac{1}{M_1}}$.

§ 73. **Reflexion des Schalls.** Treffen die Schallwellen auf ein Hindernis, z. B. eine feste Wand, so werden sie zurückgeworfen. Unter günstigen Bedingungen kann man den reflektierten Ton deutlich gesondert hören (Echo); die Wand muß dazu mindestens 16 m entfernt sein, da sonst nur ein diffuser Nachhall entsteht. Aus der Zeit,

in der das Echo erfolgt, läßt sich leicht die Entfernung jenes Hindernisses annähernd berechnen, da ja der Schall in einer Sekunde ca. 330 m zurücklegt. Für die Reflexion und Refraktion des Schalles gelten dieselben Gesetze wie beim Lichte.

§ 74. **Interferenz des Schalls.** Daß es sich bei der Schallfortpflanzung wirklich um Wellenbewegung handelt, geht daraus hervor, daß unter Umständen Schall plus Schall eine Abschwächung ergibt.

Dies ist mit dem geistreichen Apparat von QUINCKE (Fig. 69) leicht nachzuweisen.

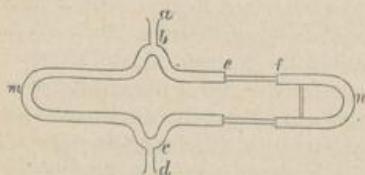


Fig. 69.

Die Röhre *ab* teilt sich bei *b* in zwei Schenkel, die über *m* und *n* nach *c* gehen und dort in einem gemeinsamen Rohr *cd* münden. Die Länge des rechten Schenkels kann wie bei einer Zugposaune verändert werden, so daß, wenn an *a*

eine Tonquelle gehalten wird, der Schall auf jeder Seite einen ungleichen Weg zurücklegt. Entspricht diese Differenz einer geraden Zahl von halben Wellenlängen, so hört das Ohr in *d* die Töne laut; leise dagegen bei einer Differenz von einer ungeraden Zahl von halben Wellenlängen [vgl. § 64].

§ 75. **Konsonanz und Dissonanz.** Wirkt das Zusammenklingen von zwei oder mehreren Tönen angenehm, so heißt dies Konsonanz, das Gegenteil Dissonanz. Schon früher wußte man, daß zwei Töne um so angenehmer zusammen klingen, je einfacher das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen ist; die richtige Erklärung dafür gab aber erst HELMHOLTZ. Zwei Stimmgabeln von genau derselben Schwingungszahl geben einen einzigen stets gleich lauten Ton. Macht aber z. B. die eine in der Sekunde 300 Schwingungen, die andere 301, so muß eine gegenseitige Phasenverschiebung stattfinden, und nach $\frac{1}{2}$ Sekunde wird die von der zweiten ausgehenden Wellenbewegung genau

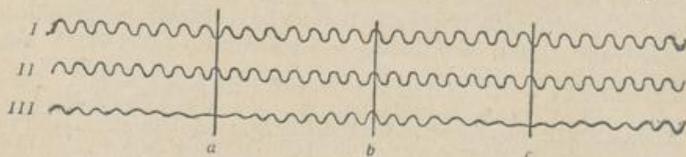


Fig. 70.

um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge mit der ersten differieren, d. h. direkt entgegengesetzte Phase haben. Daher wird der Ton durch Interferenz schwächer werden, um allmählich wieder die frühere Stärke zu erlangen. Figur 70 veranschaulicht diese Verhältnisse; es bedeuten darin I und II die Kurven zweier einfachen Töne von 15 bzw. 16 Schwingungen in der Sekunde, III die resultierende Schwingungskurve, die bei *b* ihr Maximum, bei *a* und *c* ihre Minima hat, während dazwischen allmähliche

Übergänge stattfinden. Dieses Schwächer- und Stärkerwerden beim Zusammenklingen zweier Töne nennt man Schwebungen oder Stöße; ihre Zahl ist immer gleich der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne. Mehr als zwölf Schwebungen in der Sekunde werden nicht mehr einzeln wahrgenommen, sie bedingen dann die Rauigkeit des Akkords. Am unangenehmsten werden 33 Schwebungen in der Sekunde empfunden; darüber hinaus werden sie allmählich nicht mehr wahrgenommen. Eine einfache Rechnung zeigt, daß in der Tat bei den harmonisch klingenden Intervallen die Schwebungen stets weit von dieser Grenze entfernt bleiben.

Auf diese Schwebungen wurden früher auch die Differenz- oder TARTINISCHEN Töne zurückgeführt, deren Schwingungszahl ebenfalls gleich der Differenz der Schwingungszahlen der zwei ursprünglichen Töne ist. Nach HELMHOLTZ ist dies aber nicht richtig, schon deshalb nicht, weil es daneben auch Summationstöne gibt.

Man kann die Konsonanzen und Dissonanzen mittels der sog. LISSAJOUS'SCHEN Klangfiguren auch sichtbar machen. Stellt man nämlich zwei senkrecht zueinander schwingende Stimmgabeln, die beide an einer ihrer Zinken einen kleinen Spiegel tragen, so auf, daß ein Lichtstrahl von dem ersten Spiegel auf den zweiten und von dort auf einen Schirm reflektiert wird, so entstehen bestimmte Lichtfiguren. Schwingt nämlich nur eine Stimmgabel, so entsteht eine leuchtende gerade Linie; schwingen beide, so entsteht bei Gleichheit des Tons je nach der Phasendifferenz entweder eine gerade Linie oder ein Kreis oder eine Ellipse [vgl. § 146]. Sind dagegen die Stimmgabeln etwas verstimmt, so gehen diese Figuren wegen der nun wechselnden Phasendifferenz ineinander über. In gleicher Weise haben auch die anderen Konsonanzen charakteristische einfache Lichtfiguren, die bei Verstimmung der Stimmgabeln einen Wechsel zeigen.

§ 76. **Dopplers Prinzip.** Wenn die Entfernung zwischen einer Tonquelle und einem Beobachter rasch kleiner wird, so wird der Ton der ersteren höher. Dies ist leicht zu konstatieren bei dem Pfeifen einer sich nähernden Lokomotive. Von einer ruhenden Tonquelle aus gelangen nämlich in einer Sekunde eine bestimmte Zahl von Schallwellen ins Ohr des Beobachters; nähert sich aber die Tonquelle in einer Sekunde um x Meter, so kommen mehr Schallwellen zur Perception, nämlich auch die, welche sonst vom Beobachter noch x Meter entfernt wären. Entfernt sich die Tonquelle oder der Beobachter, so muß natürlich der Ton tiefer werden.

Wärmelehre.

A. Mechanische Wärmetheorie.

§ 77. **Wesen der Wärme.** Unter Wärme versteht man dasjenige Agens, welches bestimmte Nervenendigungen so reizt, daß wir eine

Temperaturempfindung haben. Früher nahm man einen Wärmestoff zwischen den Körpermolekülen an, der unter Umständen austreten, „frei werden“ könne. Dagegen sprechen aber viele Tatsachen. Graf RUMFORD zeigte zuerst, daß durch Rotation eines Kolbens in einem dicht anschließenden metallischen Hohlzylinder, also durch mechanische Arbeit, eine unbegrenzte Wärmemenge erzeugt werden kann; auch hat das Metall vor und nach der Reibung dieselbe Wärmekapazität, d. h. Fähigkeit, Wärme aufzunehmen. Nach der stofflichen Theorie könnte aber in den durch Druck verkleinerten Intermolekularräumen nicht mehr so viel Wärme aufgenommen werden wie vorher. Noch entscheidender war der Versuch von DAVY: Er brachte in einem Raume von 0° zwei Eisstücke allein dadurch zum Schmelzen, daß er sie aneinander rieb. Hier ist sogar die Wärmekapazität des entstandenen Wassers größer als die des Eises. Durch diese und andere Versuche wurde festgestellt, daß Wärme kein Stoff, sondern Energie ist, und zwar Energie der Körpermoleküle¹.

§ 78. **Wärme und mechanische Arbeit.** Da Wärme eine, wenn auch unsichtbare, Form der Energie ist, so müssen zwischen ihr und anderen Arten der Energie Beziehungen existieren. Es ist das unsterbliche Verdienst des Heilbronner Arztes ROBERT MAYER, durch scharfsinnige Deduktionen nachgewiesen zu haben (1842), daß die Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme stets nach unwandelbaren Gesetzen erfolgt. Gleichzeitig und unabhängig von ihm war der Engländer JOULE durch viele mühsame Versuche zu demselben Resultate gekommen. Bezeichnet 1 Meterkilogramm die Arbeit, die nötig ist, um 1 kg 1 m zu heben, und 1 (große) KALORIE die Wärmemenge, die nötig ist, 1 kg Wasser von 0° auf 1° zu erwärmen [§ 98], so ist nach diesen beiden Forschern 1 KALORIE äquivalent 427 Meterkilogrammen. (1. Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.) Will man also Wärme in Arbeitsmaß, durch das mechanische Äquivalent, ausdrücken, so multipliziert man mit 427; will man Arbeit durch ihr thermisches Äquivalent ausdrücken, so dividiert man durch 427. Diese Beziehung zwischen Wärme und Arbeit ist offenbar ein Spezialfall des großen Gesetzes von der Erhaltung der Energie².

¹ Bei den Gasen handelt es sich dabei fast ausschließlich um kinetische Energie, bei den festen und flüssigen Körpern ist daneben auch die potentielle Energie der Moleküle von Bedeutung. Im Gegensatz zum Schall sind die bei der Wärme (und dem Lichte) in Betracht kommenden Molekularbewegungen ungeordnet. [Vgl. §§ 105, 107, 135.] — ² Um eine (große) KALORIE in absoluten mechanischen Einheiten [§ 5] auszudrücken, setzt man für 1 Meterkilogramm den Wert 9,81 Joule ein [§ 12. Anmerkung]. Folglich 1 KALORIE = $427 \cdot 9,81$ Joule = 4188,87 Joule. Demnach 1 Grammkalorie [§ 98] = $4,19$ Joule = $4,19 \cdot 10^7$ Erg. Andererseits 1 Joule = 0,24 Grammkalorien.

1 KALORIE = 427 Meterkilogramm = 69 Kalorien

Während nun Arbeit stets und vollständig in Wärme verwandelt werden kann, läßt sich der Wärmeinhalt eines Körpers nur dann in Arbeit überführen, wenn der betr. Körper heißer ist als seine Umgebung, und auch dann nur teilweise; ein anderer Teil der Wärme sinkt dabei unausgenutzt zu tieferer Temperatur herab. Oder, wie CLAUDIUS umgekehrt sagte: Wärme kann ohne Arbeitsverbrauch nicht von einem kühleren auf einen wärmeren Körper übergehen. Man bezeichnet diese Einschränkungen zum 1. Hauptsatz als sog. 2. Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Soweit danach Wärme in Arbeit verwandelt werden kann, gilt das Äquivalenzgesetz des 1. Hauptsatzes. Zur Erläuterung des Gesagten diene noch folgendes: Um einem Körper seinen gesamten Wärmeverrat zu entziehen, müßte man ihn bis zum absoluten Nullpunkt [§ 83] abkühlen, was unmöglich ist, wie überhaupt schon die Darstellung tieferer Temperaturen in der Praxis auf große Schwierigkeiten stößt. Zweitens geht aber auch innerhalb der wirklich in Betracht kommenden Temperaturbreiten stets ein Teil des Wärmeverrats für die Umwandlung in Arbeit dadurch verloren, daß alle Körper beständig durch Leitung und Strahlung Wärme an ihre Umgebung abgeben, wodurch eben ihre für den Umwandlungsprozeß maßgebende Anfangstemperatur sinkt. Es findet also eine Zerstreung (Dissipation) bzw. Entwertung (Degradation) von nützlicher Wärme statt, und es bleibt immer weniger Wärme für Rückverwandlung in mechanische Arbeit übrig. Da nun alle Energieformen die Tendenz haben, sich schließlich in die als Wärme charakterisierte ungeordnete Molekularbewegung zu verwandeln, muß es nach dem Gesagten allmählich dahin kommen, daß die Welt in den Zustand des „Wärmetodes“ gelangt. Man drückt diesen Gedanken oft auch so aus: Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu, wobei Entropie¹ eben den „Zerstreuungsgrad“ der Energie bzw. die Summe der entwerteten Energie bedeutet. Zuletzt würden also überhaupt keine Temperaturunterschiede mehr bestehen, somit auch die Grundlage für Rückgewinnung mechanischer und andersartiger Energie fehlen.

§ 79. **Wärme durch chemische Vorgänge.** Mehr noch als durch mechanische Arbeit entsteht auf der Erde Wärme durch chemische Prozesse. Besonders kommen hier die Verbindungen von Körpern mit Sauerstoff (Verbrennungen) in Betracht. So entsteht z. B. bei der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff eine Wärme von 34000 (großen) Kalorien. Diese ist der Ausdruck dafür, daß vorher getrennte Mole-

¹ Von *ἐντροπία* umwenden, umwandeln. Im Sinne von CLAUDIUS, der das Wort geschaffen, bezeichnet Entropie eine bestimmte, hier nicht näher zu erörternde, rechnerische Größe, die mit dem nicht in Arbeit verwandelbaren Teil der Wärme wächst.

küle, die eine große Affinität zueinander besitzen, mit großer Heftigkeit aneinanderprallen und in stürmische Schwingungen geraten. Auf der Verbrennung der eingeführten Nahrungsmittel bzw. der Körperbestandteile beruht die Eigentemperatur der Organismen, die auch den sogenannten Kaltblütern zukommt. — Seltener als solche exothermischen Prozesse, bei denen also Wärme frei wird, sind endothermische Prozesse, bei denen Wärme gebunden wird. — Auch beim Zerfall radioaktiver Elemente [§ 210] werden erhebliche Wärmemengen frei.

§ 80. **Sonnenwärme.** In letzter Linie stammt alle Erdwärme von der Sonne ab. So wird u. a. die Strahlungsenergie der Sonne in den Pflanzen in potentielle chemische Energie umgewandelt, indem mit Hilfe des Chlorophylls die komplizierten Verbindungen aufgebaut werden, durch deren Verbrennung der tierische Organismus seine Wärme erhält; und auf dieselbe Quelle sind die unermesslichen Wärmeverräte der Steinkohlenlager zurückzuführen, welche letztere ja durch langsame Vermoderung fossiler Pflanzen unter Luftabschluß entstanden sind. Über die Entstehung der Sonnenwärme gibt es natürlich nur Hypothesen. Viele nehmen mit KANT-LAPLACE an, daß durch Rotation von Nebelmassen glühende Weltkörper entstanden seien, die sich allmählich von der Rinde zum Zentrum abkühlen. Während die Sonne noch im ersten Stadium ist, hat sich die Erde bis auf einen feurigen Kern schon abgekühlt, und im Monde ist dieser Prozeß bereits ganz beendet. Jedenfalls kann die Verdichtung, welche diese Abkühlung begleiten muß, mit Recht als ungeheuer große Wärmequelle angesehen werden. Die Sonnenwärme wird aber wahrscheinlich auch dadurch, trotz der großen Ausstrahlung, erhalten, daß fortwährend ungezählte kleine Weltkörper, Asteroiden, in sie hineinstürzen, wobei wiederum mechanische Arbeit in Wärme übergeht.

B. Ausdehnung durch Wärme.

§ 81. **Ausdehnungskoeffizient.** Mit wenigen Ausnahmen werden alle Körper durch Wärme ausgedehnt und umgekehrt durch Kälte zusammengezogen. Am meisten dehnen sich die Gase aus, weniger die flüssigen, und am wenigsten die festen Körper. Die Zahl, welche angibt, welchen Bruchteil der ursprünglichen Größe die Ausdehnung pro Grad der Temperaturerhöhung beträgt, heißt Ausdehnungskoeffizient (α). Dieser ist von der Natur der betreffenden Substanz abhängig. Man unterscheidet einen linearen, wenn die Ausdehnung nur in einer Richtung erfolgt (nur bei festen Körpern möglich), und einen kubischen; letzterer beträgt das Dreifache des ersteren.

Dehnt sich nämlich jede Seite eines Würfels um α aus, so wird sie $1 + \alpha$. Das Volumen des ganzen Würfels wird also $(1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$. Da aber α für feste Körper schon sehr klein ist ($< 0,0001$), so können die höheren Potenzen unberücksichtigt bleiben. Auch der kubische Ausdehnungskoeffizient wird kurzweg mit α bezeichnet.

Mit Rücksicht auf die Ausdehnung durch Erwärmung werden z. B. bei Eisenbahnschienen kleine Zwischenräume gelassen und bei Pendeluhren sog. Kompensationspendel angewandt [Seite 28]. Auch beruhen darauf die Metallthermometer.

Dieselben bestehen aus einem langen spiralförmig gewundenen Streifen, der aus zwei oder drei Metallen zusammengesetzt ist, und dessen Krümmung bei Erwärmung zunimmt. Sein eines Ende ist fest, das andere beweglich und mit Zeiger versehen; letzterer spielt vor einer nach Celsiusgraden eingeteilten Skala.

Bei Flüssigkeiten, die in Gefäßen eingeschlossen sind, wird nur die scheinbare Ausdehnung beobachtet, d. h. die Differenz der Ausdehnung des Gefäßes und derjenigen der Flüssigkeit. Die wahre Ausdehnung von Flüssigkeiten kann man u. a. mittels kommunizierender Röhren bestimmen.

Wird der eine Schenkel kommunizierender Röhren auf der Temperatur 0 erhalten (indem man ihn z. B. mit schmelzendem Eis umgibt), der andere auf t° erwärmt, so wird eine Flüssigkeit, z. B. Quecksilber, in beiden Schenkeln verschieden hoch stehen. Dann verhalten sich die Volumina der Flüssigkeit in beiden Schenkeln wie die Höhen, $\frac{v}{v_0} = \frac{h}{h_0}$, wobei v_0 und h_0 Volumen bzw. Höhe bei 0° , v und h bei t° bedeuten. Nun ist nach § 82 $v = v_0(1 + \alpha t)$. Daraus folgt $1 + \alpha t = \frac{h}{h_0}$ und $\alpha = \frac{1}{t} \cdot \frac{h - h_0}{h_0}$.

§ 82. Ausdehnung der Gase. Während feste und flüssige Körper sich nicht ganz regelmäßig ausdehnen, dehnen sich alle Luftarten fast ganz gleichmäßig aus, nämlich für jeden Grad Celsius um $\frac{1}{273}$ ihres Volumens bei 0° (Gesetz von GAY-LUSSAC). Hat also ein Gas bei 0° das Volumen v_0 , dann hat es bei 1° das Volumen $v_0 + \alpha v_0$, bei t° das Volumen $v_0 + t\alpha v_0$. Es ist also

$$v_t = v_0(1 + \alpha t).$$

In Worten: bei gleichbleibendem Drucke sind die Gasvolumina der Temperaturzunahme proportional. Bleibt dagegen das Volumen unverändert, so wächst der Druck des Gases für jeden Grad der Temperaturzunahme um $\frac{1}{273}$ des Druckes bei 0° . Es ist also

$$p_t = p_0(1 + \alpha t).$$

In Worten: bei gleichbleibendem Volumen sind die Gasdrücke der Temperaturzunahme proportional. Diese beiden Gesetze kann man zusammen mit dem BOYLE-MARIOTTESchen Gesetz [§ 48] durch eine einzige Formel ausdrücken, nämlich

$$pv = p_0v_0(1 + \alpha t).$$

*erfüllt die
Bedingung des
Gay-Lussac*

gas bei 0° C. ist man
nicht umkehrbar um
22,4 Liter pro Mol
min.

$R = \frac{22,4}{273} = 0,082$

Wärmelehre.

Ist $p = p_0$ bzw. $v = v_0$, so erhält man daraus ja sofort obige Gleichungen. Für den Fall $t = 0$ (d. h. bei gleichbleibender Temperatur) ergibt sich daraus das MARIOTTESCHE Gesetz, $p v = p_0 v_0$.

§ 83. **Absoluter Nullpunkt.** Die gewöhnliche Unterscheidung zwischen Wärme und Kälte ist offenbar ganz willkürlich. Beide sind nur quantitativ, nicht qualitativ voneinander verschieden. Da Wärme auf Molekularbewegung beruht, so kann von einem Nullpunkt der Wärme nur die Rede sein, wenn keine derartige Bewegung mehr stattfindet. Nach der kinetischen Gastheorie [§ 45] könnte dann das Gas aber auch keine Spannung mehr haben, da ja der ausgeübte Druck nur ein Folge der Molekularbewegung ist. Es würde also $p_0 (1 + \alpha t) = 0$. Da nun p_0 , der Druck bei 0° , eine bestimmte Größe ist, so würde der andere Faktor dieses Produktes $1 + \alpha t = 0$, woraus $t = -273$ folgt¹. Der absolute Nullpunkt liegt also bei -273° . Bis jetzt ist es noch nicht gelungen, tiefere Temperaturen als -270° herzustellen. Zur Umwandlung gewöhnlicher Temperaturangaben in absolute Temperaturen hat man nur 273 zu addieren. Bezeichnet man $273 + t$, also die absolute Temperatur, mit T und berücksichtigt, daß $1 + \alpha t = 1 + \frac{t}{273} = \frac{273 + t}{273}$, so lauten obige Formeln

$$v = v_0 (1 + \alpha t) = \frac{v_0 T}{273}$$

$$p = p_0 (1 + \alpha t) = \frac{p_0 T}{273}$$

$$p v = \frac{p_0 v_0 T}{273}$$

absolute Temperatur

Bezeichnet man die Konstante $\frac{p_0 v_0}{273}$ mit R , so nimmt das BOYLE-MARIOTTE-GAY-LUSSACSCHE Gesetz die einfache Form an

$$p v = R T.$$

Bei gleichbleibendem Druck sind also die Volumina, bei gleichbleibendem Volumen die Spannungen der Gase direkt proportional der absoluten Temperatur.

Man nennt obige Gleichung die Zustandsgleichung der Gase, weil durch sie der Zustand einer Gasmenge bestimmt wird. Sie ist übrigens nur annähernd richtig [vgl. § 48].

§ 84. **Ausdehnung des Wassers.** Das Wasser bildet eine bemerkenswerte Ausnahme von obigem Gesetze. Wenn es bei 0_0 erwärmt wird, so dehnt es sich nicht aus, sondern zieht sich zusammen, bis es bei 4° Celsius seine größte Dichtigkeit erreicht hat. Von da an

¹ In Wirklichkeit existiert bei dieser Temperatur kein gasförmiger Körper, da er schon vorher verflüssigt wird.

*Gef. von unregelmäßigem Stoffe Bestimmung, daß die Gase
p-p-p-p gemein gegeben = ideal Gas*

dehnt es sich wieder aus. Diese Eigenschaft ist sehr wichtig für die im Wasser lebenden Organismen, da sonst stillstehende oder langsam fließende Gewässer bis auf den Grund gefrieren würden. So aber kühlt sich die oberste Schicht bis auf 4° ab und sinkt infolge ihrer größeren Dichte und Schwere nach unten. Die wärmeren Schichten steigen herauf und werden auch allmählich abgekühlt. Schließlich bleiben die kälteren Schichten oben, ebenso wie das Eis, welches spezifisch noch leichter als Wasser von 0° ist und somit eine schützende Decke bildet. Dies gilt aber nur für stehende Gewässer, da strömendes Wasser sich auch auf 0° und darunter abkühlen kann, ohne zu gefrieren. In diesem Falle kann durch Berührung mit dem Boden sogenanntes Grundeis entstehen. — Manche feste Körper zeigen ebenfalls bei Temperaturzunahme eine Zusammenziehung (allerdings nur in bestimmter Richtung), z. B. gedehnter Kautschuk und Jodsilber.

§ 85. **Thermometer.** Da die Ausdehnung der Körper durch die Wärme proportional der Erwärmung erfolgt, dient sie zur Temperaturmessung. Gewöhnlich benutzt man Quecksilberthermometer, da Quecksilber sich ziemlich regelmäßig ausdehnt [vgl. § 81 scheinbare Ausdehnung]. Ein gewöhnliches Thermometer besteht aus einem Gefäß mit Quecksilber und einer damit verbundenen luftleeren, kapillaren Röhre, neben der eine Skala angebracht ist. Die Röhre wird bei der Herstellung zugeschmolzen, nachdem durch Kochen des eingefüllten Quecksilbers alle Luft vertrieben ist. Als Fundamental- oder Fixpunkte wählt man gewöhnlich den Gefrierpunkt und Siedepunkt des Wassers¹. Oberhalb des Gefrier- oder Eispunktes, der mit 0 bezeichnet wird, gibt das Thermometer Wärmegrade an, unter demselben sog. Kältegrade [vgl. § 83]. Als Empfindlichkeit des Quecksilberthermometers bezeichnet man die Längenverschiebung des Quecksilberfadens für 1° Temperaturerhöhung. Den Abstand zwischen beiden Fundamentalpunkten teilte RÉAUMUR in 80 Grade, CELSIUS in 100; letztere Einteilung ist jetzt allgemein üblich. Nur in England und seinen Kolonien gebraucht man die Einteilung nach FAHRENHEIT. Hier wird als Nullpunkt die Temperatur einer bestimmten Mischung von Kochsalz, Schnee und Salmiak angenommen; von hier bis zum Gefrierpunkt des Wassers sind 32 Grad, von diesem bis zum Siedepunkt des Wassers 180, im ganzen also 212 Grad.

Folgende Tabelle dient zur Umrechnung:

$$\begin{aligned} n^{\circ} (C) &= \frac{4}{5} n^{\circ} (R) = \frac{9}{5} n^{\circ} + 32^{\circ} (F) \\ n^{\circ} (R) &= \frac{5}{4} n^{\circ} (C) = \frac{5}{9} n^{\circ} + 32^{\circ} (F) \\ n^{\circ} (F) &= \frac{9}{5} (n^{\circ} - 32^{\circ}) (C) = \frac{5}{9} (n^{\circ} - 32^{\circ}) (R). \end{aligned}$$

¹ Genauer: Die Temperaturen des schmelzenden Eises und der Dämpfe des (bei 760 mm Druck) siedenden Wassers, weil diese konstant sind, während das, ja nicht immer reine, Wasser eventuell eine Gefrierpunktserniedrigung bzw. Siedepunktserhöhung zeigt [§§ 89, 90].

Da Quecksilber bei $-38,5^{\circ}$ gefriert, ersetzt man es bei tiefen Temperaturen durch Weingeist, oder noch besser durch Petroläther, Xylol oder Pentan. Auch für hohe Temperaturen eignen sich gewöhnliche Quecksilberthermometer nicht; fertigt man sie jedoch aus geschmolzenem Quarz statt aus Glas an, so kann man sie bis zu 750° benutzen. Die Messung höchster Temperaturen (sog. Pyrometrie) erfordert besondere Vorrichtungen bzw. Verfahren. Man erhitzt z. B. einen schwer schmelzbaren Körper auf die zu bestimmende Temperatur und bestimmt diese dann kalorimetrisch [§ 99]; oder man mißt die Helligkeit eines glühenden Körpers („optische Pyrometer“) usw. — Für alle Temperaturen, sowohl hohe wie niedrige, geeignet sind Metallthermometer [§ 81], Gasthermometer [s. u.], sowie Thermoelemente [§ 184]. — Um die höchsten bzw. niedrigsten Temperaturen während eines bestimmten Zeitraumes anzuzeigen, dienen die Maximum- und Minimumthermometer.

Eine für meteorologische Zwecke gebräuchliche Konstruktion derselben zeigt z. B. Fig. 71. In dem schraffierten Teile des Apparates ist Weingeist, dazwischen ein Quecksilberfaden. Über beiden Enden des letzteren befindet sich je ein mit federnden Glasfäden versehener Eisenstift, an dem zwar der dünnflüssige Weingeist, aber nicht das dickflüssige Quecksilber vorbei kann. Steigt also auf der einen Seite das Quecksilber (was rechts bei Erwärmung des Weingeistes im Thermometergefäß *T*, links bei Abkühlung desselben erfolgt), so schiebt es den betr. Eisenstift vor; fällt das Quecksilber, so bleibt der Stift an seiner Stelle liegen. Das untere Ende des rechten Stiftes zeigt somit die höchste, das des linken die niedrigste Temperatur während einer bestimmten Zeit an. Die Zurückführung der Stifte an die Enden des Quecksilberfadens erfolgt mit Hilfe eines Magneten.

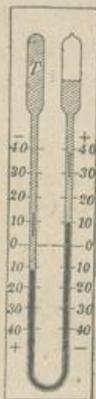


Fig. 71.

Bei den medizinisch verwendeten Maximumthermometern (Fieberthermometern), die gewöhnlich mit Quecksilber gefüllt sind, besitzt die Kapillare unten eine Verengung. Diese hindert nicht die mit großer Kraft erfolgende Ausdehnung des Quecksilbers; dagegen reißt bei der Abkühlung an dieser Stelle der Quecksilberfaden ab, weil sich nur der untere Teil zusammenzieht, während der obere Teil die Verengung nicht passieren kann. Bei einer anderen Konstruktion ist der obere Teil des Quecksilberfadens durch ein Luftbläschen von dem übrigen Quecksilber getrennt und wird beim Steigen des Quecksilbers vorgeschoben, während er beim Fallen an der erreichten Stelle liegen bleibt. Nach Gebrauch wird durch Schütteln der abgetrennte Teil zurückgebracht.

Für manche Zwecke sind den Flüssigkeitsthermometern die Gasthermometer vorzuziehen. Dieselben sind sehr empfindlich und genau, da Gase sich stark und dabei gleichmäßig ausdehnen; auch können sie für alle Temperaturen benutzt werden. Sie dienen hauptsächlich für wissenschaftliche Untersuchungen, während sie für die Praxis nicht in Betracht kommen, da die Temperatur nicht einfach

*Legen Sie
Öl auf einen
Kugellager*

abgelesen, sondern erst berechnet wird. Gewöhnlich nimmt man zu ihrer Füllung Luft oder Wasserstoff, für tiefste Temperaturen auch Helium.

Fig. 72 zeigt das gebräuchliche JOLLYsche Gasthermometer. Von dem mit Luft usw. gefüllten Gefäß V führt die Kapillarröhre c zur Glasröhre b , die wieder durch einen Schlauch mit der Glasröhre a in Verbindung steht. a und b sind an einem Stativ verschieblich und zum Teil mit Quecksilber gefüllt, das auch den Verbindungsschlauch ausfüllt. In b ist bei α eine Glasspitze eingeschmolzen. Taucht man V in schmelzendes Eis und stellt durch Verschiebung von a die linke Quecksilberkuppe so ein, daß sie α berührt, so ist der Druck des über ihr befindlichen Gases (p_0) gleich dem Barometerstand plus der Höhendifferenz beider Quecksilbersäulen. Erhitzt man dann das Gefäß V auf die Temperatur t , so sucht sich das Gas auszudehnen. Verhindert man dies, indem man a so weit verschiebt, daß die Quecksilberkuppe in b wieder α berührt, so ist jetzt der Druck des Gases (p_t) gleich dem Barometerstand plus der jetzigen Höhendifferenz beider Quecksilbersäulen. Aus der Formel $p_t = p_0 (1 + \alpha t)$ [§ 82] ergibt sich dann $t = \frac{p_t - p_0}{\alpha p_0}$. Hierzu kommen für genaue Messungen noch verschiedene Korrekturen, z. B. Berücksichtigung der Ausdehnung des Glasbehälters, Reduktion der Quecksilberhöhe auf 0° usw.

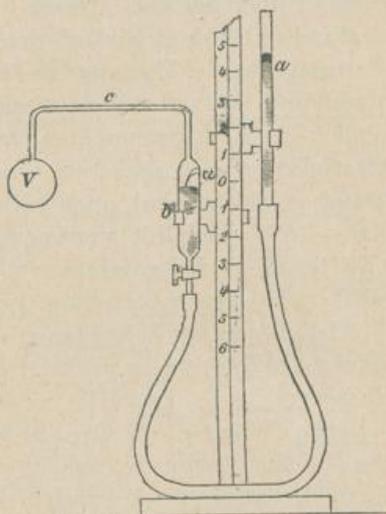


Fig. 72.

Noch feinere Temperaturmessungen lassen sich mit dem Bolometer [§ 178] und mit Thermoelementen [§ 184] ausführen.

§ 86. **Luftströmungen.** Bei der Ausdehnung durch Wärme muß das spezifische Gewicht eines Körpers abnehmen, da ja dieselbe Masse auf einen größeren Raum verteilt wird. Daraus folgt, daß z. B. in einer Stube die wärmere Luft stets nach oben strömen wird. Darauf beruht auch eine Art der Ventilation, indem in eine Öffnung an der Decke eine Flamme gestellt wird. Auf die ungleiche Erwärmung der Luft und die dadurch bedingte Verschiedenheit des Luftdrucks sind auch die Winde zurückzuführen. So entstehen z. B. die Passate dadurch, daß am Äquator die erwärmte Luft in die Höhe steigt und zu ihrem Ersatze von den Polen her Luft dahin strömt. Analog lassen sich die Winde erklären, die von der Küste nach der See und umgekehrt wehen.

C. Änderung des Aggregatzustandes.

§ 87. **Schmelzen und Gefrieren.** Führt man einem festen Körper Wärme zu, so steigt seine Temperatur bis zum Schmelzpunkte, d. h. bis zu dem Punkte, wo er anfängt, in den flüssigen Aggregatzustand überzugehen. Dieser Übergang vom festen in den flüssigen Zustand unter dem Einfluß der Erwärmung heißt eben Schmelzen, der umgekehrte Vorgang Erstarren oder Gefrieren. Schmelzpunkt und Erstarrungspunkt sind in der Regel identisch und nur bezüglich des Ausgangspunktes verschieden. Allerdings können manche Flüssigkeiten in geschlossenen ganz reinen Gefäßen, die vor Erschütterung geschützt sind, auch bis unter den Gefrierpunkt (Wasser z. B. bis -10°) abgekühlt werden, ohne zu erstarren. Derartige unterkühlte Flüssigkeiten erstarren jedoch sofort, wenn ein festes Stoffteilchen hineingebracht wird [vgl. § 43].

Ist einmal der Schmelzpunkt erreicht, so steigt trotz aller Wärmezufuhr die Temperatur des betr. Körpers nicht eher an, bis seine ganze Masse verflüssigt ist. Die hierzu nötige Wärme nannte man früher latente Wärme, da sie ja scheinbar verschwindet. Sie leistet aber eine bestimmte innere Arbeit, indem sie die Moleküle so weit voneinander entfernt, wie es eben für den flüssigen Zustand charakteristisch ist; man nennt sie daher heute besser Schmelzwärme. Umgekehrt wird beim Erstarren einer Flüssigkeit Wärme frei, da für die verminderte potentielle Energie der Moleküle ihre kinetische größer wird; und zwar entspricht die Menge dieser Wärme genau der Schmelzwärme.

Unter Schmelzwärme im engeren Sinne versteht man die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 gr eines festen Körpers in den flüssigen Zustand zu bringen. Die Schmelzwärme ist am größten beim Eis, nämlich ca. 80 Kalorien [vgl. §§ 98, 100].

Der Schmelzpunkt (bzw. Gefrier- oder Erstarrungspunkt), d. h. also die Temperatur, bei der die Verflüssigung eines festen (bzw. Erstarrung eines flüssigen) Körpers beginnt, ist für jeden Stoff bei bestimmtem äußeren Druck [§ 88] eine konstante Größe; bei Atmosphärendruck z. B. für Wasserstoff -259° , Kohlenoxyd -207° , Alkohol -90° , Quecksilber $-38,5^{\circ}$, Äther -32° , Wasser 0° , Wachs $+63,5^{\circ}$, Blei $+327^{\circ}$, Platin $+1770^{\circ}$, Iridium 2300° .

Der Schmelzpunkt von Metallegierungen (die man auch als feste Lösungen bezeichnen kann) ist im allgemeinen tiefer als der aus den einzelnen Bestandteilen zu berechnende Durchschnittswert, oft sogar tiefer als der Schmelzpunkt des am leichtesten schmelzbaren Bestandteils [vgl. § 89].

§ 88. **Druck und Schmelzpunkt.** Mit wenigen Ausnahmen dehnen sich die Körper beim Schmelzen aus, während beim Erstarren sich ihr Volumen verringert. Die Erwärmung repräsentiert also gewissermaßen eine zentrifugale Kraft: sie entfernt die Körpermoleküle voneinander. Im Gegensatz dazu ist äußerer Druck eine zentripetale Kraft: durch

abgekühlt
unterkühlt
überkühlt

Kompression (wie auch durch Abkühlung) werden die Körpermoleküle genähert. Hieraus folgt, daß äußerer Druck den Übergang vom festen in den flüssigen (und analog auch vom flüssigen in den gasförmigen) Zustand erschweren muß, weil er ja der Ausdehnung der Moleküle entgegenwirkt. Mit anderen Worten, es wird jetzt mehr Wärmezufuhr nötig sein, um den für den flüssigen Zustand charakteristischen Abstand der Moleküle zu erzielen; das Schmelzen erfolgt jetzt bei höherer Temperatur. Andererseits muß natürlich Druck das Erstarren von Flüssigkeiten (und analog auch die Verflüssigung gasförmiger Körper) begünstigen.

Eine Ausnahme hiervon bilden die wenigen Körper, die in flüssigem Zustande ein kleineres Volumen besitzen als im festen. Hierzu gehört vor allem Wasser [§ 84], ferner Wismut, Antimon usw. Wenn Wasser sich in Eis verwandelt, dehnt es sich dabei aus, und zwar mit einer enormen Gewalt. Umgekehrt zieht sich Eis beim Schmelzen zusammen, ein Prozeß, der offenbar durch Druck begünstigt werden muß, daher erniedrigt Druck den Schmelzpunkt des Eises. So kann man Eis unter hohem Druck beliebig formen (sog. Plastizität des Eises). Ferner beruht das Fließen der Gletscher darauf. Die Eismassen der Gletscher erfahren in engen Schluchten einen solchen Druck, daß trotz der großen Kälte eine Schmelzung stattfindet und der Gletscher fließt. Kommt er in breitere Bahnen, so gefrieren die Eismassen wieder (Regelation).

§ 89. **Gefrierpunktserniedrigung.** Zur Überführung eines festen Körpers in den flüssigen Zustand ist, wie gezeigt wurde, Arbeit nötig. Diese kann von außen durch Zufuhr von Wärme geleistet werden. Ein fester Körper kann sich aber auch spontan in einer Flüssigkeit auflösen, dann entzieht er die dazu nötige Wärme („Lösungswärme“) seiner Umgebung; es entsteht somit Abkühlung. Darauf beruhen u. a. die Kältemischungen. Bringt man z. B. gleiche Teile fein gestoßenes Eis und Kochsalz zusammen, so verändern beide ihren Aggregatzustand, es entsteht eine Flüssigkeit von geringerer Temperatur (-20°). Andere Kältemischungen sind z. B. Eis und Schwefelsäure (-50°), feste Kohlensäure und Äther (-80°). Bei manchen Lösungen findet allerdings eine Temperaturerhöhung statt; dann handelt es sich aber um chemische Verbindungen, z. B. beim Auflösen von Natrium in Wasser.

Ebenso wie Legierungen einen niedrigeren Schmelzpunkt haben [§ 87], ist auch der Gefrierpunkt einer Lösung erniedrigt. Meerwasser gefriert z. B. bei -2° . Die Gefrierpunkts- (bzw. Schmelzpunkts-) Erniedrigung (gewöhnlich mit Δ bezeichnet und mittels des BECKMANNschen Apparates leicht zu finden) ist nun erfahrungsgemäß für eine bestimmte Lösung proportional ihrer Konzentration.

Diejenige Gefrierpunktserniedrigung nun, die 1 Gramm Substanz in 100 Gramm Lösungsmittel bewirkt, heißt nach **RAOULT** reduzierte oder spezifische Gefrierpunktserniedrigung.

Bedingen c Gramm Substanz in 100 Gramm Lösungsmittel gelöst eine Gefrierpunktserniedrigung Δ , so ist die reduzierte Gefrierpunktserniedrigung $t = \frac{\Delta}{c}$. Die reduzierten Gefrierpunktserniedrigungen, die zwei Substanzen in einem und demselben Lösungsmittel unter sonst gleichen Verhältnissen bedingen, sind umgekehrt proportional den Molekulargewichten beider Substanzen: $t:t' = m':m$. (**RAOULT**sches Gesetz). Anders ausgedrückt: Das Produkt aus Molekulargewicht (m) eines gelösten Stoffes und der reduzierten Gefrierpunktserniedrigung (t) ist eine nur von der Natur des Lösungsmittels, nicht der gelösten Substanz, abhängige Konstante (k) und dient daher zur Bestimmung des Molekulargewichts. Letzteres ergibt sich ja ohne weiteres aus der Formel $mt = m't' = k$, wenn eben t bzw. t' und k bekannt sind. Den Wert von t erhält man aus $\frac{\Delta}{c}$ (s. o.); k kann für jedes Lösungsmittel durch Auflösen einer Substanz von bekanntem Molekulargewicht gefunden werden. Für Wasser ist z. B. $k = 18,5$, für Benzol 49.

Durch die Gefrierpunktserniedrigung Δ kann man aber auch die Anzahl der gelösten Moleküle, d. h. die molekulare Konzentration einer Lösung bestimmen. Da nämlich das Gewicht einer Substanz gleich dem Produkt aus der Anzahl ihrer Moleküle und dem Molekulargewicht ist, folgt daraus, daß die Zahl ihrer Moleküle dem Quotienten aus dem Gewicht der Masse und dem Molekulargewicht, $\frac{c}{m}$, entspricht. $\frac{c}{m}$ ist also hier die Zahl der gelösten Moleküle in 100 Gramm Lösungsmittel. Aus den obigen Formeln $mt = \frac{m\Delta}{c} = k$ ergibt sich $\frac{c}{m} = \frac{\Delta}{k}$. Da k eine Konstante ist (s. o.), folgt andererseits, daß Lösungen gleicher molekularer Konzentration („äquimolekulare Lösungen“) auch dieselbe Gefrierpunktserniedrigung haben müssen, was auch durch Versuche bestätigt ist. Aus der molekularen Konzentration einer Lösung kann man wieder ihren osmotischen Druck berechnen [§ 44].

Die Lehre von den Gesetzen der Gefrierpunktserniedrigung, auch **Kryoskopie**¹ genannt, findet u. a. auch in der Medizin Anwendung.

§ 90. **Sieden**. Der Übergang eines (in der Regel flüssigen) Körpers in den dampf- (gas-, luft-) förmigen Zustand wird mit dem allgemeinen Ausdruck Verdampfung bezeichnet. Hierbei kann es sich um zwei ganz verschiedene Vorgänge handeln, um Sieden und Verdunsten.

Unter Sieden versteht man die bei einem bestimmten Temperaturpunkt (Siedepunkt) erfolgende schnelle Verdampfung einer Flüssigkeit, wobei die Dampfbildung in der Regel auch im Innern der Flüssigkeit vor sich geht. Voraussetzung für letzteres ist das Vorhandensein von (zunächst unsichtbaren) Luft- bzw. Gasbläschen in der Flüssigkeit, in welche hinein die Verdampfung erfolgt, so daß sie sich vergrößern und aufsteigen, wodurch der molekulare Zusammenhang gelockert wird und das sog. Kochen entsteht.

¹ κρύος Kälte, σκοπέω beobachten.

Siedepunkt nennt man, wie bereits erwähnt, die Temperatur, bei der das Sieden beginnt. Während des Siedens steigt trotz aller Wärmezufuhr die Temperatur der Flüssigkeit nicht an, bis die ganze Flüssigkeit in Dampf verwandelt ist. Die „latent“ gewordene Wärme (bezogen auf 1 gr der Flüssigkeit) bezeichnet man hier analog der Schmelzwärme [§ 87] als Verdampfungswärme; sie dient eben dazu, die Moleküle so weit auseinanderzubringen, wie es für den gasförmigen Zustand erforderlich ist.

Da beim Übergang in den gasförmigen Zustand eine starke Volumsvergrößerung stattfindet, folgt daraus, daß zwischen Druck und Siedepunkt analoge Beziehungen bestehen müssen, wie zwischen Druck und Schmelzpunkt [§ 88]. Bei gleichbleibendem Druck ist der Siedepunkt für dieselbe Substanz konstant; gewöhnlich wird er für 760 mm Barometerstand angegeben.

Der normale Siedepunkt beträgt z. B. für Helium $-268,7^{\circ}$ für Wasserstoff $-252,6^{\circ}$, für Luft $-191,4^{\circ}$, für Äther $+35^{\circ}$, für Alkohol $+78,4^{\circ}$, für Quecksilber $+357^{\circ}$.

Vermehrter äußerer Druck muß den Siedepunkt erhöhen, verminderter Druck ihn erniedrigen. In der Tat siedet z. B. Wasser auf dem Montblanc, wo ein Luftdruck von 420 mm Hg herrscht, schon bei 84° , und unter der Luftpumpe je nach der Verdünnung bei noch viel niedrigeren Temperaturen. Diese Abhängigkeit vom Druck geht noch deutlicher hervor, wenn man als Siedepunkt die Temperatur definiert, bei der die Spannung des gebildeten Dampfes, der sog. Sättigungsdruck [§ 93], den auf der Flüssigkeit lastenden (Atmosphären-) Druck überwindet. Einem geringeren Sättigungsdruck muß daher ein höherer Siedepunkt entsprechen. Andererseits kann man z. B. den Siedepunkt erhöhen, wenn man eine Flüssigkeit in einem fest verschlossenen Gefäße („PAPINScher Topf“, auch Autoklav oder Dampfkochtopf genannt) erhitzt; denn dann kann der Dampf nicht entweichen und vermehrt so den Druck im Innern des Gefäßes.

Bei Lösungen ist im allgemeinen der Siedepunkt im Vergleich zu dem des reinen Lösungsmittels erhöht; dies und die Erniedrigung des Gefrierpunktes kann man so deuten, daß die Salzmoleküle in Lösungen die freie Beweglichkeit der Moleküle des Lösungsmittels behindern. Jedenfalls ist die Gefrierpunktserniedrigung und Siedepunktserhöhung ebenso wie der osmotische Druck nicht von der Art, sondern von der Zahl der Moleküle abhängig [vgl. § 44 und 89]. Äquimolekulare Lösungen haben gleiche Siedepunktserhöhung. Auch die Siedepunktserhöhung wird in ähnlicher Weise wie die Gefrierpunktserniedrigung zur Bestimmung der Molekulargewichte benutzt.

§ 91. Siedeanomalien. Vollständig gasfreie Flüssigkeiten (z. B.

bereits mehrfach ausgekochtes Wasser und namentlich Schwefelsäure in glattwandigen Gefäßen) zeigen keine Blasenbildung beim Erhitzen (s. o.), sondern verdampfen nur von der Oberfläche aus. Sie können mehrere Grade über den Siedepunkt erhitzt werden, ohne zu verdampfen, was man Siedeverzug oder Überhitzung nennt. Die Verdampfung erfolgt in solchen Fällen plötzlich, stoßweise, namentlich bei einer kurzen Erschütterung. Hierdurch kann es zu Kesselexplosionen usw. kommen. Man beugt dem durch Hineinbringen eines rauhen bzw. pulverförmigen Körpers vor, an dem sich Gasblasen bilden.

Eine andere Siedeanomalie ist das sog. LEIDENFROSTSCHE Phänomen. Kommt eine Flüssigkeit mit sehr heißen Metallen in Berührung, so bildet sich um sie eine Dampfhülle, die ein eigentliches Sieden verhindert. Bei geringer Flüssigkeitsmenge entsteht ein flachgedrückter Tropfen, der hin und herspringt („sphäroidaler Zustand“); er ruht gewissermaßen auf einem elastischen Polster, nämlich der Dampfhülle. Erst bei genügender Abkühlung, wenn die Spannung des Dampfes so klein geworden ist, daß er das Gewicht des Tropfens nicht mehr aushält, verpufft derselbe.

§ 92. Verdunsten. Das Verdunsten ist ein spontanes Verdampfen von Flüssigkeit, das nur an der freien Oberfläche erfolgt und nicht an eine bestimmte Temperatur gebunden ist, wenn auch die Menge der verdunsteten Flüssigkeit mit der Temperatur zunimmt. Das Verdunsten verhält sich also zum Sieden etwa wie die Auflösung eines Körpers zum Schmelzen. Man kann sich hierbei vorstellen, daß an den Grenzschichten von Flüssigkeiten die Moleküle bei ihren Schwingungen in die benachbarten Luftschichten gelangen und nicht mehr zurückkehren. Bei jeder Verdunstung wird eine bestimmte Arbeit geleistet, um den äußeren Luftdruck sowie die Kohäsion zwischen den einzelnen Flüssigkeitsteilchen zu überwinden. Da die hierzu nötige Energie (Verdampfungswärme) nicht von außen (durch Erhitzen) zugeführt wird, so wird sie dem Körper selbst bzw. seiner Umgebung entzogen, deren Temperatur infolgedessen sinkt. Hierauf beruht z. B. die wohltätige Wirkung des Schweißes.

Außer der gewöhnlichen, langsamen, Verdunstung gibt es auch eine rasche, wenn z. B. eine unter höherem Druck stehende Flüssigkeit plötzlich eine Druckverminderung erfährt. Hierbei ist die Kälteentwicklung besonders stark. Fließt z. B. flüssige Kohlensäure, die in Stahlflaschen unter einem Druck von mehreren Atmosphären aufbewahrt wird, aus denselben aus, so verdunstet ein Teil der Flüssigkeit sehr rasch an der Luft und entzieht dabei dem übrigbleibenden Teil so viel Kälte, daß er zu einer schneeartigen Masse von ca. -58° erstarrt. Auf demselben Prinzip beruhen auch manche Eismaschinen.

Bei einer Art derselben wird z. B. in einem von Kühlwasser umgebenen Schlangenrohr Ammoniak mittels einer Druckpumpe verflüssigt; diese Flüssigkeit gelangt in ein zweites Schlangenrohr, wo geringerer Druck herrscht, so daß Verdunstung erfolgt. Die hierzu nötige Wärme wird einer Salzlösung entzogen, welche das zweite Schlangenrohr umgibt und ihrerseits zu einem Behälter geleitet wird, wo sich Einsatzgefäße mit Wasser befinden, welche letzteres dann gefriert.

§ 93. **Gesättigter und ungesättigter Dampf.** Läßt man in einer genügend langen, mit Quecksilber gefüllten Röhre, die unten in ein weites Gefäß mit Quecksilber eintaucht, z. B. eine bestimmte Menge Äther aufsteigen, so wird dieser in dem TORRICELLISCHEN Vakuum verdampfen. Durch die Spannung (Spannkraft bzw. Dampfdruck) des gebildeten Ätherdampfes wird die ursprünglich 760 mm hohe Quecksilbersäule nach abwärts gedrängt; ihre Höhe ist somit ein Maß für die Spannkraft des Dampfes. Die Verdampfung des Äthers hört aber bald auf, wenn nämlich die entstandenen Ätherdämpfe einen genügend großen Gegendruck auf den noch flüssigen Äther ausüben. Man sagt dann, der Raum über der Quecksilbersäule ist mit Ätherdampf gesättigt, oder auch kurz, der Ätherdampf ist gesättigt. Ein gesättigter Dampf ist demnach ein solcher, der mit der Flüssigkeit, aus der er entstanden ist, noch in Berührung ist und aus ihr nichts mehr aufnehmen kann. Sobald dieser Zustand erreicht ist, nimmt die Quecksilbersäule eine konstante Höhe an. Wird nämlich der Raum, in dem der flüssige und dampfförmige Äther ist, vergrößert, so verdampft noch ein Teil der Flüssigkeit, bis der vergrößerte Raum wieder gesättigt ist; wird er verkleinert, so wird ein Teil des Dampfes kondensiert. Stets aber bleibt die Spannung die gleiche, was eben aus der gleichbleibenden Höhe der Quecksilbersäule hervorgeht. Die Spannung eines gesättigten Dampfes (der sog. Sättigungsdruck) ist also vom Volumen unabhängig und zugleich ein Maximum (für die betreffende Temperatur). Einen größeren Druck durch Verkleinerung des Volumens zu erzielen, ist eben unmöglich, weil dann sofort ein Teil des Dampfes verflüssigt wird. Dagegen wird eine Erhöhung des Druckes herbeigeführt durch Erhitzen, indem dann neue Flüssigkeit verdampft, und zwar steigt der Druck gesättigter Dämpfe bei Temperaturerhöhung mehr an, als das GAY-LUSSACSche Gesetz besagt. Auch die Sättigungsmenge, d. h. eben die Dampfmenge, die ein Raum bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann, steigt mit der Temperatur. — Der Sättigungsdruck von Lösungen ist niedriger als der des reinen Lösungsmittels, was der bereits erwähnten Erhöhung des Siedepunktes entspricht [§ 90], und zwar ist die Abnahme proportional der Konzentration. Äquimolekulare Lösungen haben gleichen Dampfdruck [vgl. § 43].

Wird bei obigem Versuche der Raum über der Quecksilbersäule

so sehr vergrößert, daß schließlich aller Äther verdampft, so wird der Raum ungesättigt, oder, wie man gewöhnlich sagt, der Ätherdampf in jenem Raum ist ungesättigt. Charakteristisch für den ungesättigten Dampf ist also, daß er nicht mehr mit seiner Mutterflüssigkeit in Verbindung ist, die gewissermaßen das Magazin darstellt, aus dem das Sättigungsbedürfnis bei Volumschwankungen befriedigt werden kann. Man kann nun auch ungesättigten Dampf dadurch erhalten, daß man gesättigten so lange erhitzt bis alle Flüssigkeit verdampft ist. Aus diesem Entstehungsmodus ist der Name überhitzter Dampf, der identisch mit ungesättigtem Dampfe ist, verständlich. Umgekehrt kann man aus ungesättigtem Dampfe auch auf zwei Wegen gesättigten herstellen, nämlich durch Druck und durch Abkühlung. Ein ungesättigter oder überhitzter Dampf verhält sich wie ein vollkommenes Gas, gehorcht also den Gesetzen von BOYLE-MARIOTTE und GAY-LUSSAC [§ 82]. Gase kann man daher auch definieren als stark überhitzte Dämpfe. Der Druck eines ungesättigten Dampfes ist geringer als der eines gesättigten von gleicher Temperatur. —

Für Gasgemenge gilt das DALTONSche Gesetz, daß der Gesamtdruck gleich der Summe der Partialdrucke [S. 50] ist. Letztere sind unabhängig von dem Vorhandensein anderer Gase oder Dämpfe. Ein luftgefüllter Raum nimmt z. B. die gleichen Mengen Wasserdampf auf wie ein luftleerer; allerdings dauert es länger. Der Druck entspricht dann dem Druck der Luft vermehrt um den Druck des Wasserdampfes.

§ 94. **Dampfdichte.** Unter Dampfdichte (oder spezifischem Gewicht eines Dampfes) versteht man gewöhnlich das Verhältnis zwischen dem Gewicht eines Volumens Dampfes und dem Gewicht eines gleichgroßen Volumens atmosphärischer Luft bei demselben Drucke und derselben Temperatur.

1 ccm Luft wiegt bei 0° und einem Barometerdruck von 760 mm Quecksilber 0,001293 Gramm, bei einem Druck von 1 mm Quecksilber $\frac{0,001293}{760}$, bei einem Druck von b mm $\frac{0,001293 \cdot b}{760}$ Gramm. Bei t° dehnt sich das Volumen von 1 ccm auf $(1 + at)$ ccm aus [§ 82], folglich wiegt jetzt 1 ccm $\frac{0,001293 \cdot b}{760(1+at)}$ und v ccm $\frac{0,001293 \cdot b \cdot v}{760(1+at)}$ Gramm. Bezeichnet man dies Gewicht des Luftvolumens mit p' und das eines gleichen Dampfolumens mit p , so ist die Dampfdichte

$$D = \frac{p}{p'} = \frac{p \cdot 760 (1 + at)}{0,001293 \cdot b \cdot v}$$

Es handelt sich also darum, die Größen t , b , v und p zu bestimmen. p , das Gewicht des Dampfes, ist identisch mit dem Gewicht der Substanz, durch deren Verdampfung der Dampf entsteht.

Bei der Methode von GAY-LUSSAC und HOFMANN wird eine abgewogene Menge der zu untersuchenden Substanz in einem kleinen Glaszylinderchen mit Korken (der bei der Verdampfung herauspringt) in das Vakuum einer nach Kubikzentimetern graduierten Barometerröhre gebracht und dort verdampft, indem man zwischen Barometerröhre und einen sie umgebenden Glasmantel Dämpfe einer siedenden Flüssigkeit von bekanntem Siedepunkt leitet. So ist p und t bekannt; v wird an der Röhreneinteilung abgelesen, b entspricht hier der Differenz zwischen Atmosphärendruck und Höhe der Quecksilbersäule.

Bei der Methode von DUMAS bringt man die Substanz in einen Glasballon von bekanntem Volumen, der in eine feine Spitze ausgezogen ist, und verdampft sie in einem Bade von Wasser, Öl oder Chlorzink. Nach völligem Verdampfen wird die Spitze zugeschmolzen und der Ballon gewogen. So ist also v und p bekannt. b entspricht hier dem Luftdruck, t der Temperatur des Bades im Augenblicke des Zuschmelzens.

Am meisten angewandt, weil am bequemsten, ist die Luftverdrängungsmethode von VICTOR MEYER, bei der das durch die verdampfte Substanz verdrängte, also dem Dampfvolumen gleiche Luftvolumen ermittelt wird, ohne daß es dabei nötig ist, die Temperatur des Dampfes zu bestimmen.

Die Verdampfung erfolgt in dem Gefäß B (Fig. 73), das sich oben in ein Rohr R mit den Ansatzröhren M und H fortsetzt. M endigt in einer mit Wasser usw. gefüllten Wanne, unter einem ebenfalls mit Wasser gefüllten Meßzylinder C . Die zu verdampfende Substanz wird in einem Kölbchen G durch J eingeführt und ruht auf dem Glasstabe S , der in H luftdicht eingefügt und verschiebbar ist. Man bringt nun die in einem Mantel um B befindliche

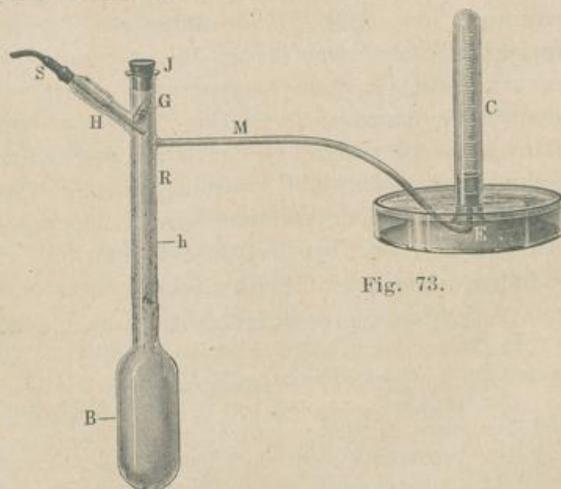


Fig. 73.

Heizflüssigkeit zum Sieden und läßt die Substanz, nachdem die Temperatur in B konstant geworden ist — es treten dann durch M keine Luftblasen mehr aus —, durch Zurückziehen des Stabes S nach B fallen. Indem sie nun hier verdampft, tritt die dem gebildeten Dampf an Volumen entsprechende Luftmenge durch M in das Meßglas C . Dieses Volumen v wird direkt an einer Teilung abgelesen. t entspricht der Temperatur des Wassers, b dem Barometerstande, von dem

natürlich der Druck der noch im Meßglas befindlichen Wassersäule abgezogen werden muß.

Die Bestimmung der Dampfdichte ist deshalb wichtig, weil man daraus die Molekulargewichte chemischer Verbindungen berechnen kann.

Nach dem Gesetz von AVOGADRO sind in gleichen Volumina aller Gase gleichviele Moleküle enthalten. Die spezifischen Gewichte gleicher Gasvolumina sind daher (wenn Temperatur und Druck gleich sind) proportional den Molekulargewichten. Bezeichnet M_x das Molekulargewicht der untersuchten Substanz, M_h das des Wasserstoffs, und ist das spezifische Gewicht der ersteren bezogen auf Luft = s , das des Wasserstoffs = 0,069, so ist

$$M_x : M_h = s : 0,069.$$

Da nun $M_h = 2$ ist, so ergibt sich

$$M_x = \frac{2s}{0,069} = s \cdot 28,8.$$

§ 95. **Kondensation.** Wie Flüssigkeiten in Dämpfe übergehen können, so ist auch der umgekehrte Vorgang möglich. Man spricht dann von Kondensation¹ oder Verflüssigung. Der Kondensationspunkt ist natürlich identisch mit dem Siedepunkt; die bei der Verflüssigung frei werdende Kondensationswärme ist gleich der latenten Verdampfungswärme [§ 90]. Zur Kondensation ist entweder Druck [§ 88] oder Kälte oder, noch besser, beides zusammen erforderlich. Heute können alle Gase verflüssigt werden, seitdem man weiß, daß diese Verwandlung stets unterhalb einer bestimmten Temperatur geschehen muß. Es ist dies die sog. kritische² Temperatur, die für jedes Gas verschieden ist. Oberhalb der kritischen Temperatur kann also ein Gas überhaupt nicht verflüssigt werden, wenn man auch noch so großen Druck anwendet. Die bei der kritischen Temperatur herrschende Dampfspannung wird kritischer Druck genannt. Dämpfe kann man als luftförmige Körper definieren, die sich (im Gegensatz zu den Gasen) unterhalb ihres kritischen Punktes befinden, also durch Druck allein kondensierbar sind.

Die kritische Temperatur beträgt z. B. für Wasserdampf +364°, Äther +197°, Kohlensäure +31°, Sauerstoff -119°, Luft -140°, Stickstoff -149°, Wasserstoff -241°, Helium -267°.

Zur Verflüssigung von Gasen, deren kritische Temperatur sehr tief ist, sind besondere Methoden erforderlich. Beim sog. Stufenverfahren wird zunächst ein Gas mit nicht zu tiefer kritischer Temperatur, z. B. Kohlensäure, durch Druck verflüssigt; hierauf wird durch Druckentlastung starke Verdunstungskälte [§ 92] erzielt, die man in Verbindung mit Druck zur Verflüssigung eines zweiten Gases mit tieferer kritischer Temperatur benutzt usf.

Viel benutzt, ev. in Verbindung mit diesem Stufenverfahren, wird neuerdings das Gegenstromverfahren von LINDE, das zuerst zur Verflüssigung der Luft angewandt wurde. Es wird hierbei durch eine Pumpe P

¹ *condenso* verdichten. — ² *criticus* entscheidend.

(Fig. 74) Luft unter einem Druck von 200 Atmosphären durch das Rohr *a* in das weitere Rohr *b* gepreßt und strömt nach Öffnung des Ventils *c* aus, wobei eine Druckentlastung und somit auch Abkühlung (vgl. § 102 Anmerkung) stattfindet. Die abgekühlte Luft strömt durch *d* in den Mantelraum *ee* und von hier aus durch *f* hindurch zur Pumpe zurück. (In Wirklichkeit sind *b* und *ee*, die in der schematischen Figur kurz und geradlinig gezeichnet sind, zwei Schlangenhohröhre von großer Länge.) Auf diese Weise werden also die durch *b* neu eintretenden Luftmengen von den durch *ee* in entgegengesetzter Richtung strömenden bereits abgekühlten Luftmengen immer wieder weiter abgekühlt, bis endlich Verflüssigung der Luft (bei ca. -190°) erfolgt. Die verflüssigte Luft fällt in die DEWARsche Flasche *G* [§ 103] hinab. Läßt man die flüssige Luft verdampfen, so entweicht zuerst Stickstoff (Siedepunkt bei $-195,6^{\circ}$) und dann erst Sauerstoff (Siedepunkt bei $-182,5^{\circ}$). Hierauf beruht ein Verfahren zur Gewinnung größerer Sauerstoffmengen aus Luft.

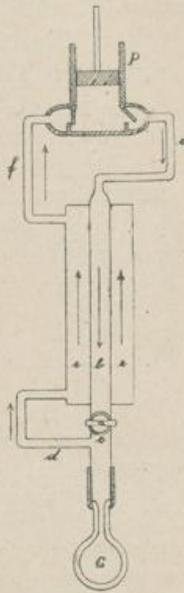


Fig. 74.

§ 96. **Hygrometrie.** Für viele Zwecke ist es nötig, den Feuchtigkeitsgehalt der Luft zu kennen, d. h. ihre Sättigung mit Wasserdampf. Man unterscheidet hierbei absolute Feuchtigkeit, d. h. die in 1 cbm Luft wirklich vorhandene Menge Wasserdampf, und relative, d. h. das Verhältnis der vorhandenen Wasserdampfmenge zu der, welche bei vollkommener Sättigung vorhanden wäre. Zuweilen drückt man die Feuchtigkeit nicht durch die Mengen des Wasserdampfes in der Luft aus, sondern durch dessen (Partial-) Druck. Da man nun Sättigungsdruck den Druck nennt, der vorhanden ist, wenn die Luft für die betreffende Temperatur mit Wasserdampf gesättigt ist [§ 93], so kann man relative Feuchtigkeit auch definieren als Quotient aus dem Dampfdruck des tatsächlich vorhandenen Wasserdampfes und dem Sättigungsdruck. Man gibt die relative Feuchtigkeit in der Regel in Prozenten an. Wärmere Luft braucht mehr Feuchtigkeit zur Sättigung als kalte. Wird daher die Luft abgekühlt, so wird sie bei einer bestimmten Temperatur (dem sogenannten Taupunkt) gerade mit Wasserdampf gesättigt sein. Bei weiterer Abkühlung kondensiert sich der Wasserdampf zu Nebel, Tau, Regen. *Reif*

Vollkommen reine Luft kann unter den Taupunkt abgekühlt werden, ohne daß Kondensation eintritt. Letztere erfolgt aber, wenn Rauch, Staubteilchen oder andere feste Körper (sog. Kondensationskerne) vorhanden sind. Als solche Kondensationskerne können auch freie Luftionen (besonders negative) wirken [vgl. § 212].

Der einfachste Feuchtigkeitsmesser, das Haarhygrometer¹ von SAUSSURE, beruht darauf, daß entfettetes Frauenhaar die Eigen-

¹ *ήγός* feucht.

*daß die Luft
oben hin
aufsteigt, mit
keiner
Wärme*

abgekühlt

schaft hat, sich durch Feuchtigkeit auszudehnen. Diese Bewegung wird hier auf einen Zeiger übertragen, der vor einer empirisch bestimmten Skala spielt. An Stelle eines Haares kann man auch Darmsaiten, Strohhalme usw. in derselben Weise benutzen.

Das Kondensationshygrometer, erfunden von DANIELL, benutzt den Taupunkt (s. o.).

Die Kugel *a* (Fig. 75) ist an der Außenseite vergoldet und halb mit Äther gefüllt; auch enthält sie ein kleines Thermometer. Sie geht über in die Röhre

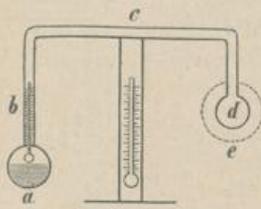


Fig. 75.

bc, die auf der anderen Seite ebenfalls mit einer Kugel *d* endigt, welche mit einem Musselinläppchen *e* umhüllt ist. Der ganze Apparat ist luftleer. Tropft man auf *c* Äther, so entsteht durch dessen Verdunstung Kälte, wodurch die Ätherdämpfe in *d* verflüssigt werden. Dies hat wieder zur Folge, daß der Äther in *a* verdampft und dadurch die Kugel *a* abkühlt. Wird die Abkühlung so stark, daß die Außenluft ihren Wasserdampf nicht mehr binden kann, so beschlägt sich *a* mit einem feinen Tau. Die Temperatur, bei der dies

geschicht, wird am Thermometer in *a* abgelesen. Den Sättigungsdruck des Wasserdampfes für diese Temperatur (der natürlich gleich ist dem Druck des bei der Lufttemperatur ungesättigten Wasserdampfes) und den Sättigungsdruck für die Lufttemperatur findet man in Tabellen; das Verhältnis beider Werte entspricht der relativen Feuchtigkeit.

Das AUGUSTSche Psychrometer¹ besteht aus zwei gleichen Thermometern, von denen das eine die Lufttemperatur angibt. Das andere ist unten mit einem Mullläppchen umhüllt, das mit einem Zipfel in Wasser taucht und so stets feucht bleibt; dieses Thermometer zeigt eine niedrigere Temperatur an, da infolge der Verdunstung des Wassers dem Thermometer Wärme entzogen wird. Je trockener nun die Luft, desto stärker die Verdunstung, desto niedriger also auch der Stand des zweiten Thermometers. Mittels besonderer Tabellen läßt sich aus beiden Temperaturen und ihrer Differenz die absolute und relative Feuchtigkeit bestimmen.

Den absoluten Feuchtigkeitsgehalt erhält man auch, wenn man ein bestimmtes Volumen Luft durch eine Röhre mit Chlorkalzium oder einer anderen hygroskopischen Substanz leitet, deren Gewichtszunahme dann direkt den Wassergehalt der Luft angibt.

§ 97. **Verwandlung von Wärme in Arbeit.** Die Ausdehnung durch Erwärmung wird in der Technik außerordentlich viel als treibende Kraft verwandt. Die betreffenden Vorrichtungen heißen **Wärme- kraft- oder kalorische Maschinen**. Bei den **Heißluftmaschinen** z. B. wird ein Kolben in einem Zylinder durch die erhöhte Spannung erhitzter atmosphärischer Luft bewegt; bei den **Gasmotoren** durch Explosion eines Gemisches von atmosphärischer Luft und Leuchtgas,

¹ ψυχρός kühl.

1) Dekompressor
2) Gießzylinder

wobei infolge der hohen Verbrennungstemperatur ein starker Überdruck entsteht; bei den Dampfmaschinen durch gespannten Wasserdampf.

Bei letzteren wird der Dampf im Dampfkessel aus Wasser gebildet; an diesem ist ein Wasserstandsmesser und ein Manometer zum Messen des Drucks, sowie ein Sicherheitsventil angebracht. Bei den Kolbendampfmaschinen gelangt der Dampf durch das Rohr *a* (Fig. 76) in den Dampfzylinder, wo er den luftdicht schließenden Kolben *e* aufwärts treibt. Ist dieser oben angelangt, so ändert durch selbsttätige Steuerung der Maschine der Schieber *g* seine Stellung so, daß er den unteren Dampfweg *c* verschließt, den oberen *f* offen läßt. Der Dampf gelangt also nun durch *f* über den Kolben und drückt ihn herunter, während der in *d* befindliche Dampf durch *e* nach *i* ins Freie gelangt. So geht das abwechselnd weiter. Die auf- und niedergehende Bewegung des Kolbens wird in eine Drehbewegung umgesetzt, indem sie durch die Pleuelstange auf ein exzentrisches Rad und durch dieses auf eine Welle übertragen wird, von der Treibriemen ausgehen. Dies ist der Typus einer Hochdruckmaschine, deren Dampf eine Spannung von über 2 (gewöhnlich 5–13) Atmosphären hat. Bei den Niederdruckmaschinen, die nur mit einer Dampfspannung von 2 Atmosphären und weniger arbeiten, wird der verbrauchte Dampf nicht direkt in die freie Luft geleitet, weil hier durch Überwindung des äußeren Luftdruckes relativ zu viel Kraft verloren ginge, sondern in ein luftleeres Gefäß, den sog. Kondensator, wo er durch eingespritztes kaltes Wasser oder durch Außenkühlung verdichtet wird.

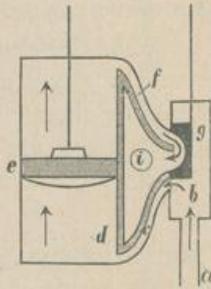


Fig. 76.

Bei den Dampfturbinen, die ähnlich gebaut sind wie die Wasserturbinen [§ 37], stößt der im Dampfkessel gebildete Dampf gegen ein Schaufelrad, so daß hier unmittelbar eine Drehbewegung erzeugt wird.

D. Spezifische Wärme.

§ 98. **Spezifische Wärme und Wärmekapazität.** Führt man verschiedenen Körpern dieselbe Wärmemenge zu, so nimmt ihre Temperatur (= Wärmezustand oder Wärmegrad) nicht gleichmäßig zu; so erwärmen sich bekanntlich Metalle leichter als Wasser. Anders ausgedrückt: Jeder Körper braucht zu einer bestimmten Temperaturerhöhung eine ganz bestimmte, von seiner Substanz abhängige Wärmemenge. Die Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 Kilogramm (bzw. 1 Gramm) eines Körpers um 1° zu erwärmen, heißt spezifische Wärme dieses Körpers. Einheit der Wärmemenge ist diejenige, welche 1 Kilogramm (bzw. 1 Gramm) Wasser von $14,5^{\circ}$ auf $15,5^{\circ}$ erwärmt; man nennt sie große (bzw. kleine) Kalorie¹ [vgl. § 78]. Da nun die als Einheit gewählte spezifische Wärme des Wassers am größten ist, wird die spezifische Wärme aller anderen festen und flüssigen Stoffe durch Bruchteile von Kalorien ausgedrückt; sie beträgt z. B. für Kupfer 0,09,

¹ Von calor Wärme. — Kal = große Kalorie, kal = kleine Kalorie.

für Petroleum 0,51 Kalorien. Um einen m kg schweren Körper, dessen spezifische Wärme c ist, um 1° zu erwärmen, ist natürlich das m fache der spezifischen Wärme erforderlich. Diese Größe, also Produkt aus Körpergewicht und spezifischer Wärme, heißt Wärmekapazität¹ des Körpers. Von den Methoden zur Bestimmung der spezifischen Wärme (Kalorimetrie) seien nur folgende genannt:

§ 99. **Mischungsmethode.** Haben zwei Mengen einer Flüssigkeit, m und m' , die Temperatur t und t' ($t > t'$), und resultiert nach ihrer Mischung die mittlere Temperatur T , so ist klar, daß die erste Substanz für die Masseneinheit die Wärmemenge $t - T$ abgegeben, die zweite $T - t'$ aufgenommen hat. Es ist also

$$m(t - T) = m'(T - t').$$

Denn angenommen, daß keine Wärme durch Strahlung verloren geht, muß die Summe der Wärme vor und nach der Mischung gleich sein. Daraus ergibt sich die Endtemperatur

$$T = \frac{m t + m' t'}{m + m'}.$$

Diese Gleichung heißt auch **RICHMANN'SCHE** Regel. Bei der Mischung zweier Flüssigkeiten von verschiedenen spezifischen Wärmen (c und c') wird die Verteilung der Wärme auch von letzteren abhängen. Es ist also

$$cm(t - T) = c'm'(T - t').$$

Ist nun Wasser eine von den beiden Flüssigkeiten, wo wird $c = 1$, und da alle anderen Größen direkt meßbar sind, erhält man daraus c' , also die spezifische Wärme der zweiten Flüssigkeit. Man kann so auch die spezifische Wärme fester und gasförmiger Körper bestimmen; letztere leitet man hierbei in Röhren durch die Flüssigkeit. Die Apparate, in denen diese Untersuchungen gemacht werden, heißen **Wasserkalorimeter**.

§ 100. **Eisschmelzungsmethode.** Da festgestellt ist, daß ca. 80 Grammkalorien nötig sind, um 1 Gramm Eis zu schmelzen, so läßt sich die spezifische Wärme eines Körpers, dessen Temperatur und Gewicht bekannt sind, leicht aus der Menge des Schmelzwassers berechnen, die in einem mit Eis gefüllten Gefäß (Eiskalorimeter) entsteht, wenn man den betr. Körper hineinhängt. Hat der Körper die Masse m , Temperatur t , spezifische Wärme c , so gibt er bei der Abkühlung auf 0° die Wärmemenge $mc t$ ab, da natürlich bei der Abkühlung die spezifische Wärme dieselbe Rolle spielt wie bei der Erwärmung. Entsteht die Menge m' von Schmelzwasser, so wurden dazu $80 m'$ Kalorien verbraucht. Es ist also $cmt = 80 m'$, folglich $c = \frac{80 m'}{m t}$.

¹ *Kapazität* = Fassungsvermögen, von *capax* in sich fassend.

Genauere Resultate gibt das BUNSENSCHE Eiskalorimeter (Fig. 77), bei dem die Menge des Schmelzwassers nicht direkt, sondern durch die eintretende Volumsdifferenz gemessen wird.

Im Raume *b* ist Wasser, das man durch rasche Verdunstung von Äther usw. in der Röhre *a* soweit abkühlt, daß es um *a* einen Eismantel bildet, dargestellt durch die punktierte Linie. Im unteren Teile von *b*, in der Röhre *c* und der damit verbundenen Kapillaren *e* ist Quecksilber, das durch die Ausdehnung des gefrierenden Wassers bei *e* ausfließt. Ist im ganzen Raume *b* eine Temperatur von 0° erzielt, was man durch Stillstehen des Quecksilberfadens erkennt, so wird nach Entfernung der Kältemischung in *a* die zu untersuchende erwärmte Substanz, deren Gewicht und Temperatur bekannt sind, gebracht. Der Eismantel schmilzt, und infolge der dabei eintretenden Volumsabnahme wird das Quecksilber in der Kapillare eine meßbare Strecke, etwa von *e* bis *d*, zurückgehen. Eine Volumsdifferenz von 0,09 ccm Quecksilber entspricht immer 1 Gramm geschmolzenen Eises.

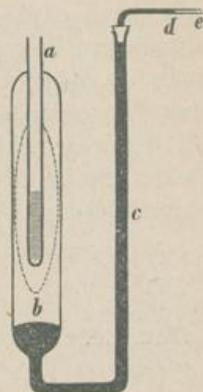


Fig. 77.

§ 101. **Atomwärme, Molekularwärme.** DULONG und PETIT fanden die merkwürdige Tatsache, daß die spezifische Wärme der Atome fester Elemente umgekehrt proportional den Atomgewichten ist. Das Produkt aus Atomgewicht und spezifischer Wärme, die sogenannte Atomwärme, ist demnach eine (annähernd) konstante Größe, nämlich ca. 6,4, und bietet ein wichtiges Hilfsmittel zur Bestimmung der Atomgewichte.

JOULE, NEUMANN und KOPP zeigten, daß auch die Molekularwärmen der festen chemischen Verbindungen, d. h. die Produkte aus Molekulargewichten und spezifischer Wärme, annähernd gleich der Summe der Atomwärmen der im Molekül vorhandenen Atome sind.

§ 102. **Spezifische Wärme der Gase.** Bei Gasen hat man zu unterscheiden zwischen der spezifischen Wärme bei gleichbleibendem Volumen, c_v , und derjenigen bei gleichbleibendem Druck, c_p . Wird z. B. in dem Gefäße *ABCD* (Fig. 78) 1 kg Luft erwärmt, wenn der Deckel *E* unbeweglich ist, so entspricht die Wärmemenge, die nötig ist, die Temperatur um 1° zu erhöhen, nach Reduktion auf die Volumeneinheit der spezifischen Wärme bei konstantem Volumen. Ist der Deckel *E* aber beweglich, so wird sich die Luft bei der Erwärmung etwa bis *E'* ausdehnen; jetzt bleibt also der Druck gleich. Da im letzteren Falle die Luft eine Arbeit leistet, indem sie den Deckel entgegen der auf ihm lastenden Atmosphäre um das Stück *CC'* hebt, muß sie eine niedrigere Temperatur als im ersten Falle haben¹.

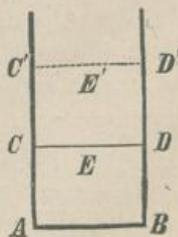


Fig. 78.

¹ Bei jeder Kompression eines Gases erwärmt sich dasselbe als Äquivalent für die zugeführte äußere Arbeit. Umgekehrt entsteht bei Ausdehnung

Anders ausgedrückt, um Luft bei gleichbleibendem Druck ebenso zu erwärmen wie dieselbe Menge bei gleichbleibendem Volumen, ist mehr Wärme nötig. Es ist also $c_p > c_v$, und $c_p - c_v$ entspricht genau der von der Luft bei der Verschiebung des Deckels geleisteten Arbeit; auf diesem Wege wurde auch von MAYER zuerst die Äquivalenzzahl zwischen Wärme und Arbeit berechnet. c_p kann man direkt finden, indem man das betr. Gas zuerst auf eine bestimmte Temperatur bringt und dann in Schlangengeräten durch ein Wasserkalorimeter leitet und weiter wie bei der Mischmethode [§ 99] verfährt. c_v kann man deshalb nicht direkt bestimmen, weil sich ja bei der Abkühlung im Kalorimeter das Volumen ändern muß. Dagegen ist das Verhältnis $\frac{c_p}{c_v} = k$ bekannt; es beträgt für alle Gase bei einem Atmosphärendruck ungefähr 1,4. Der Ausdruck \sqrt{k} ist bereits bei der Akustik [§ 71] als sogenannter LAPLACEScher Faktor erwähnt worden, mit dem die Formel für die Schallgeschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{e}{d}}$ multipliziert werden muß.

Diese Formel wäre nur richtig, wenn die an den Verdichtungsstellen der Schallwellen immer entstehende Wärme abströmen, also vernachlässigt werden könnte. Da aber Luft ein schlechter Wärmeleiter ist, da ferner die Temperaturschwankungen in den Schallwellen sehr rasch verlaufen, so ist dies hierbei nicht der Fall¹. In den Verdichtungen wird daher die elastische Spannung durch die Erwärmung noch vermehrt, in den Verdünnungen durch die Abkühlung noch mehr verringert. Dadurch findet eine Erhöhung der Schallgeschwindigkeit statt, die, wie LAPLACE zeigte, dem Faktor k entspricht. Umgekehrt kann natürlich aus einer bekannten Schallgeschwindigkeit $\frac{cp}{cv}$ gefunden werden.

Aus $\frac{cp}{cv}$ und c_p ergibt sich dann c_v .

E. Fortpflanzung der Wärme.

§ 103. **Wärmeleitung.** Die Fortpflanzung der Wärme erfolgt zum Teil derartig, daß sich die Bewegung der Moleküle direkt auf benachbarte überträgt. Dieser Modus heißt Wärmeleitung, und zwar innere, wenn es sich um die Moleküle desselben Körpers handelt,

eines Gases unter äußerer Arbeitsleistung **Abkühlung**. Wenn sich dagegen ein Gas in den luftleeren Raum ausdehnt, also keine äußere Arbeit dabei leistet, so findet keine Abkühlung statt. Letzteres gilt aber nur für „ideale“ Gase. In Wirklichkeit findet auch bei Ausdehnung eines Gases in den leeren Raum eine geringe Abkühlung statt, weil hier innere Arbeit zur Überwindung der molekularen anziehenden Kräfte geleistet wird. Dies Prinzip kommt z. B. bei der LINDESchen Maschine [§ 95] zur Geltung. — ¹ Man nennt Vorgänge, bei denen ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, so daß die Temperatur gleich bleibt, **isothermisch** [ἴσος gleich, θερμός warm]; solche, bei denen dies nicht der Fall ist, **adiabatisch** [α privativum, διαβαίω hindurchgehen].

äußere, wenn dabei die Bewegung auf einen anderen Körper übergeht. Gute Wärmeleiter sind besonders die Metalle, unter denen wieder Silber die erste Stelle einnimmt. Es ist bemerkenswert, daß der Leitungsfähigkeit für Wärme im allgemeinen die für Elektrizität proportional ist. Auf der guten Leitungsfähigkeit der Metalle beruht z. B. die DAVYSche Sicherheitslampe, eine einfache Öllampe, die von einem feinmaschigen Drahtnetz umgeben ist. Dieses entzieht den Flammgasen bei ihrem Hindurchtreten so viel Wärme, daß sie unter ihre Entzündungstemperatur abgekühlt werden; dadurch werden Explosionen vermieden, selbst wenn in der Umgebung Grubengase („schlagende Wetter“) sind. Interessant sind die Verhältnisse bei den Kristallen, deren Leitungsfähigkeit in den verschiedenen Achsen verschieden ist. Im Gegensatz zu den festen Körpern leiten flüssige und namentlich gasförmige (mit Ausnahme des auch sonst den Metallen nahe stehenden Wasserstoffes) die Wärme schlecht. So beruht z. B. die kälteschützende Wirkung der Kleider, Doppelfenster und mancher anderer schlechter Wärmeleiter (Wolle, Sägespäne, Asche usw.) auf der darin befindlichen unbewegten Luft. Der beste Wärmeisolator ist aber der luftleere Raum; man versieht daher z. B. Glasgefäße mit doppelten Wandungen, zwischen denen ein luftleerer Raum hergestellt wird. Diese sog. Vakuummantelgefäße, wozu auch die viel benutzten „Thermosflaschen“ gehören, werden dadurch noch brauchbarer, daß die innere Wand des Zwischenraumes mit einem Silber- oder Quecksilberspiegel versehen wird, wodurch auch die unsichtbaren Wärmestrahlen abgehalten werden (DEWARsche Flaschen).

§ 104. **Wärmeströmung.** In flüssigen und luftförmigen Körpern, die, wie erwähnt, ein schlechtes Wärmeleitungsvermögen besitzen, erfolgt die Fortpflanzung der Wärme hauptsächlich durch Massenverschiebung. Man spricht hier von Wärmeströmung oder **Wärme-konvektion**¹. Es geraten nämlich die erwärmten Teilchen infolge ihres veränderten spezifischen Gewichtes in Bewegung und geben die mitgeführte Wärme an andere Teilchen ab. So werden beim Kochen des Wassers die untersten Schichten zuerst erwärmt, steigen als spezifisch leichtere Teilchen auf und werden durch andere Teilchen ersetzt, bei denen sich der Vorgang wiederholt [vgl. §§ 84, 86]. Auf Konvektion beruht auch die Zentralheizung mit Wasser, Luft bzw. Wasserdampf.

§ 105. **Wärmestrahlung.** Die dritte Art der Wärme Fortpflanzung geschieht durch Strahlung. Man hat sich vorzustellen, daß durch die Bewegung der Körpermoleküle, auf der ja die Wärme beruht, auch die zwischen ihnen befindlichen **Äthermoleküle** in Schwingungen

¹ *convectio*, das Zusammenfahren, Fortschleppen.

geraten und diese dem angrenzenden Äther mitteilen, der sie in Form von transversalen Wellen (20—400 Billionen in 1 Sekunde bei dunklen Wärmestrahlen) zu anderen Körpern fortleitet, wo sie wieder in Bewegung materieller Teilchen umgewandelt werden. Dies geht u. a. daraus hervor, daß die strahlende Wärme auch durch den sog. leeren Raum geht, in dem ja keine Wärmeleitung stattfindet, und daß die Schicht zwischen Wärmequelle und erwärmtem Körper ganz kalt sein kann. So ist z. B. auf hohen Bergen die Temperatur des Bodens bedeutend höher als die der Luft. Die Wärmestrahlen unterscheiden sich von den Lichtstrahlen durch ihre größere Wellenlänge; sie entsprechen hauptsächlich dem ultraroten Teile des Spektrums [§ 135]. Zum Studium der Wärmestrahlen benutzt man u. a. den LESLIE'schen Würfel, d. i. ein hohler, mit heißem Wasser usw. gefüllter Blechwürfel, dessen eine Seite mit Ruß geschwärzt, die zweite weiß angestrichen, die dritte blank poliert, die vierte rauh gemacht ist.

Die Fähigkeit, Wärme auszustrahlen (Emissionsvermögen), ist im allgemeinen um so größer, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung und je rauer die Oberfläche ist; auch die Natur der Körper ist von Einfluß. Wenn Wärmestrahlen auf einen Körper fallen, so werden sie entweder zurückgeworfen (reflektiert), oder sie dringen in ihn ein. In letzterem Falle werden sie entweder verschluckt (absorbiert), oder sie gehen unverändert durch. Gewöhnlich findet alles dieses zusammen statt, jedoch eins vornehmlich. Je nachdem Körper Wärmestrahlen ungehindert hindurchlassen oder aber sie absorbieren, wobei sie selbst erwärmt werden, heißen sie diatherman¹ (wärmedurchlässig), oder atherman (wärmeundurchlässig). Trotz der nahen Verwandtschaft zwischen Licht und Wärme sind nun keineswegs alle durchsichtigen Körper auch in hohem Grade diatherman und umgekehrt. Am meisten diatherman ist Steinsalz, sehr wenig z. B. Alaun und Wasser. Ferner ist z. B. die Diathermanität des durchsichtigen Bergkristalls gleich der des wenig durchsichtigen Rauchtropases. Wie man nun Licht in verschiedene Farben zerlegen kann, die durch Körper in verschiedenem Maße gehen, so kann auch Wärme durch ein Steinsalzprisma in Strahlen von verschiedener Wellenlänge zerlegt werden. Wie nun durchsichtige farbige Körper nur gewisse Lichtstrahlen durchlassen, ist auch die Durchlässigkeit mancher Körper für die verschiedenen Arten von Wärmestrahlen verschieden. Man nennt diese Eigenschaft Wärmefärbung oder Thermochrose². KIRCHHOFF zeigte, daß ein Körper die Strahlen am stärksten absorbiert, die er selbst am stärksten aussendet, wenn er wärmer ist als seine Umgebung. Hierauf soll bei

¹ δία durch, θερμη Wärme. — ² χρομα Farbe.

der Optik näher eingegangen werden, ebenso wie auf die Erscheinungen der Brechung, Polarisation und Interferenz der Wärmestrahlen, welche genau den Verhältnissen beim Lichte entsprechen.

Optik.

A. Ursprung und Ausbreitung des Lichtes.

§ 106. **Natur des Lichtes.** Unter Licht versteht man einmal die subjektive Empfindung der Helligkeit, welche durch verschiedene Reize des Sehnerven und der Sehzentra, z. B. durch Elektrizität, Blutdruckschwankungen usw. hervorgebracht wird, dann aber besonders — im physikalischen Sinne ausschließlich — das Agens selbst, welches diese Empfindung unter normalen Verhältnissen auslöst. Über die Natur dieses letzteren bestehen verschiedene Ansichten. Nach der Emanations- oder Emissionstheorie¹ NEWTONS ist das Licht ein äußerst feiner Stoff, der von den leuchtenden Körpern ausgesandt wird. Nach der jetzt fast allgemein angenommenen Undulationstheorie² von HUYGENS entsteht es ebenso wie Wärme durch außerordentlich schnelle Schwingungen der Körpermoleküle, die durch transversale Ätherschwingungen fortgepflanzt werden [vgl. § 105]. Die moderne elektromagnetische Lichttheorie ist in § 218 erwähnt.

§ 107. **Lichtquellen.** Die Verwandtschaft zwischen Wärme und Licht zeigt sich z. B. darin, daß durch genügende Wärmezufuhr Körper leuchtend werden. So wird ein Platindraht durch Erhitzen rot- und schließlich weißglühend. Auch das elektrische Glühlicht ist durch vermehrte Wärmeentwicklung des elektrischen Stromes zu erklären. So ist auch verständlich, daß die größte Wärmequelle, die Sonne, zugleich die stärkste Lichtquelle vorstellt. Alle derartigen Körper, deren Moleküle also so schnell schwingen, daß die von ihnen ausgehenden Ätherwellen (400—800 Billionen in 1 Sekunde) als Licht empfunden werden [vgl. § 135], heißen selbstleuchtend. Von Himmelskörpern gehören außer der Sonne nur noch die Fixsterne dazu, während z. B. die Planeten nur dadurch sichtbar sind, daß sie das Sonnenlicht reflektieren. Besonders stark wird die Lichtentwicklung, wenn mit der Erwärmung auch eine lebhafte Oxydation (Verbrennung) Hand in Hand geht. Brennende Gase haben übrigens nur ein geringes Leuchtvermögen, das aber durch suspendierte feste Partikelchen bedeutend erhöht wird. So beruht die Helligkeit einer Gas-

¹ *emano* ausfließen, *emitto* aussenden. — ² *undulatus* wellenförmig.

flamme auf den weißglühenden Kohlenstoffteilchen [vgl. Bunsenbrenner § 52]. Manche Körper senden aber schon bei gewöhnlicher oder nicht sehr erhöhter Temperatur Licht aus (Lumineszenz¹). Hierher gehört das durch Oxydationsprozesse bedingte Leuchten gewisser niederer Tiere und Pflanzen (z. B. Meerleuchten, Glühwürmchen, faulendes Holz) sowie des Phosphors. Man faßt speziell die erwähnten Erscheinungen unter dem Namen Phosphoreszenz² zusammen, bezeichnet aber in der Physik mit diesem Namen auch das Nachleuchten gewisser Körper, nachdem sie einer starken Belichtung ausgesetzt waren [vgl. § 137].

§ 108. **Ausbreitung des Lichtes. Schatten.** Das Licht breitet sich im allgemeinen von einem leuchtenden Punkte nach allen Seiten hin geradlinig [vgl. aber § 140] und mit gleichmäßiger Geschwindigkeit aus. Treffen dabei die Lichtstrahlen auf einen Körper, so werden sie entweder zurückgeworfen (reflektiert) oder verschluckt (absorbiert), oder gehen endlich durch ihn hindurch, indem sie dabei eine Ablenkung (Brechung) erfahren. Auf der Reflexion beruht der Glanz der Körper und die Spiegelung, auf der Absorption die Farbe, Erwärmung und chemische Veränderung, auf dem Durchgang des Lichtes die Durchsichtigkeit der Körper. In dünnen Schichten sind alle Körper durchsichtig oder wenigstens durchscheinend, umgekehrt vermindert zunehmende Dicke die Durchsichtigkeit.

Da ein undurchsichtiger Körper die Ausbreitung des Lichtes stört, muß hinter ihm eine Schattenszone entstehen. Bei einer gewissen Größe der Lichtquelle unterscheidet man die Zone des Kernschattens *acb* (Fig. 79), die gar kein Licht erhält, von der des Halbschattens *dacbe*, die teilweise beleuchtet wird. Die Form beider

ist durch die geradlinige Ausbreitung des Lichtes bedingt. Ebenso beruht darauf die Erscheinung in der optischen Kammer (auch Lochkamera genannt). Dringt nämlich Licht von einem

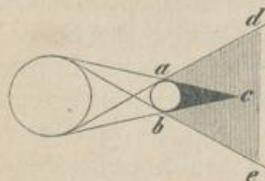


Fig. 79.

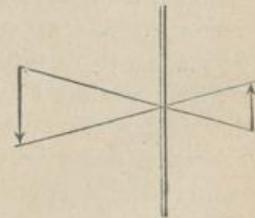


Fig. 80.

ein kleines Loch in einen dunklen Raum, so entsteht auf einer gegenüberstehenden Wand ein umgekehrtes Bild desselben (Fig. 80).

§ 109. **Intensität des Lichtes.** Wie für jede Wellenbewegung gilt auch für das Licht der Satz, daß die Intensität umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung ist [§ 56]. Darauf beruhen die Photo-

¹ *luminesco* leuchten. — ² *φωσφόρος* Lichtträger.

meter¹, Apparate zur Messung der Lichtstärke, worunter man die Gesamtheit des von einer Lichtquelle ausgehenden Lichtes versteht. Denn aus der leicht zu messenden Entfernung, die zwei Lichtquellen haben müssen, um dieselbe Wirkung zu erzielen, ist nach diesem Gesetze das Verhältnis ihrer Intensität ohne weiteres zu berechnen. Bei dem RUMFORDSchen Photometer werden die beiden zu vergleichenden Lichtquellen so aufgestellt, daß die von ihnen auf einen Schirm geworfenen zwei Schatten eines Stabes gleich dunkel sind. Das sehr zweckmäßige Fettfleckphotometer von BUNSEN beruht darauf, daß ein Fettfleck auf Papier im durchfallenden Lichte hell, im auffallenden dunkel erscheint und ganz verschwindet, wenn die auf entgegengesetzten Seiten stehenden Lichtquellen gleiche Wirkung ausüben. Als (willkürliche) Einheit der Lichtstärke, gewöhnlich als HEFNER-Kerze (HK), auch Kerze schlechtweg bezeichnet, benutzt man das Licht der v. HEFNER-ALTENECKSchen mit Amylacetat gespeisten Lampe bei 40 mm Flammenhöhe. Unter Beleuchtungsstärke versteht man die auf die Flächeneinheit (1 qcm) fallende Lichtstärke. Einheit ist die Meterkerze oder Lux², d. h. die Lichtmenge, die von einer Normalkerze auf die im senkrechten Abstand von 1 m befindliche Flächeneinheit fällt. In diesem Maße drückt man die „indizierte Helligkeit“ aus, d. i. die Helligkeit an einem gegebenen Punkte. Beim Lesen soll die indizierte Helligkeit etwa 50 Meterkerzen betragen.

Die ganze Photometrie hat den Mangel, daß es eine absolute Einheit der Lichtintensität noch nicht gibt, und daß sie ferner auf die subjektive Empfindung des Beobachters angewiesen ist. Nun hat aber selbst bei ein und demselben Beobachter die Pupille bei verschiedener Lichtstärke nie dieselbe Weite, es werden also nie gleichgroße Netzhautflächen getroffen.

§ 110. Lichtgeschwindigkeit. Das Licht pflanzt sich mit großer Schnelligkeit fort. Es durchläuft in 1 Sekunde ca. 300000 km oder 40000 Meilen. Die erste Bestimmung rührt von OLAF RÖMER her.

Befindet sich die Erde zwischen Sonne und Jupiter, etwa in *E* (Fig. 81), so ist das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verfinsternungen eines der vier Jupitermonde stets gleich, nämlich 42 ½ Stunden. RÖMER hatte auf Grund dieser Beobachtung die Verfinsternungen für längere Zeit voraus berechnet; als nun die Erde inzwischen auf ihrer Bahn nach *E*² gekommen war, trat die Verfinsternung ca. 1000 Sekunden später ein, als berechnet. Dies kann nur darauf beruhen, daß das Licht jetzt 1000 Sekunden mehr braucht, um zur Erde zu gelangen, die jetzt um den Durchmesser der Erdbahn,

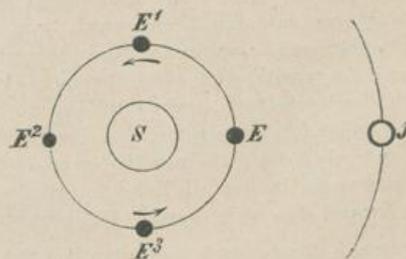


Fig. 81.

*Merkur
Venus
Erde
Mars
Jupiter
Saturn
Uranus
Neptun*

¹ *φως* Genitiv *φωτός* Licht; *μέτρον* Maß. — ² *lux* Licht.

296300000 km, weiter vom Jupiter entfernt ist als im ersten Falle. Die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich dann nach der Formel $v = \frac{s}{t}$ zu 296300 km in 1 Sekunde.

Ein gleiches Resultat erhält man nach der Methode von BRADLEY, die auf der Aberration¹ des Lichtes der Fixsterne beruht.

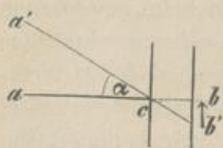


Fig. 82.

Stände nämlich die Erde still, so würde das Licht des Fixsterns *a* (Fig. 82) in gerader Linie die Netzhaut des Beobachters, etwa in *b*, treffen. Da sich aber die Erde (in der Richtung des Pfeils) fortbewegt, während das Licht von der vorderen bis zur hinteren Fläche des Auges geht, so fällt der Strahl nach *b'*. Der Stern wird also in der Verlängerung von *b'c*, etwa in *a'* gesehen, macht daher die scheinbare Bewegung (Aberration) von *a* nach *a'*. Mithin legt das Licht den Weg *cb* in derselben Zeit zurück, wie die Erde den Weg *b'b*. Es ist also v' (Geschwindigkeit des Lichtes): v (Geschwindigkeit der Erde) = $cb:b'b = \cotg \alpha$. v beträgt ca. 30 km; α , der sogenannte Aberrationswinkel, 20,45"; daraus läßt sich v' berechnen.

FIZEAU gelang es dann auch, die Lichtgeschwindigkeit auf der Erde selbst zu bestimmen.

Er ließ durch eine in einem Fernrohr *L* (Fig. 83) 45° zu dessen Achse geneigte unbelegte, also durchsichtige, Glasplatte *s* ein seitlich von *q* kommendes Lichtbündel so reflektieren, daß es in die Achse des Fernrohres fiel und durch die Lücken eines daselbst befindlichen exzentrisch angebrachten Zahnrades *rr* hindurch zu einem ca. 8 $\frac{1}{3}$ km entfernten Fernrohr *L'* sich fortpflanzte, in diesem an einem Spiegel *p* reflektiert wurde, wieder durch die Zahn-

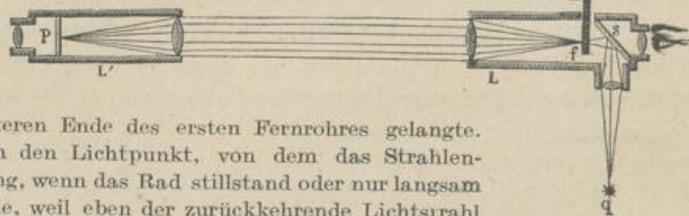


Fig. 83.

lücken hindurchging und schließlich ins Auge des Beobachters am hinteren Ende des ersten Fernrohres gelangte. Letzterer sah den Lichtpunkt, von dem das Strahlenbündel ausging, wenn das Rad stillstand oder nur langsam gedreht wurde, weil eben der zurückkehrende Lichtstrahl das Rad passierte, bevor ein Zahn an die Stelle der vorangehenden Lücke getreten war. Drehte man aber das Rad so rasch, daß die Zeit eines Hin- und Herganges der Lichtstrahlen genau der Zeit entsprach, in der ein Zahn an Stelle der vorangehenden Lücke trat, so verschwand der Lichtpunkt. Bei einem Rad mit 720 Zähnen und 720 Lücken geschah dies bei 12,5 Umläufen in 1 Sekunde. Diese Zeit betrug somit $\frac{1}{1440 \cdot 12,5} = \frac{1}{18000}$ Sekunde; in dieser Zeit legte das Licht die Entfernung 16 $\frac{2}{3}$ km zurück, woraus sich eine Geschwindigkeit zu $18000 \cdot 16 \frac{2}{3} = 300000$ km ergab.

¹ *aberro* abirren, abweichen.

B. Reflexion des Lichtes (Katoptrik¹).

§ 111. **Allgemeine Gesetze der Reflexion.** Körper mit rauhen Oberflächen zerstreuen das auf sie fallende Licht nach allen Seiten („diffuse Reflexion“) und werden dadurch selbst sichtbar (z. B. Mond, Planeten usw.). Ihnen gegenüber stehen die Spiegel, glatte Flächen, welche ein Bild des lichtaussendenden Körpers entwerfen. Unter Bild eines Punktes versteht man nämlich den Punkt, an dem die von jenem ausgehenden Lichtstrahlen sich wieder vereinigen. Da ein Gegenstand aus vielen Punkten zusammengesetzt gedacht werden kann, ist die Größe seines Bildes durch die Bilder seiner äußersten Punkte bestimmt. Wenn sich nun die Lichtstrahlen wirklich vor dem Spiegel schneiden, so daß das Bild auch objektiv nachzuweisen ist, indem man es z. B. auf einem Schirm auffängt, so heißt es **reell**. Vereinigen sich aber die Strahlen nicht wirklich, sondern liegt der Punkt, von dem sie scheinbar ausgehen, hinter dem Spiegel, so heißt das Bild **virtuell²** oder **imaginär**. Ein solches, wie es z. B. Planspiegel liefern, kann man natürlich nicht auffangen. Reelle Bilder sind stets umgekehrt, virtuelle aufrecht. Betreffs der Spiegel sei noch bemerkt, daß die gewöhnlichen Spiegel so hergestellt werden, daß eine Glasplatte auf der Rückseite mit einer Schicht von Zinnamalgam belegt wird. Weil aber sowohl an dieser wie an der Vorderfläche Reflexion stattfindet, sind Metallspiegel vorzuziehen. — Die Hauptsätze der Reflexion sind noch einmal folgende [vgl. § 63]:

1) Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene („Einfallsebene“).

2) Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

§ 112. **Ebene Spiegel (Planspiegel³).** Ebene spiegelnde Flächen erzeugen Bilder, die dem Gegenstand symmetrisch sind und so weit hinter dem Spiegel liegen, wie der Gegenstand vor ihm. Dieselben sind also virtuell.

Der vom Gegenstand a (Fig. 84) ausgehende Strahl ab wird nämlich am Spiegel in der Richtung bc reflektiert. Verlängert man den auf MN senkrechten „Hauptstrahl“ aN über N , und cb über b , bis sie sich in a' schneiden, so sind die rechtwinkligen Dreiecke abN und $a'bN$ kongruent (da $\angle a'bN = \angle Mbc$, und dieser nach § 63 = $\angle abN$). Folglich $aN = a'N$. Dasselbe gilt auch für Strahl ade . Daraus folgt, daß die Rückwärtsverlängerung aller Strahlen durch a' geht.

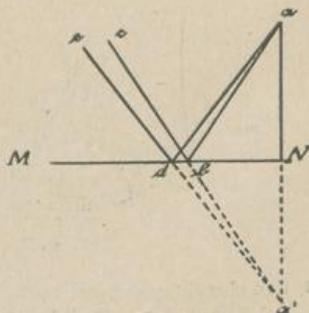


Fig. 84.

¹ *κατοπτρικός*; zu einem Spiegel (*κατοπτρον*) gehörig. — ² *virtus* Kraft, Wirkung; also Phänomene, die wie Bilder wirken, ohne durch Vereinigung von Lichtstrahlen entstanden zu sein. — ³ *planus* eben.

Ein Auge in c bzw. e erblickt also den Gegenstand a , wenn es in die Richtung cb bzw. ed sieht¹, und zwar in a' . Aus derselben Figur geht auch hervor, daß beim Planspiegel die gegenseitige Lage der Lichtstrahlen nicht geändert wird. Divergierende Strahlen z. B. bleiben divergent.

Anwendung finden Planspiegel, um Lichtstrahlen eine andere Richtung zu geben. Man kann durch sie „um die Ecke“ sehen. Ihre Verwendung zu den wichtigen Spiegelablesungen beruht darauf, daß die Winkelgeschwindigkeit des reflektierten Strahls doppelt so groß ist wie die des Spiegels selbst. Ist also z. B. an einer Magnet-

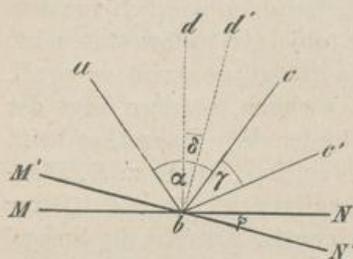


Fig. 85.

nadel ein kleiner Spiegel befestigt, auf den Licht fällt, so lassen sich auch kleine Ausschläge durch die doppelt so großen Exkursionen des reflektierten Strahls leicht erkennen.

Es sei (Fig. 85) MN die ursprüngliche Lage des Spiegels, ab der einfallende, bc der reflektierte Strahl, bd das Einfallslot. Wird MN um φ in die neue Lage $M'N'$ gedreht, so bewegt sich das Einfallslot um $\angle \delta = \varphi$, der reflektierte Strahl um $\angle \gamma$.

Bezeichnet man $\angle abc$ mit α , so ist $\angle \delta = \angle abd' - \angle abd = \frac{\alpha + \gamma}{2} - \frac{\alpha}{2} = \frac{\gamma}{2}$

Ähnlich ist das Prinzip des Spiegelsextanten, welcher dazu dient, den Winkel zu messen, den zwei Gegenstände mit dem Auge des Beobachters bilden, ohne daß dieser fest zu stehen braucht. Er ist daher z. B. unentbehrlich für die See.

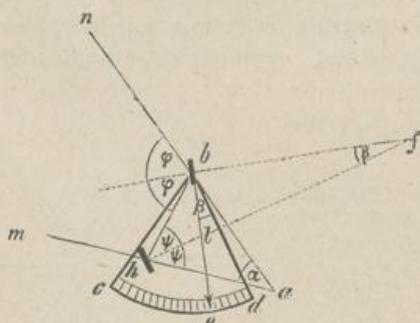


Fig. 86.

Es seien z. B. m und n (Fig. 86) zwei Sterne, deren Schwingel α gemessen werden soll. m kann von dem Auge in a über den feststehenden, bd parallelen, Spiegel h hinweg direkt gesehen werden. Dann wird der Zeiger be und dadurch auch der an ihm bei b befestigte Spiegel so gedreht, daß die von n ausgehenden Strahlen nach zweimaliger Reflexion an den Spiegeln in b und h ebenfalls nach a gelangen. Der an der Skala cd direkt ablesbare Winkel

β , den der Zeiger dabei zurückgelegt hat, ist nun gleich der Hälfte des gesuchten Schwingels α . Errichtet man nämlich in b und h die Einfallslote und ver-

¹ Erfahren die von einem Gegenstand ausgehenden Lichtstrahlen durch Spiegelung oder Brechung eine Richtungsänderung, so wird der Gegenstand nicht an seinem wirklichen Platze gesehen, sondern in die Richtung der ins Auge gelangenden Strahlen projiziert [vgl. §§ 116, 119].

längert sie bis zum Schnittpunkte in f , so ist zunächst $\angle hfb = \beta$, weil beide $\angle flb$ zu einem Rechten ergänzen. Ferner ist $\angle q = \beta + \psi$, $\angle 2q = \alpha + 2\psi$. Daraus folgt $\alpha = 2\beta$.

§ 113. **Sphärische Spiegel.** Den Planspiegeln stehen die gekrümmten gegenüber, die entweder konkav (Hohlspiegel) oder konvex sind. Hier sollen nur die kugelförmig gekrümmten (sphärischen) betrachtet werden (Fig. 87—89). Der Mittelpunkt C der Kugel, zu welcher ein solcher Spiegel (SS') vervollständigt werden kann, heißt geometrischer oder Krümmungsmittelpunkt, die Mitte O der spiegelnden Fläche optischer Mittelpunkt oder Scheitel, die Verbindungslinie beider Hauptachse. Jeder Strahl, der durch den geometrischen Mittelpunkt geht, also auch die Hauptachse, heißt Hauptstrahl und wird in sich reflektiert, weil er ja als Radius senkrecht auf dem betreffenden Teil des Spiegels steht. Alle Strahlen parallel der Hauptachse gehen nach der Reflexion durch den sog. Brennpunkt (Focus) F , der in der Mitte zwischen optischem und geometrischem Mittelpunkte liegt. Mittels dieser beiden Sätze lassen sich alle Bilder konstruieren. Der Bildpunkt von B liegt z. B. dort, wo sich die Linien BC und NF bzw. ihre Verlängerungen schneiden. Bezeichnet man nun die Entfernung eines Gegenstandes vom Spiegel mit g , die seines Bildes mit b , die des Brennpunktes (die sog. Brennweite) mit f , so gilt ganz allgemein das Gesetz:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Ferner verhält sich die Größe des Bildes zu der des Gegenstandes wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

§ 114. **Bilder der Konkavspiegel.** Aus dem Spiegelgesetz ergibt sich sofort, daß das Bild eines unendlich fernen Gegenstandes im Brennpunkte liegen muß. Denn dann ist $\frac{1}{\infty} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, folglich $b = f$.

Daraus folgt, daß Hohlspiegel als Brennspiegel wirken können, indem sie die Strahlen der Sonne im Brennpunkte konzentrieren. Umgekehrt hat ein Gegenstand im Brennpunkt sein Bild in der Unendlichkeit, d. h. die von ihm ausgehenden Strahlen verlassen den Spiegel nach der Reflexion in paralleler Richtung. Hierauf beruht die Anwendung von Hohlspiegeln in Leuchttürmen usw. Ist der Gegenstand zwischen Unendlichkeit und geometrischem Mittelpunkt, so liegt das Bild zwischen diesem und dem Brennpunkte (Fig. 87). Auch hier ist wieder die Umkehrung möglich. Überhaupt sind Bild und Gegenstand stets konjugiert¹, d. h. sie können miteinander

¹ *conjungo* miteinander verbinden.

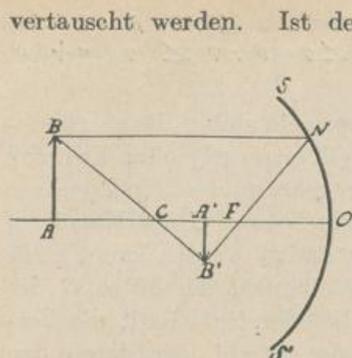


Fig. 87.

vertauscht werden. Ist der Gegenstand im geometrischen Mittelpunkt, so muß auch das Bild dort liegen und gleichgroß sein. In diesen fünf ersten Fällen handelt es sich stets um reelle Bilder, deren Größe nach dem oben Gesagten leicht zu finden ist. Es zeigt sich, daß, je näher der Gegenstand an den Spiegel heranrückt, das Bild sich um so weiter vom Spiegel entfernt. Rückt nun der Gegenstand in die Brennweite hinein, liegt er also zwischen Spiegel- und Brenn-

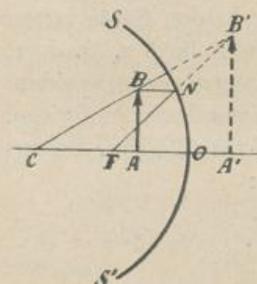


Fig. 88.

punkt, so muß das Bild gewissermaßen über die Unendlichkeit hinausgehen, d. h. es wird negativ und erscheint auf der anderen Seite des Spiegels. In diesem einen Falle geben also Hohlspiegel virtuelle Bilder. Dieselben sind aufrecht und vergrößert, da sie ja weiter vom Spiegel entfernt sind als der Gegenstand (Fig. 88). Darauf beruht die Anwendung von Hohlspiegeln als Barbierspiegel usw. Je mehr sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite dem Spiegel nähert, desto mehr nähert sich auch das Bild dem Spiegel und wird dabei kleiner, bis es unmittelbar am Spiegel gleichgroß wie der Gegenstand wird.

§ 115. **Bilder der Konvexspiegel.** Konvexspiegel erzeugen stets virtuelle, aufrechte, verkleinerte Bilder (Fig. 89), die um so kleiner sind, je weiter der Gegenstand vom Spiegel entfernt ist. Die Konstruktion der Bilder erfolgt in analoger Weise wie bei Konkavspiegeln. Den Bildpunkt B' von B (Fig. 89) findet man z. B., indem man einmal die Verbindungslinie zwischen B und C zieht, und zweitens den achsenparallelen Strahl BN , der am Spiegel in der Richtung des Pfeils so reflektiert wird, als ob er vom Brennpunkt F käme. Die Vereinigung beider Strahlen in B' ist daher nur eine scheinbare. Nähert sich der Gegenstand dem Spiegel von der Unendlichkeit bis zur Berührung, so bewegt sich das Bild von F

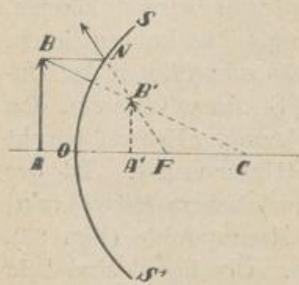


Fig. 89.

Unendlichkeit bis zur Berührung, so bewegt sich das Bild von F

nach O zu und wächst dabei von unendlich klein bis fast zur Gegenstandsgröße. Da hier Bild- und Brennweite negativ sind, so nimmt das Spiegelgesetz die Form an $\frac{1}{g} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}$, oder anders geschrieben

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{g} = \frac{1}{f}.$$

Daraus folgt $b < g$, d. h. das Bild ist stets dem Spiegel näher als der Gegenstand, mithin auch kleiner, was eine Bestätigung des oben Gesagten bildet.

C. Brechung des Lichtes (Dioptrik¹).

§ 116. **Allgemeine Gesetze der Brechung.** Unter Brechung des Lichtes versteht man die Ablenkung, die ein Lichtstrahl erfährt, wenn er in ein Medium von anderer Dichte dringt. Es gelten hierbei die Gesetze [vgl. § 63]:

1) Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.

2) Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels für je 2 Medien in einem konstanten Verhältnis (Gesetz von SNELLIUS).

Das Verhältnis zwischen dem Sinus des Einfallswinkels α im Medium a und dem Sinus des Brechungswinkels β im Medium b heißt Brechungsverhältnis (oder -exponent, -quotient, -koeffizient, -index) und wird mit n bezeichnet. Es ist also $\sin \alpha : \sin \beta = n$. Dieses Brechungsverhältnis ist nur von der Natur der beiden Medien und der dadurch bedingten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in ihnen, aber nicht von der Größe des Einfallswinkels abhängig². Geht Licht aus einem Stoff in einen anderen über, so spricht man von relativem, geht es aber aus dem leeren Raum in einen Stoff über, von absolutem Brechungsverhältnis. Wenn man sagt, ein Körper hat den Brechungsexponenten n , so versteht man darunter den absoluten Brechungsexponenten bzw. in der Praxis das damit fast übereinstimmende Brechungsverhältnis beim Übergang des Lichts aus Luft in diesen Körper. Je größer also der Brechungsexponent eines Mediums ist, desto stärker wird das Licht in ihm ge-

¹ *διοπτρικός* auf das Durchsehen bezüglich. — ² Auch die Farbe bzw. Wellenlänge des Lichtes kommt hierbei noch in Betracht. Kurzwellige, z. B. violette, Strahlen werden unter sonst gleichen Verhältnissen stärker gebrochen als langwellige, z. B. rote [vgl. § 129]. Als mittleren Brechungsexponenten bezeichnet man das Brechungsverhältnis für gelbe Strahlen von der Wellenlänge $0,59 \mu$ [vgl. § 135].

brochen, desto „optisch dichter“ ist er¹. Luft hat z. B. den Brechungs-exponenten 1, Wasser 1,3, Glas und Öl 1,5. Die stärkere Brechung des Lichts in einem dichteren Medium beruht eben darauf, daß in einem solchen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit kleiner wird² [vgl. §§ 61, 63]. Es wird hier also $\sin \alpha > \sin \beta$ und $n > 1$. Mit anderen Worten, der Lichtstrahl wird im dichteren Medium dem Einfallslot zu gebrochen. Beim Übergang des Lichts in ein dünneres Medium liegen diese Verhältnisse umgekehrt. Und zwar hat das Brechungsverhältnis zwischen einem Medium a und einem Medium b genau den reziproken Wert wie zwischen b und a . Geht also z. B. Licht aus Luft in Wasser, so ist $n = 4/3$, geht es umgekehrt aus Wasser in Luft, so ist $n = 3/4$. Für Luft/Glas ist $n = 3/2$, für Glas/Luft ist $n = 2/3$. Brechung findet aber nur bei schräg auffallenden Strahlen statt; senkrecht auffallende gehen ungebrochen weiter.

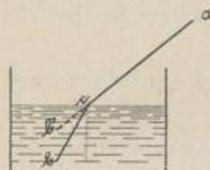


Fig. 90.

Auf der Brechung beruht es z. B., daß Gegenstände im Wasser der Oberfläche näher zu liegen scheinen. Wenn nämlich von b (Fig. 90) Strahlen ausgehen, die nach der Brechung an der Oberfläche des Wassers in das Auge bei a fallen, so wird b in b' gesehen, weil Gegenstände immer in der Blickrichtung, hier also ac , projiziert werden. Eben-so erscheinen durch Brechung in den verschieden dichten Luftschichten entfernte Gegenstände höher, ja sie werden unter Umständen sichtbar, selbst wenn sie unter dem Horizonte liegen (z. B. die Sonne). Auf gleichen Ursachen

beruhen zum Teil die Fata morgana genannten Luftspiegelungen.

§ 117. **Totale Reflexion.** Beim Übergange aus einem dichteren in ein dünneres Medium ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel. Fallen die Strahlen

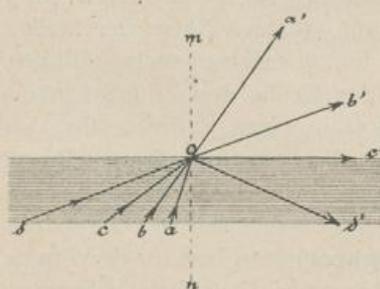


Fig. 91.

schräg genug auf die Grenzfläche, so wird also der gebrochene Strahl parallel der Oberfläche verlaufen, z. B. coc' (Fig. 91), ja sogar vollständig in das alte Medium zurückkehren müssen, z. B. dod' . Diese Erscheinung heißt totale Reflexion. Da hierbei kein Licht durch Absorption oder Lichtdurchtritt verloren geht, so ist klar, daß total reflek-

tierende Flächen undurchsichtig sind, stark glänzen und die voll-

¹ Ein optisch dichteres Medium ist in der Regel auch dichter im mechanischen Sinne. Doch gibt es auch Ausnahmen; so ist z. B. Benzol stärker lichtbrechend als Wasser, trotzdem sein spezifisches Gewicht kleiner ist. — ² FOUCAULT bewies dies auch experimentell und widerlegte damit die Emanationstheorie. Denn NEWTON hatte in der Annahme, daß sein Leuchtstoff nach dem Gravitationsgesetze von dichteren Körpern stärker angezogen würde, theoretisch das

kommensten Spiegel darstellen. Für Wasser und Luft beträgt der sogenannte Grenzwinkel der Brechung, d. i. derjenige, von dem an totale Reflexion stattfindet, ca. 48° , für Glas und Luft ca. 41° . Bei optischen Instrumenten wird vielfach die totale Reflexion an rechtwinkligen Prismen [§ 119] benutzt, um Lichtstrahlen ohne Lichtverlust abzulenken. Geht ein Lichtstrahl senkrecht durch die eine Kathete eines solchen „Reflexionsprismas“ (Fig. 92), so trifft er die Hypotenuse unter einem Winkel von 45° , der also größer ist als der Grenzwinkel; daher erfolgt eben totale Reflexion [vgl. § 127].

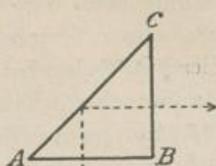


Fig. 92.

§ 118. **Brechung durch planparallele Platten.** Geht Licht durch einen Körper, der von parallelen Flächen begrenzt ist und beiderseits an dasselbe (dünnere) Medium stößt, so werden die Strahlen an der Vorderfläche um ebensoviel dem Einfallslotte zu, wie an der Rückfläche von ihm ab gebrochen. Sie behalten also ihre ursprüngliche Richtung bei und werden nur parallel mit sich verschoben (Fig. 93). So sieht man z. B. auch durch Fensterscheiben die Gegenstände nicht an ihrem wirklichen Platze, obwohl hier die Verschiebung minimal ist. Letztere ist nämlich um so größer, je dicker der Körper ist, je schräger die Strahlen auffallen, und je größer der Brechungsexponent ist.

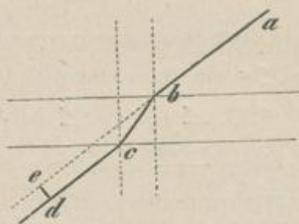


Fig. 93.

§ 119. **Brechung durch Prismen.** Geht dagegen Licht durch einen Körper, dessen Grenzflächen gegeneinander geneigt sind, so bekommen die Lichtstrahlen eine andere Richtung. Dies ist z. B. der Fall beim Prisma¹, wie in der Physik ganz allgemein zwei brechende Flächen heißen, die in der „brechenden Kante“ zusammenstoßen; der Winkel, den sie bilden, heißt „brechender Winkel“. Stellt z. B. Fig. 94 einen Schnitt durch ein Prisma senkrecht zur brechenden Kante, einen sog. Hauptschnitt vor, so wird der Lichtstrahl ab in b nach der Richtung bc

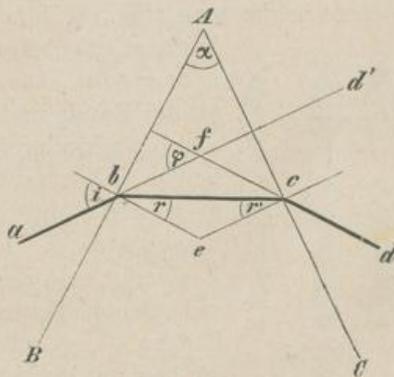


Fig. 94.

Gegenteil behauptet. — Die Abnahme der Lichtgeschwindigkeit in dichteren Medien ist dadurch bedingt, daß die Wellenlängen kleiner werden; die Schwingungszahlen bleiben dieselben.

¹ τὸ πρίσμα eig. „das Gesägte“.

und in c nach cd hin gebrochen; es findet also eine Ablenkung des Lichtstrahls nach dem dicken Ende des Prismas zu statt. Licht, welches von einem Gegenstande in d ausgeht, fällt also in ein Auge bei a . Da dieses aber hierbei in die Richtung ab sieht, projiziert es den Gegenstand nach d' . Ein Prisma wirkt demnach so, daß die Gegenstände nach der brechenden Kante hin verschoben erscheinen. Daraus ergibt sich ohne weiteres die Anwendung prismatischer Gläser für schielende Augen. Der Winkel, den die ein- und austretenden Strahlen miteinander bilden, der sog. Ablenkungswinkel (φ), ist nun, wie sich zeigen läßt, am kleinsten, wenn bc symmetrisch durch das Prisma geht. Dieser kleinste Ablenkungswinkel ist für zwei bestimmte Medien eine konstante Größe; da er außer vom brechenden Winkel nur von dem Brechungsindex abhängt, so dient er zur Bestimmung des letzteren. Feste Stoffe bringt man dazu in Prismenform, Flüssigkeiten füllt man in Hohlprismen.

Der Brechungsindex ist nämlich $\frac{\sin i}{\sin r}$. Es ist nun stets $\angle cbe + \angle bce = \angle \alpha$ als Supplementwinkel zu $\angle bec$. Beim symmetrischen Durchgange ist aber $\angle cbe = \angle bce$, folglich r und $r' = \frac{\alpha}{2}$. Ferner ist $\angle i = \angle ebc + \angle cbf = \frac{\alpha + \varphi}{2}$; somit $n = \sin \frac{\alpha + \varphi}{2} : \sin \frac{\alpha}{2}$. Um also den Brechungsindex zu finden, hat man nur nötig, nachdem α bestimmt ist, das Prisma auf die kleinste Ablenkung einzustellen und dann φ zu messen.

§ 120. **Brechung durch Linsen.** Unter Linsen versteht man durchsichtige Körper (meist aus Glas), die von zwei gekrümmten Flächen begrenzt sind. Wir betrachten hier nur solche Linsen, deren Begrenzungsflächen kugelförmig bzw. eben sind. Nach der Form unterscheidet man (Fig. 95) bikonvexe (1), plankonvexe (2), konkavkonvexe (3), bikonkave (4), plankonkave (5), konvexkonkave (6). Die Linsen 1—3 sind in der Mitte dicker als am Rande und haben die Eigenschaft, Strahlen, die durch sie hindurchgehen, konvergenter zu machen; sie heißen daher auch Sammellinsen. Umgekehrt sind 4—6 in der Mitte dünner und heißen Zerstreuungslinsen, da sie Divergenz der Strahlen verursachen. Verbindet man die beiden Krümmungsmittelpunkte — so erhält man die optische Achse. Auf ihr liegt in der Mitte der Linse der optische Mittelpunkt. Alle durch diesen gehende Strahlen heißen Hauptstrahlen und bleiben bei bikonkaven und bikonvexen Linsen ungebrochen, da für sie die Ein- und Austrittsflächen parallel sind. Der Hauptstrahl, der in die optische Achse fällt, bleibt bei allen Linsen ungebrochen. Alle



Fig. 95.

Der Hauptstrahl, der in die optische Achse fällt, bleibt bei allen Linsen ungebrochen. Alle

anderen Strahlen werden sowohl an der Vorder- wie an der Hinterfläche gebrochen¹. Die beiden Punkte, in denen parallel der optischen Achse auffallende Strahlen sich wirklich oder scheinbar vereinigen, heißen Brennpunkte; ihre Entfernung von der Linsenmitte heißt Brennweite (Fokaldistanz). Um nun z. B. das Bild des Gegenstandes AB (Fig. 96) zu konstruieren, bestimmt man die Bildpunkte seiner beiden Enden. Das Bild von A

muß natürlich auf der optischen Achse liegen. Das Bild von B erhält man, wenn man einmal den zugehörigen Hauptstrahl BOB' zieht, und dann den zur optischen Achse parallelen Strahl BN , der nach der Brechung durch den Brennpunkt F' gehen muß.

Der Schnittpunkt beider Strahlen ist der gesuchte Punkt, und $A'B'$ das Bild von AB . Auch für die Linsen gilt wieder die Formel [vgl. § 113].

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

wo g Gegenstands-, b Bild-, f Brennweite bedeutet. Handelt es sich um ungleiche Krümmungsflächen, und soll das angrenzende Medium berücksichtigt werden, so wird für $\frac{1}{f}$ eingesetzt $(n-1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$, wo n der Brechungsindex ist, r und r' die Krümmungsradien vorstellen. Im Gegensatz zu den Spiegeln sind natürlich diejenigen Bilder reell, die auf der anderen Seite der Linse liegen wie der Gegenstand, weil sich ja nur hier Strahlen wirklich vereinigen können. Auch bei Linsen verhält sich Bildgröße zur Gegenstandsgröße wie Bildweite zur Gegenstandsweite.

§ 121. **Konvexlinsen.** Berücksichtigt man diesen Gegensatz, so gelten für die Konvexlinsen die gleichen Regeln wie für die Konkavspiegel. Ist also der Gegenstand unendlich fern, so liegt sein Bild auf der anderen Seite der Linse im Brennpunkte. So kann man durch Konvexlinsen die Sonnenstrahlen im Brennpunkte vereinigen und dort brennbare Körper entzünden. Rückt der Gegenstand aus der Unendlichkeit heran, so entfernt sich das Bild auf der anderen Seite immer mehr. Ist der Gegenstand in doppelter Brennweite, so ist auch das Bild in doppelter Brennweite und ebenso groß; denn auch hier ist das Größenverhältnis zwischen Bild und Gegenstand durch das Ver-

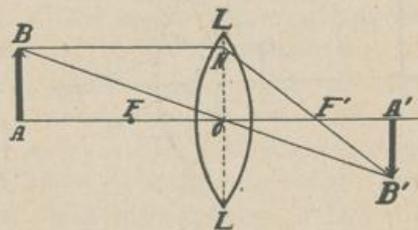


Fig. 96.

¹ Der Einfachheit halber ist bei den Figuren nur eine einmalige Brechung angenommen.

hältnis ihres Abstandes von der Linse bedingt. Ist der Gegenstand im Brennpunkte, so rückt das Bild in unendliche Entfernung. In allen diesen Fällen entsteht ein reelles, umgekehrtes Bild. Liegt nun aber der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so ent-

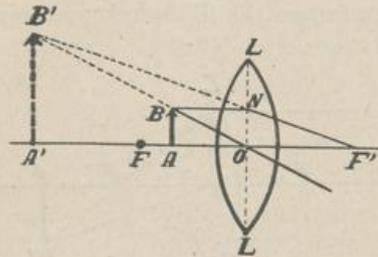


Fig. 97.

steht auf derselben Seite der Linse ein aufrechtes, vergrößertes Bild, das natürlich virtuell (Fig. 97 $A'B'$) und von der Linse weiter entfernt ist als der Gegenstand, aber um so kleiner wird, je näher der Gegenstand an die Linse heranrückt. Darauf gründet sich die Anwendung der Lupen, die vergrößerte Bilder in der Weite des deutlichen Sehens erzeugen.

Denn die Vergrößerung von Objekten durch Annäherung an das Auge findet ihre Grenze dadurch, daß innerhalb des sogenannten Nahpunktes nicht scharf gesehen werden kann.

Da weitsichtige (hypermetropische) Augen einen kürzeren Längendurchmesser haben als normale, so müssen die durch die Linse des Auges entworfenen Bilder hinter die Netzhaut fallen. Gegenstände werden aber nur dann deutlich gesehen, wenn die von ihnen ausgehenden Strahlen sich genau in der Netzhaut schneiden. Es sind hier daher solche Brillen nötig, welche die Strahlen eher zur Vereinigung zwingen, d. h. **Konvexgläser**.

§ 122. **Konkavlinnen.** Für Konkavlinnen gelten analoge Regeln wie für Konvexspiegel; sie erzeugen also virtuelle Bilder, die hier natürlich auf derselben Seite liegen wie der Gegenstand. Um z. B. das Bild des Punktes B (Fig. 98) zu finden, zieht man wieder den

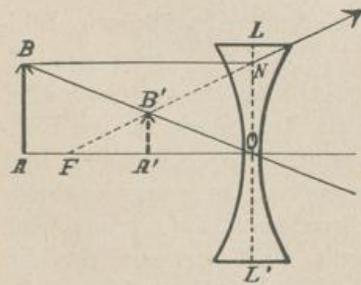


Fig. 98.

Strahl BO , der ungebrochen durch die Linse geht, und den achsenparallelen Strahl BN , der so gebrochen wird, als wenn er vom imaginären Brennpunkte F käme. Wie die Figur zeigt, sind die entstehenden Bilder aufrecht und verkleinert. Der Abstand des Punktes F von der Linse heißt hier **Zerstreuungswerte**.

Bei kurzsichtigen (myopischen) Augen, deren Längsachse größer als normal ist, fallen die durch die Linse des Auges entworfenen Bilder vor die Netzhaut. Man wendet daher hier Konkavgläser an, um die Konvergenz der Strahlen zu verringern, so daß sie sich eben erst in der Netzhaut schneiden.

§ 123. **Sphärische Aberration.** Die angeführten Gesetze für Linsen und Spiegel gelten nur für nahe der Achse einfallende Strahlen.

Strahlen, die weiter von der Achse entfernt sind, sogenannte Randstrahlen, werden stärker gebrochen, vereinigen sich also eher. Es existiert dann kein Brennpunkt, sondern eine Brennlinie bzw. Brennfläche oder Brennraum. Dadurch werden natürlich die Bilder verschwommen. Zur Vermeidung dieses Übelstandes, der sogenannten sphärischen Aberration, gebraucht man Blenden. Auch die Iris des Auges ist eine solche Blende. Ferner kann man durch geeignete Kombination mehrerer Linsen ein sogenanntes aplanatisches System herstellen, welches von diesem Fehler frei ist.

§ 124. **Kardinalpunkte.** Liegen mehrere brechende Medien hintereinander, so daß sie die Achse gemeinsam haben, so spricht man von einem zentrierten System. Ein solches bilden z. B. die brechenden Schichten des Auges. Gerade bei diesem kommt es nun nicht so sehr darauf an, den Gang der Strahlen durch die einzelnen Schichten zu verfolgen, sondern ihre Richtung im letzten Medium (hier der Glaskörper) zu kennen. Wie GAUSS zeigte, ist nun die Lage der Bilder in solchen zentrierten Systemen durch 3 Paar Kardinalpunkte resp. die durch sie senkrecht zur Achse gelegten Ebenen bestimmt. Diese durch Rechnung zu findenden Punkte sind:

1) 2 Brennpunkte (*F* u. *F'*). Strahlen, die im ersten Medium parallel der Achse verlaufen, gehen im letzten durch den (zweiten) Brennpunkt und umgekehrt.

2) 2 Hauptpunkte (*H* u. *H'*). Ein Strahl, der vor der Brechung in irgendeiner Richtung durch den ersten Hauptpunkt geht, geht nach der Brechung parallel verschoben durch den zweiten. In den durch sie senkrecht zur Achse gelegten Hauptebenen (*hh* und *h'h'*) entsprechen daher Bildern der ersten gleichgroße und gleichgerichtete in der zweiten.

3) 2 Knotenpunkte (*K* u. *K'*). Jeder Strahl, der ohne Brechung durch den ersten gehen würde, geht nach der Brechung parallel mit sich verschoben durch den zweiten.

Um z. B. das Bild von *ab* zu finden, zieht man von *b* aus den Richtungsstrahl *bK* und zur Achse parallel *bl*. Verschiebt man beide Strahlen mit sich

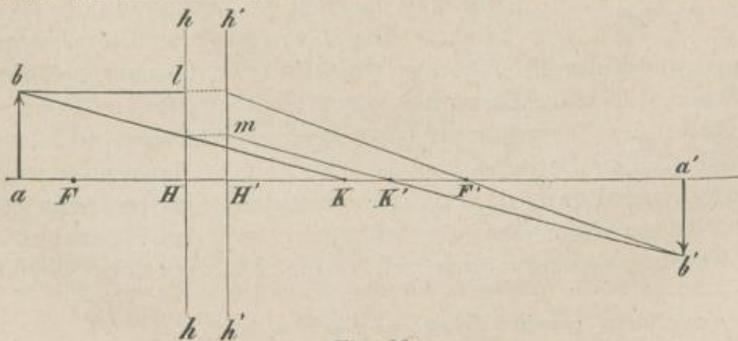


Fig. 99.

selbst parallel bis zur zweiten Hauptebene, dann geht der zur Achse parallele Strahl durch den zweiten Brennpunkt F' , der andere durch den zweiten Knotenpunkt K' . Im Schnittpunkte ihrer Verlängerung liegt das Bild von b , während das von a auf der Hauptachse liegt.

§ 125. **Camera obscura.** Setzt man vor die Öffnung der optischen Kammer [§ 108] eine Sammellinse, so entsteht auf der gegenüberliegenden Wand ein viel schärferes reelles Bild des betreffenden Gegenstandes. Der Apparat heißt dann Camera obscura. Ihr Wert liegt darin, daß sie von körperlichen Gegenständen Bilder entwirft, die in einer Ebene liegen. Sie ist der Hauptbestandteil aller photographischen Apparate, kann aber auch zum Zeichnen benutzt werden, wenn man die einfallenden Strahlen an einem um 45° geneigten Spiegel reflektieren läßt, so daß das Bild dann horizontal liegt. Durch Verschiebung der Linse können sowohl ferne wie nahe Gegenstände „eingestellt“ werden, natürlich nicht gleichzeitig.

Auch das Auge ist eine solche Camera obscura. Hier wird aber die Einstellung für verschiedene Entfernungen nicht dadurch bewirkt, daß die Linse der Netzhaut genähert oder von ihr entfernt wird; sondern dieselbe plattet sich durch die Tätigkeit eines Muskels beim Sehen in die Ferne ab, beim Sehen in die Nähe wölbt sie sich mehr, ein Vorgang, der Akkommodation heißt.

§ 126. **Mikroskop.** Unter Mikroskop¹ schlechtweg versteht man das „zusammengesetzte“ M., im Gegensatz zur Lupe [§ 121], die zuweilen auch als „einfaches“ M. bezeichnet wird. Ein Mikroskop (Fig. 100) besteht im Prinzip aus zwei Linsen. Die dem Objekt zu-

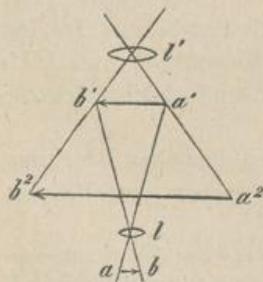


Fig. 100.

gewandte Linse, das Objektiv l , ist eine Sammellinse von sehr kurzer Brennweite. Sie entwirft von einem kleinen Gegenstande ab , der etwas außerhalb des Brennpunktes liegt, ein umgekehrtes, vergrößertes reelles Bild $a'b''$, das durch eine zweite, dem Auge zugewandte Linse, das Okular² l' , nochmals vergrößert wird. Letzteres wirkt hierbei als Lupe; das vom Objektiv entworfene reelle Bild muß daher in die Brennweite des Okulars fallen. Die Gesamtvergrößerung eines Mikroskops ist das Produkt aus Objektiv- und Okularvergrößerung, von denen jede umgekehrt proportional der betreffenden Brennweite ist. Außer dem Vergrößerungsvermögen kommen aber noch andere Eigenschaften in Betracht, namentlich das Auflösungs- oder Abbildungsvermögen, d. h. die Fähigkeit des Objektivs, feine Struktureinheiten des Präparates zu zeigen, und das Begrenzungs- oder Zeichnungsvermögen, d. i. die Fähigkeit des Objektivs,

¹ μικρός klein, σκοπέω blicken. — ² oculus Auge.

ein scharfes, von Farbensäumen und Schleiern freies Bild des Gegenstandes zu liefern (das wie „gezeichnet“ aussehen soll, daher der Name).

Bei den modernen Mikroskopen (und Fernrohren) verwendet man zur Vermeidung der sphärischen und chromatischen Aberration [§§ 123, 130] statt einfacher Linsen Linsensysteme, die beim Objektiv aus 2—4 und mehr Einzellinsen bestehen, beim Okular dagegen gewöhnlich nur aus zwei plankonvexen Linsen. Letztere sind beim HUYGENSschen Okular¹ so angeordnet, daß beide Konkavseiten nach dem Objekt hin sehen; die untere Linse („Kollektivglas“) macht die vom Objektiv kommenden Strahlen konvergenter, wodurch ein etwas kleineres reelles Bild, als ohne sie, entsteht, das die obere Linse („Augenglas“) als Lupe vergrößert. Beim RAMSDENSchen Okular dagegen (das hauptsächlich bei Fernrohren zur Anwendung kommt) sind die konvexen Flächen beider Linsen gegeneinander gerichtet; beide Linsen wirken hier als Lupen.

Objektiv und Okular sind durch ein Metallrohr (den Tubus) verbunden das gegen den Objektisch (eine mit zentraler Öffnung versehene Metallplatte) verschieblich ist. Auf letzteren kommen die zu untersuchenden Gegenstände (Präparate), die man vorher auf eine rechtwinklige Glasplatte (Objektträger) bringt und in der Regel mit einem kleinen dünnen quadratischen Glasplättchen (Deckgläschen) bedeckt. Die Untersuchung der Präparate erfolgt fast ausschließlich mittels durchfallenden Lichts, das durch einen unten befindlichen Spiegel in die Achse des Mikroskops geworfen wird. Bei modernen Mikroskopen benutzt man außerdem zur besseren Durchleuchtung des Präparates einen sog. Kondensor², d. i. ein unmittelbar unter dem Objektisch angebrachtes Linsensystem, welches das vom Spiegel kommende Licht im Präparat konzentriert. Zwischen Spiegel und Präparat befindet sich ein Blenden-träger zur Aufnahme von Blenden, d. s. Metallscheiben mit zentraler Öffnung von bestimmter Größe; bei den Irisblenden läßt sich die Öffnung mittels eines am Rande befindlichen Griffes in einfacher Weise konzentrisch vergrößern und verkleinern. Spiegel, Kondensor und Blende bilden den Beleuchtungsapparat, dessen vollkommenste Konstruktion von ABBE stammt. Hier ist der Kondensor vertikal verschieblich, ev. auch ausklappbar; die für sich bewegliche Irisblende kann exzentrisch gestellt und um die Mikroskopachse gedreht, auch ganz beiseite geschoben werden. Der ABBEsche Beleuchtungsapparat gestattet daher, Öffnung³ und Einfallsrichtung der Beleuchtungsbüschel während der Untersuchung in bequemster Weise nach Belieben zu ändern.

Bei den gewöhnlichen Trockensystemen befindet sich zwischen dem Objekt bzw. Deckglas und der untersten Linse des Objektivs („Frontlinse“) Luft als Medium. Bei den für stärkste Vergrößerungen in Betracht kommenden Immersionssystemen füllt man aber diesen Raum durch eine Flüssigkeit aus, und zwar in der Regel durch eine solche, die den gleichen Brechungsexponenten hat wie die Frontlinse und das Deckgläschen (homogene Im-

¹ Irrtümlich auch CAMPANISches Okular genannt. — ² Eigentlich Vorrichtung zur Verdichtung (des Lichts), von *condenso* verdichten. ³ Unter Öffnung (Apertur, Öffnungswinkel) versteht man den Winkel zwischen den Randstrahlen des Lichtkegels, der vom Achsenpunkt des Objekts zu einer Linse (oder einem Spiegel), im vorliegenden Falle zum Objektiv geht.

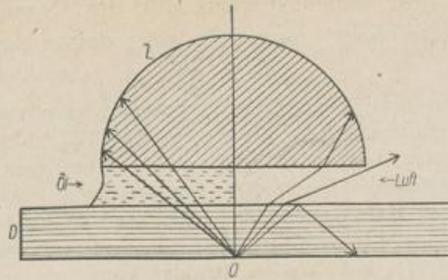


Fig. 101.

rechts bei einem Trockensystem, links bei einem Immersionssystem zeigt (*O* Objekt, *D* Deckgläschen, *L* Frontlinse). Eine homogene Immersion gibt also lichtstärkere Bilder, vor allem steigert sie aber auch das Auflösungsvermögen (s. o.).

Als zweckmäßigen Ausdruck und Vergleichsmaßstab für diese Leistungen hat *ABBE* den mathematischen Begriff der numerischen Apertur¹ eingeführt. Man versteht darunter den Sinus des halben Öffnungswinkels,

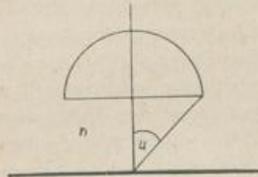


Fig. 102.

multipliziert mit dem Brechungsexponenten des Mediums, in dem dieser Winkel verläuft. In Fig. 102 ist also die numerische Apertur $a = n \cdot \sin u$. Das Auflösungsvermögen eines Objektivs ist nun direkt proportional der numerischen Apertur, die Helligkeit des Bildes proportional dem Quadrate der numerischen Apertur. Um die Leistungsfähigkeit des Mikroskops zu erhöhen, muß man also die numerische Apertur möglichst groß machen. Bei Trockensystemen kann ihr Wert theoretisch nicht größer sein als 1, in Wirklichkeit jedoch nicht größer als 0,94. Da hier nämlich Luft das Medium ist, ist $n = 1$ [§ 116]. Wäre $u = 90^\circ$, so wäre $\sin u = 1$, also auch $a = 1$. Dies ist aber praktisch unmöglich, da das Objekt nicht unmittelbar an der Frontlinse liegen kann. Selbst bei den besten Konstruktionen kann der Gegenstand nur so nahe an die Linse herangebracht werden, daß höchstens $u = 70^\circ$, $\sin u = 0,94$ wird. Dann ist die numerische Apertur $1 \times 0,94 = 0,94$. Dagegen beträgt bei einer Wasser-

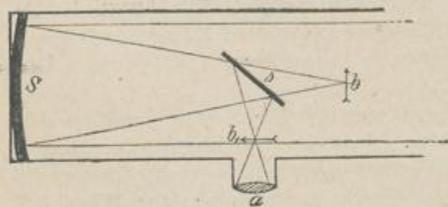


Fig. 103.

immersion ($n = 1,33$) der Höchstwert der numerischen Apertur $1,33 \times 0,94 = 1,25$, und bei einer Ölimmersion ($n = 1,51$) wird die numerische Apertur im besten Falle $1,51 \times 0,94 = 1,43$. — [Vgl. hierzu § 140].

§ 127. Fernrohr. Bei den katoptrischen Fernrohren (auch Reflektoren oder Spiegelteleskope² genannt) wird das durch einen Hohlspiegel erzeugte umgekehrte Bild durch ein Okular betrachtet. Fig. 103 zeigt z. B. die Anordnung von *NEWTON*. Hier werden die vom Hohlspiegel

¹ *numerus* Zahl; also etwa „zahlenmäßig definierte Öffnung“. ² *τελες* fern, *σκοπέω* blicken.

S reflektierten Strahlen, bevor sie sich zum Bilde b vereinigen durch den schief gestellten Planspiegel s seitlich abgelenkt, so daß das Bild in Wirklichkeit in b_1 entsteht und mittels der Lupe a betrachtet werden kann.

Die Bilder der Spiegelteleskope sind zwar frei von chromatischer Aberration [§ 130], aber verhältnismäßig lichtschwach; deshalb, und weil für wirksame Instrumente sehr große Spiegel erforderlich sind, bevorzugt man in der Neuzeit dioptrische Fernrohre oder Refraktoren, die auf Linsenwirkung beruhen. Die beiden Hauptformen derselben sind das GALILEISCHE und das KEPLERSCHE Fernrohr.

Beim GALILEISCHEN oder holländischen Fernrohr (Fig. 104) werden die Strahlen, die infolge der Brechung durch eine Sammellinse (SS) ein reelles Bild (A^1B^1) des Gegenstandes (AB) erzeugen würden, vor ihrer Vereinigung durch eine Zerstreuungslinse (ZZ) aufgefangen und divergent gemacht, so daß z. B. die von B ausgehenden Strahlen von B^2 herzukommen scheinen. Es entsteht daher ein aufrechtes, vergrößertes, virtuelles Bild (A^2B^2). Hierzu gehören auch die gewöhnlichen Feldstecher und Operngucker.

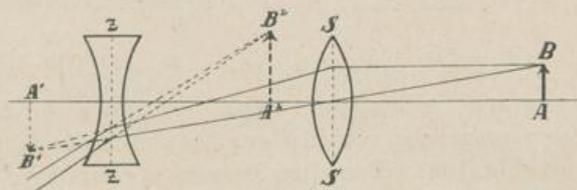


Fig. 104.

Das KEPLERSCHE oder astronomische Fernrohr besteht aus einem Objektiv von großer, und einem Okular von kleiner Brennweite (seine Länge entspricht der Summe dieser Brennweiten). Durch das Objektiv wird von einem fernen Gegenstand ein umgekehrtes verkleinertes reelles Bild entworfen, das innerhalb der Brennweite des Okulars liegt, durch dieses daher wie durch eine Lupe vergrößert wird. Es resultiert also ein vergrößertes, virtuelles, umgekehrtes Bild.

Um eine genaue Zentrierung bzw. Messungen zu ermöglichen, bringt man in der Ebene, wo das reelle Bildentsteht, meist ein Fadenkreuz an, das ev. durch eine Mikrometerschraube verschieblich ist und dessen Bild mit dem des Objektes zusammenfällt. Es besteht aus zwei sich rechtwinklig kreuzenden, sehr dünnen (Spinnen-, Quarz- usw.) Fäden, deren Schnittpunkt genau der Achse des Fernrohrs entspricht. Beim Galileischen Fernrohr, wo ja kein reelles Bild zustande kommt, kann natürlich auch ein Fadenkreuz nicht angebracht werden, wohl aber im Okular von Mikroskopen. Das Fadenkreuz kann auch durch eine durchsichtige Skala ersetzt werden (Okularmikrometer).

Schaltet man zwischen Objektiv und Okular eines KEPLERSCHEN Fernrohres eine Konvexlinse („Umkehrungslinse“) ein, so erhält man aufrechte Bilder, was für gewöhnliche Beobachtungen natürlich zweckmäßiger ist (terrestrisches Fernrohr). Statt der Umkehrungs-

*Virtuell
aufsteigend*

Augenlinse

linse kann man auch zwei total reflektierende Prismen (§ 117) benutzen. Da ein solches Prisma, wie Fig. 105 zeigt, eine Umkehrung nur in einer Richtung bewirkt, sind eben zwei in solcher Anordnung erforderlich, daß das vom Objektiv gelieferte Bild sowohl in

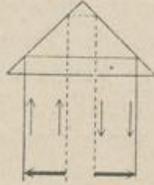


Fig. 105.

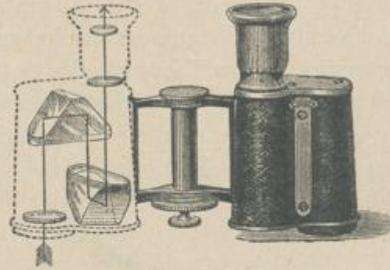


Fig. 106.

bezug auf rechts und links, wie auch in bezug auf oben und unten umgekehrt wird, worauf es durch das Okularsystem betrachtet wird (Fig. 106). Derartige Prismenfernrohre finden, meist in Form von Doppelfernrohren, in der Neuzeit ausgedehnte Verwendung.

Als Feldstecher und Operngläser sind sie den holländischen Fernrohren nicht nur wegen ihrer stärkeren Vergrößerung und Handlichkeit überlegen, sondern auch wegen ihrer besseren Tiefenplastik. Da nämlich der Abstand ihrer Objekte größer ist als der Augenabstand, sieht jedes Auge den betr. Gegenstand besser von der Seite, worauf eben das körperliche Sehen beruht (§ 128). Besonders ist dies der Fall bei den Scherenfernrohren, wo die Objektive am Ende langer Arme sitzen, die horizontal nach links und rechts hinausragen und zugleich auch drehbar sind (wie die Arme einer Schere, daher der Name). Dies hat wieder den Vorteil, daß der Beobachter gedeckt hinter einer Mauer usw. stehen kann, während die über die Mauer ragenden Objektive das gewünschte Bild liefern. — Ebenfalls auf Prismenwirkung beruhen die Periskope (Sehrohre) der Unterseeboote.

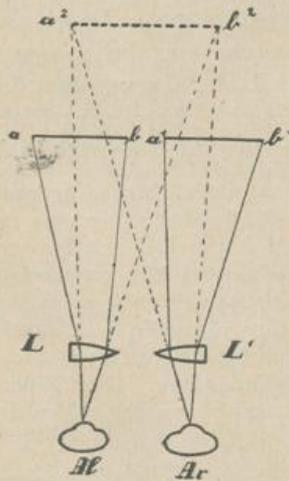


Fig. 107.

§ 128. **Stereoskop.** Die Fähigkeit, stereoskopisch¹ zu sehen, d. h. Gegenstände als Körper, also nach drei Dimensionen wahrzunehmen, wird erst allmählich erworben und hat verschiedene Ursachen. Vor allem erhält beim binokularen Sehen das rechte Auge einen etwas anderen Eindruck von einem Objekte wie das linke, und diese beiden gleichzeitigen Eindrücke werden im Gehirn zu einem einzigen verschmolzen. Hierauf beruht auch das Stereoskop. Sein Prinzip

¹ στερεός starr, fest, körperlich.

ist, daß zwei (flächenhafte) Abbildungen desselben Gegenstandes, die dem Eindruck des rechten bzw. linken Auges von demselben entsprechen, übereinander gelagert werden, und daß dadurch eben ein körperliches Bild entsteht.

Von den mannigfachen Formen sei hier nur das Stereoskop von BREWSTER erwähnt (Fig. 107). Es ist dies ein Kasten, an dessen Boden die beiden Abbildungen (ab und $a'b'$) liegen; eine (hier nicht gezeichnete) Scheidewand bewirkt, daß jedes Auge (Al und Ar) nur das zugehörige Bild sieht. Durch zwei halbe Konvexlinsen, deren dickerer Teil nach außen sieht, und die wie Prismen wirken, wird sowohl von ab wie von $a'b'$ ein virtuelles Bild erzeugt, und diese beiden Bilder werden in a^2b^2 zur Deckung gebracht. Die Linsen dienen gleichzeitig als Lupen zur Vergrößerung; natürlich müssen die Abbildungen innerhalb ihrer Brennweite liegen¹.

D. Dispersion, Absorption, Spektralanalyse.

§ 129. **Einfaches und zusammengesetztes Licht.** Als NEWTON Sonnenlicht, das durch einen Spalt (S , Fig. 108) in ein dunkles Zimmer drang, durch ein Prisma (P) gehen ließ und dann auf einem Schirm (W) auffing, fand er, daß die Lichtstrahlen nicht nur abgelenkt, sondern auch in eine Reihe kontinuierlich ineinander übergehende Farben zerlegt waren. Die Gesamtheit derselben nannte er Spektrum² und unterschied besonders Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Die Größe der Ablenkung nimmt vom Rot (R) zum Violett (V) kontinuierlich zu (Fig. 108). Ließ er eine dieser Spektralfarben nochmals ein Prisma passieren, so fand zwar wieder eine Ablenkung statt, aber die Farbe blieb dieselbe. Ließ er alle Farben noch durch ein zweites Prisma mit entgegengesetzter brechender Kante gehen, so entstand wieder Weiß. Diese Vereinigung der Spektralfarben zu Weiß kann man auch durch eine Sammellinse bewirken oder durch schnelle Rotation einer Scheibe, auf der die einzelnen Farben aufgetragen sind (Farbenkreisel); in letzterem Falle erfolgt die Verschmelzung der Farben zu Weiß erst im Gehirn. Weiß entsteht aber auch, wenn man nur je zwei bestimmte Farben des Spektrums, die sog. Komplementärfarben, vereinigt. Als solche gelten Rot und Blaugrün, Orange und Zyanblau, Gelb und Indigoblau, Grüngelb und Violett [vgl. § 131]. Vereinigt man andere Farben des Spektrums miteinander, so entstehen sog. Mischfarben.

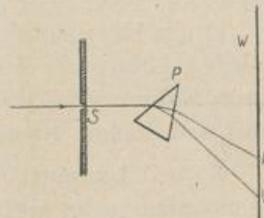


Fig. 108.

¹ Übrigens kann man auch durch Übung ohne Prismen oder Linsen zwei getrennte Gegenstände zur Deckung bringen. — ² eig. das Bild in der Seele, von *specio* schauen.

Hieraus schloß NEWTON, daß die Spektralfarben als einfaches oder homogenes Licht zu betrachten sind, d. h. nur aus Wellen gleicher Schwingungszahl bestehen. Im weißen Lichte dagegen sind alle Spektralfarben (Wellenformen) enthalten, es ist also zusammengesetztes Licht. Geht es durch einen brechenden Körper, namentlich durch ein Prisma, so werden seine einzelnen Bestandteile verschieden stark gebrochen, am stärksten das Violett, am wenigsten das Rot; sie werden also dadurch voneinander getrennt, zerstreut (dispargiert).

Die Schwingungszahl der verschiedenen Lichtwellen wächst kontinuierlich von Rot bis Violett. Rot hat die kleinste Schwingungszahl (ca. 400 Billionen), Violett die größte (ca. 800 Billionen). Da sich nun alle Lichtstrahlen im leeren Raum und in Luft gleich schnell fortpflanzen, folgt aus der Formel $v = n \lambda$, daß umgekehrt die roten Strahlen die größte Wellenlänge (ca. $0,8 \mu$), die violetten die kleinste (ca. $0,4 \mu$) haben [vgl. § 135]. In optisch dichteren Medien ist dagegen die Geschwindigkeit der einzelnen farbigen Strahlen nicht gleich, sondern sie wird hier in verschiedenem Grade verlangsamt¹ — beim Violett am meisten, beim Rot am wenigsten [vgl. § 116] —, und als Folge davon entsteht eben eine verschieden starke Brechung derselben, bei Anwendung von zusammengesetztem Lichte also Dispersion².

Einige Körper mit Oberflächenfarben, die im auffallenden Lichte anders gefärbt aussehen wie im durchfallenden (Fuchsin, übermangansaures Kalium usw.), zeigen anomale Dispersion, d. h. sie brechen Blau und Violett schwächer als Rot, Orange, Gelb.

§ 130. **Achromatismus.** Mit jeder Brechung ist eine (wenn auch nicht immer sehr auffallende) Dispersion verbunden. Da nun bei verschiedenen Substanzen das Verhältnis zwischen beiden Vorgängen nicht dasselbe ist, so kann man durch passende Kombinationen (z. B. von Kron- und Flintglas) Prismen herstellen, die zwar noch Brechungsvermögen besitzen, aber von Farbenzerstreuung frei sind, sog. achromatische Prismen, andererseits solche mit Dispersionsvermögen, aber ohne Brechkraft, sog. geradsichtige Prismen. Ebenso läßt sich auch bei Linsen die störende Dispersion, hier chromatische Aberration genannt, durch Vereinigung einer Flintglas- und einer Kronglaslinse beseitigen.

§ 131. **Körperfarben.** Die Farbe eines Körpers beruht auf den nicht absorbierten, d. h. also den reflektierten resp. durchgelassenen Strahlen. Man kann daher auch die Körperfarben als Restfarben bezeichnen. Absorbiert der Körper von den auf ihn fallenden Strahlen

¹ Diese Annahme hat man wieder durch verschiedene Hilfshypothesen zu stützen versucht, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. —

² Übrigens sind auch andere Farbentheorien aufgestellt worden (z. B. von GOETHE und von SCHOPENHAUER), die allerdings bei den Fach-Physikern keine Anerkennung gefunden haben.

keine, so ist er entweder weiß oder ganz durchsichtig, je nachdem er alle Strahlen reflektiert oder ganz durchläßt. Absorbiert er alle Strahlen, so sieht er schwarz aus. Absorbiert er nur bestimmte Strahlen, so nimmt er die entsprechende Komplementärfarbe an, weil die absorbierten Strahlen natürlich im reflektierten bzw. durchgelassenen Lichte fehlen. Es folgt daraus, daß ein roter Körper (der ja grünes Licht absorbiert) in weißem und rotem Lichte rot, in grünem schwarz aussieht, daß ein rotes und ein dahinter befindliches grünes Glas eine undurchsichtige Verbindung geben usw.

Während die Vereinigung von Spektralfarben Additions- oder Summationsfarben ergibt, erhält man durch Mischung von Körperfarben Differenz- oder Subtraktionsfarben. Läßt man z. B. weißes Licht erst durch ein blaues Glas gehen (das die roten, gelben, violetten Strahlen absorbiert), dann durch ein gelbes Glas (das die roten, blauen, violetten absorbiert), so bleibt hauptsächlich grünes Licht übrig. Dasselbe gilt für die Mischung von blauem und gelbem undurchsichtigem Farbstoff („Pigment“). Die subtraktive Mischung von Blau und Gelb ist also Grün, während die additive Weiß ist [§ 129].

§ 132. **Spektralanalyse.** Da das Spektrum eines Körpers nichts anderes ist, wie die Nebeneinanderstellung der von ihm ausgesandten Lichtstrahlen, geordnet nach ihren Schwingungszahlen, so ist klar, daß man aus der Beschaffenheit desselben auf den Körper schließen kann. Diese von KIRCHHOFF und BUNSEN entdeckte Untersuchungsmethode, die sich durch äußerste Feinheit auszeichnet, z. B. auch zur Entdeckung mancher chemischen Elemente geführt hat, heißt Spektralanalyse.

Fig. 109 zeigt das Schema eines Spektralapparates. Durch einen schmalen Spalt des sogenannten Kollimatorrohres¹ *A* dringen Strahlen von dem zu untersuchenden Körper ein und werden durch eine Sammellinse parallel auf das Prisma *P* geworfen, dort dispergiert und zugleich in das Fernrohr *B* gelenkt. Dort entsteht durch das Objektiv ein umgekehrtes Bild des Spektrums, das dann durch eine Lupe betrachtet wird. Gleichzeitig wird durch das Prisma in das Fernrohr das Bild einer Skala geworfen, welche am vorderen Ende des sog. Skalenrohres *C* in Glas eingeritzt ist; dieselbe dient zur Orientierung im Spektrum. — Für die Zwecke der Praxis benutzt man handliche Spektroskope, bei denen ein einziges Rohr Spalt, geradsichtiges Prisma [§ 129] und Fernrohr enthält.

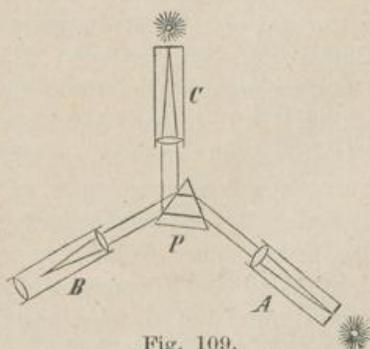


Fig. 109.

§ 133. **Emissionsspektren.** Wenn Körper in glühendem Zustande selbst Strahlen aussenden, liefern sie sog. Emissionsspektren.

Um Körper glühend zu machen, bringt man sie entweder in die Flamme

¹ verdorben aus *collineo* in gerade Linie bringen.

eines Bunsenbrenners oder, wenn diese Hitze nicht genügt, in ein Knallgasgebläse oder endlich in den elektrischen Flammenbogen. Eventuell läßt man auch den elektrischen Funken zwischen zwei Elektroden des betr. Metalls übergehen. Um Gase leuchtend zu machen, schließt man sie sehr verdünnt in sog. GEISSLERsche Röhren [§ 206] ein und sendet elektrische Funken hindurch.

Die Natur der Spektren ist abhängig von der molekularen Beschaffenheit des betreffenden Körpers. Da bei festen und flüssigen Körpern im Zustande der Weißglut den dicht zusammengedrängten Molekülen alle möglichen Schwingungszahlen zukommen, so werden alle möglichen Farben von ihnen ausstrahlen; es entsteht daher ein kontinuierliches Spektrum, bei dem die Farben ineinander übergehen. Je weiter die Moleküle voneinander entfernt sind, desto eher können sie die ihnen eigentümlichen Schwingungen ausführen, ohne durch Zusammenprall mit anderen gestört zu werden. Es haben daher Dämpfe und Gase bei hoher Temperatur und geringer Dichte ein Linienspektrum, d. h. ein Spektrum mit bestimmten farbigen Linien, das bei niedriger Temperatur, größerer Dichte und dickerer Schicht des Gases in ein Bandenspektrum, d. h. ein Spektrum mit breiteren hellen Bändern, übergeht. Ein Linienspektrum ist charakteristisch für Elemente, während chemische Verbindungen meist ein Bandenspektrum haben.

§ 134. **Absorptionsspektren.** Wird von weißem Licht, das durch einen Körper hindurchgegangen ist, ein Spektrum entworfen, so zeigen sich an gewissen Stellen dunkle Linien oder Bänder, die den vom Körper absorbierten Strahlen entsprechen. Dies sind sogenannte Absorptionsspektren. Um sie zu erhalten, stellt man den betreffenden Körper zwischen eine weiße Lichtquelle und das Kollimatorrohr des Spektralapparates; Flüssigkeiten bringt man hierzu in Gefäße mit planparallelen Glaswänden. Einen Wert bekamen diese Untersuchungen aber erst, als KIRCHHOFF das berühmte Gesetz aufstellte, daß jeder leuchtende Körper gerade diejenigen Strahlengattungen am stärksten absorbiert, die er selbst auszusenden vermag (s. u.). Danach kann also aus der Zahl und Stellung der schwarzen Linien und Bänder ebenfalls auf die Natur der betreffenden Körper geschlossen werden. Man erklärt dies dadurch, daß die Körpermoleküle auf eine bestimmte Schwingungszahl abgestimmt sind, daß sie also Wellen von derselben Schwingungszahl am leichtesten aussenden und auch aufnehmen können. Es sind mithin analoge Verhältnisse wie beim Mittönen [§ 70]. Um einen Vergleich zu gebrauchen, so wird derjenige eine fremde Sprache am besten verstehen (absorbieren), der sie selbst sprechen (emittieren) kann. Von den wichtigen Folgerungen aus dem KIRCHHOFFschen Gesetze sei hier nur die Erklärung der sogenannten FRAUNHOFERSchen Linien an-

geführt, das sind die äußerst zahlreichen dunklen Linien im Sonnenspektrum. Nach dem oben Gesagten muß es sich hier um ein Absorptionsspektrum handeln. Man nimmt daher an, daß die Strahlen des glühenden Sonnenkerns erst durch eine Metaldampfhülle (sog. Chromosphäre) dringen müssen, bevor sie in den Weltraum gelangen. Die FRAUNHOFERSchen Linien, die mit großen lateinischen Buchstaben (die schwächeren mit kleinen) bezeichnet werden, dienen zur Orientierung im Spektrum und zur Bezeichnung der entsprechenden Lichtstrahlen bzw. Wellenlängen.

Das allgemeine Strahlungsgesetz von KIRCHHOFF, von dem der oben angeführte Satz nur ein Spezialfall ist, bezieht sich auf die gesamte kalorische Strahlung [§ 135], von dem die sichtbare Strahlung ja nur einen Teil bildet, und lautet: Für jeden Körper ist das Verhältnis zwischen Emissions- und Absorptionsvermögen eine konstante Größe, und zwar ist es gleich der Strahlung des absolut schwarzen Körpers von derselben Temperatur und derselben Wellenlänge. Das heißt eben: Ist das Emissionsvermögen eines Körpers für irgendein Strahlengebiet sehr groß, so muß sein Absorptionsvermögen für dasselbe Strahlengebiet auch sehr groß sein.

Ein absolut schwarzer Körper ist ein solcher, der alle auffallenden Strahlen weder reflektiert noch durchläßt, sondern vollkommen absorbiert. Da also sein Absorptionsvermögen (A) ein Maximum, nämlich $= 1$ ist, wird hier das Verhältnis zwischen Emissions- und Absorptionsvermögen $E: A = E$, so daß der absolut schwarze Körper als Vergleichsobjekt sehr geeignet ist, worauf die obige Formulierung des KIRCHHOFFSchen Gesetzes beruht. In praxi verwendet man zur Herstellung eines absolut schwarzen Körpers metallische, innen geschwärzte Hohlkugeln oder Hohlzylinder mit einer kleinen Öffnung; die durch letztere eintretenden Strahlen werden im Innern wiederholt reflektiert und dabei fast vollkommen absorbiert.

§ 135. **Ultrarote und ultraviolette Strahlen.** Außer dem sichtbaren, durch die Farben rot bis violett charakterisierten, Spektrum, gibt es auch Ätherwellen bzw. Strahlen, die das Sehorgan nicht reizen, daher unsichtbar bleiben. Diese Strahlen liegen jenseits von rot bzw. violett, heißen daher ultrarote bzw. ultraviolette Strahlen. Für alle diese Strahlen gilt die Formel $v = n \lambda$ [§ 61] = 300000 km pro Sekunde. Nach der ultraroten Seite hin werden die Wellenlängen immer größer, die Schwingungszahlen kleiner, nach der ultravioletten Seite zu ist es umgekehrt.

Für rote Strahlen ist annähernd $\lambda = 0,8 \mu$, $n = 400$ Billionen; für gelbe Strahlen (entsprechend der FRAUNHOFERSchen D-Linie oder Natriumlinie) $\lambda = 0,59 \mu$, $n = 500$ Billionen; für violette Strahlen $\lambda = 0,4 \mu$, $n = 800$ Billionen. Ultrarote Strahlen sind gemessen worden bis zu $\lambda = 343 \mu = 0,34$ mm, wobei $n = 1$ Billion. Ultraviolette Strahlen sind gemessen worden bis zu $\lambda = 0,1 \mu$, wobei $n = 3000$ Billionen. Die elektrischen Wellen [§ 216] haben eine Länge $\lambda = 3$ mm bis viele Kilometer. Die Röntgenstrahlen haben vielleicht eine Wellenlänge von $0,01-4 \mu\mu$.

Je nach der Substanz, in der sie absorbiert werden, zeigen die

Ätherstrahlungen Wärme-, Licht- bzw. chemische Wirkung. Der sichtbare Teil des Spektrums besitzt alle diese Wirkungen, der ultrarote Teil nur Wärmewirkungen („dunkle“ Wärme¹), der ultraviolette Teil hauptsächlich chemische Wirkungen.

Die ultraroten Strahlen weist man mittelst einer Thermosäule nach [§ 184]; zu ihrer Darstellung benutzt man Steinsalzprismen, da Glas zu viel dunkle Wärme absorbiert [§ 105]. Die ultravioletten Strahlen weist man durch ihre Fluoreszenzwirkung nach [§ 137]; hierzu benutzt man Quarzprismen, da Glas ultraviolettes Licht absorbiert.

§ 136. **Chemische Strahlenwirkungen.** In manchen Körpern verursachen die absorbierten Strahlen chemische Umsetzungen. Man nennt solche chemisch wirksamen Strahlen auch aktinische² Strahlen und spricht von photochemischen Wirkungen. Besonders gilt dies von den kurzwelligigen Lichtstrahlen und noch mehr von den ultravioletten Strahlen. So bewirkt z. B. Sonnenlicht die Umwandlung des giftigen gelben Phosphors in den unschädlichen roten, die Vereinigung von Wasserstoff und Chlor zu Salzsäure, den Aufbau komplizierter chemischer Verbindungen in Pflanzen, die Zersetzung von Wasserstoffsuperoxyd (H_2O_2) in H und O usw. Hierher gehört auch die Photographie.

Die ersten Lichtbilder waren die sog. Daguerreotypien³. Hier wirkte das Licht auf Jodsilberplatten; die vom Licht getroffenen Stellen bekamen die Fähigkeit, Quecksilberdämpfe zu kondensieren. Um das so entstandene Bild zu „fixieren“, d. h. weitere Umsetzungen der lichtempfindlichen Platte zu verhüten, wurde das überschüssige Jodsilber mit unterschwefligsaurem Natron abgespült. — Bei der modernen Photographie wird im wesentlichen eine mit Halogensilber überzogene Glasplatte kurze Zeit exponiert. Durch Behandlung mit reduzierenden Substanzen (sog. „Entwicklern“) entsteht an den belichteten Stellen schwarzes metallisches Silber. Nach dem Fixieren erhält man somit ein negatives Bild, d. h. die hellen Stellen des Gegenstandes sind dunkel und umgekehrt. Drückt man dies Negativ auf lichtempfindliches Papier und setzt dieses dem Tageslicht aus, so bleiben die den dunklen Stellen des Negativs entsprechenden Partien hell, die den hellen des Negativs entsprechenden werden dunkel; es entsteht somit jetzt ein positives Bild.

§ 137. **Fluoreszenz und Phosphoreszenz.** Auf der Absorption gewisser Strahlen beruht auch die Eigenschaft mancher Substanzen (z. B. Flußpat, Chininsulfat, Baryumplatincyranür usw.), unter dem Einflusse intensiver Bestrahlung selbstleuchtend zu werden und dann Strahlen auszusenden, deren Farbe sowohl von derjenigen der Lichtquelle, wie von der gewöhnlichen Farbe des Körpers abweicht. Hält

¹ Die dunklen Wärmestrahlen sind nur ein Teil der „kalorischen“ Strahlen, womit eben alle Strahlen bezeichnet werden, die Wärmewirkung zeigen. — ² Von *aktis* Strahl, also eine Tautologie. — ³ Nach dem frz. Maler DAGUERRE (1789—1851), der sie 1838 erfand.

dieser Zustand nur während der Bestrahlung an, so heißt er Fluoreszenz¹, während das Nachleuchten Phosphoreszenz genannt wird. Ein phosphoreszierender Körper ist z. B. der Diamant [vgl. § 107]. Daß es sich um eine Absorptionerscheinung hierbei handelt, geht daraus hervor, daß die Strahlen, die von einem fluoreszierenden Körper ausgehen, nicht wieder Fluoreszenz erregen können. Die wirksamen Strahlen sind hier die mit großer Schwingungszahl, welche dadurch, daß sie ihre Bewegung teilweise an materielle Moleküle abgeben, eine Verminderung ihrer kinetischen Energie erfahren und dadurch in Strahlen von größerer Wellenlänge, aber kleinerer Schwingungszahl übergehen. Fluoreszierende Körper sind demnach ein Mittel, die sonst unsichtbaren ultravioletten Strahlen (auch Röntgen- und Radiumstrahlen) sichtbar zu machen.

E. Interferenz und Polarisation.

§ 138. **Fresnels Spiegelversuch.** Eine Hauptstütze der Wellentheorie des Lichtes ist die Tatsache, daß unter Umständen Licht zu Licht gefügt Dunkelheit ergibt. Dies zeigt sehr schön der berühmte Spiegelversuch von FRESNEL.

Fallen von der Lichtquelle L (Fig. 110) Strahlen auf die unter sehr stumpfem Winkel zusammenstoßenden Spiegel AB und BC , so scheinen die reflektierten Strahlen von den Bildpunkten M und M' zu kommen. Die davon ausgehenden Lichtkegel OMP und $O'M'P'$ haben nun das Stück $O'BP$ gemeinsam, und in diesem entstehen bei Anwendung einfarbigen Lichtes² abwechselnd dunkle und helle Streifen, die auf einem Schirme aufgefangen oder direkt mittels einer Lupe betrachtet werden können.

Diese dunklen Streifen sind der Ausdruck dafür, daß daselbst Wellen mit entgegengesetzten Phasen zusammentreffen, also sich schwächen bzw. aufheben [§ 64]. Da N , die Mitte von $O'P$, von M und M' gleichweit entfernt ist, muß dort Helligkeit herrschen, weil hier die Wellen gleiche Phasen haben, also sich verstärken. Ebenso muß Helligkeit an allen den Punkten sein, deren Abstände von M und M' um

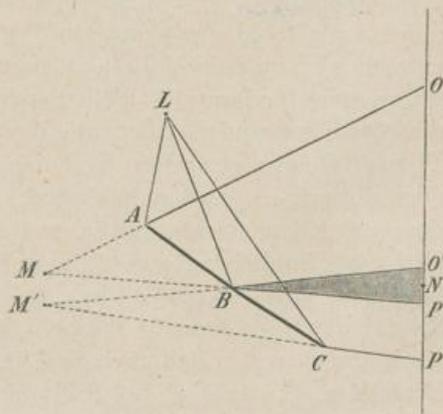


Fig. 110.

¹ Weil zuerst beim Fluorkalzium (Flußspat) entdeckt. — ² Zum Zustandekommen der Interferenzerscheinungen müssen beide Wellensysteme gleichartig sein, was nur der Fall ist, wenn sie von einer Lichtquelle ausgehen.

eine gerade Zahl von halben Wellenlängen differieren; Dunkelheit dagegen dort, wo die Differenz dieser Abstände eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen beträgt. Bei Anwendung von rotem Licht sind die dunklen Streifen weiter voneinander entfernt als beim violetten Licht. Da nämlich die Wellenlänge des ersteren größer ist, entsteht auch die zur Auslöschung nötige Phasendifferenz von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge erst nach einer längeren Strecke. Aus dem Abstände der Interferenzstreifen lassen sich die Wellenlängen für die einzelnen Farben berechnen. Bei der Anwendung von weißem Lichte, das ja alle Strahlen in sich vereint, erhält man in N wieder eine weiße Stelle, da ja dort keine Phasendifferenz besteht. Seitlich davon werden zuerst die violetten Strahlen durch Interferenz ausgelöscht, dann allmählich die anderen, entsprechend ihrer Wellenlänge. Die an den betreffenden Stellen übrigbleibenden Strahlen ergeben dann durch Mischung die sogenannte Interferenzfarben.

§ 139. **Andere Interferenzerscheinungen.** Auf Interferenz beruhen viele prächtige Farbenercheinungen, z. B. die Farben dünner

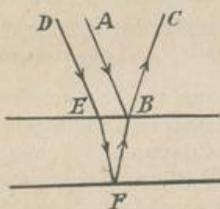


Fig. 111.

Blättchen. Hier wird nämlich das Licht sowohl an der vorderen, wie an der hinteren Fläche reflektiert und kommt dann zur Interferenz. Der ins Auge gelangende Strahl BC (Fig. 109) setzt sich also zusammen aus dem in B reflektierten Strahl AB und aus dem in F reflektierten Strahl DE . Diese beiden zur Interferenz kommenden Anteile haben nun einen

Gangunterschied, der dadurch bedingt ist, daß der an der Hinterfläche reflektierte Strahl einen längeren Weg (hier EFB) zurücklegt; außerdem entsteht aber noch durch Reflexion am dichteren Medium ein (einmaliger) Gangunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge [vgl. § 63]. Je nach der Dicke des Blättchens und der Richtung der Strahlen wird nun eine bestimmte Phasendifferenz eintreten; in homogenem Lichte wird es daher hell oder dunkel, in weißem in einer bestimmten Farbe erscheinen. Bei durchgehendem Lichte treten analoge Erscheinungen auf; doch ist Hell und Dunkel vertauscht, und bei weißem Lichte erscheinen die Komplementärfarben. Ändert sich die Dicke des Blättchens bzw. der für die Interferenz in Betracht kommenden Schicht, so tritt auch ein Wechsel in der Helligkeit und Dunkelheit bzw. in den Farben ein. Dies ist z. B. der Fall bei Seifenblasen und bei dünnen Ölschichten auf Wasser. Hierher gehören auch die sog. NEWTONSchen Ringe. Diese entstehen, wenn auf eine ebene Glasplatte eine schwach gekrümmte Konvexlinse gedrückt wird; dann stellt die Luft zwischen beiden eine dünne Schicht vor, deren Dicke gleichmäßig zunimmt. Es bilden sich daher in homogenem Lichte helle und dunkle Ringe,

in weißem farbige. In der Mitte, also an der Berührungsstelle zwischen Platte und Linse, herrscht Dunkelheit, da hier die Luftschicht zwar gleich Null ist, aber wegen Reflexion am dichteren Medium ein Gangunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge, also Phasenumkehrung entsteht.

§ 140. **Beugung.** Mit Interferenz verbunden ist auch die Beugung des Lichts um den Rand undurchsichtiger Körper. Dringen z. B. parallele Lichtstrahlen durch den sehr schmalen Spalt AB (Fig. 112), so breiten sie sich nach dem im § 62 Gesagten auch seitlich aus. Läßt man sie durch eine (hier nicht gezeichnete) Sammellinse gehen, so vereinigt diese die einzelnen verschieden gerichteten parallelen Strahlenbündel auf dem in ihrer Brennebene angebrachten Schirme MN in bestimmten Punkten, ohne daß hierdurch der Gangunterschied, den die Strahlen während ihres parallelen Verlaufes¹ hatten, geändert wird. Bei Anwendung von homogenem

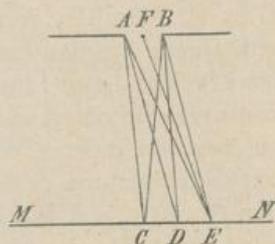


Fig. 112.

(einfarbigem) Lichte treten nun folgende Erscheinungen auf: An der AB gerade gegenüberliegenden Stelle C kommen alle Elementarwellen ohne Gangunterschied, also mit derselben Phase an; hier muß also Helligkeit herrschen. An allen anderen Punkten kommen aber die Strahlen mit einem Gangunterschied an, der um so größer wird, je schräger die Strahlen auf den Schirm fallen, d. h. je größer der „Beugungswinkel“ wird. Beträgt der Gangunterschied z. B. in D für die Randstrahlen AD und BD eine halbe Wellenlänge, dann müssen diese Randstrahlen sich aufheben, da sie genau entgegengesetzte Phase haben [§ 64], die dazwischenliegenden Strahlen aber nicht; es wird daher auch in D Helligkeit herrschen, wenn auch geringere als in C . In E dagegen, wo die Randstrahlen AE und BE mit einer Wegdifferenz von einer ganzen Wellenlänge ankommen mögen, muß Dunkelheit herrschen. Denn wenn F die Mitte von AB vorstellt, so heben sich die Strahlen AE und FE gegenseitig auf, und ebenso der Reihe nach die zwischen AF und FB liegenden Strahlen, da immer für je zwei derselben ein Gangunterschied von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge besteht. Weiter muß an der Stelle, wo die Randstrahlen mit einem Gangunterschied von $\frac{3}{2}$ Wellenlängen ankommen, wieder Helligkeit herrschen. Denkt man sich nämlich das betreffende Strahlenbündel in drei Teilbündel zerlegt, deren Randstrahlen je um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge differieren, so müssen nach dem eben Gesagten die beiden ersten Teilbündel sich

¹ Der Einfachheit wegen sind in der Figur die Strahlenbündel bereits vom Spalt AB an konvergent gezeichnet, obwohl sie in Wirklichkeit vom Spalt bis zur Linse aus parallelen Strahlen bestehen.

gegenseitig aufheben, so daß das dritte Teilbündel allein zur Geltung kommt; auf dem Schirm entsteht also wieder Helligkeit, wenn auch geringere als in *C*, weil ja nur $\frac{1}{3}$ der Strahlen wirksam ist. So ergibt sich ganz allgemein, daß auf dem Schirm helle bzw. dunkle Stellen entstehen müssen, je nachdem der Gangunterschied der dort ankommenden Randstrahlen eine ungerade bzw. gerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt. Besonders schöne Beugungserscheinungen erhält man durch zahlreiche eng nebeneinander liegenden Spalten, sog. Gitter. Eine Art derselben wird z. B. dadurch hergestellt, daß man mit einem Diamanten feine parallele Striche in Glas einritz (300 bis 1700 auf 1 mm); hier wirken die geritzten, matt gewordenen Stellen wie undurchsichtige Schirme, und die Stellen zwischen zwei Strichen entsprechen einem Spalt. Die entstehenden Interferenzstreifen sind um so breiter und deutlicher, je größer die Wellenlänge der betreffenden Strahlen und je schmaler der Spalt ist. Verwendet man weißes Licht anstelle des einfarbigen, so entstehen, entsprechend dem im § 138 Gesagten, auch bei der Interferenz durch Beugung farbige Streifen (abgesehen von der weißbleibenden Mitte). Man erhält mit anderen Worten sog. Beugungs- oder Gitterspektren. Diese unterscheiden sich von den durch Prismen erzeugten (Dispersions-) Spektren dadurch, daß hier die Ablenkung der einzelnen Lichtstrahlen unabhängig von der Substanz und genau proportional der Wellenlänge ist (Blau wird z. B. am schwächsten abgelenkt). Man bezeichnet sie daher auch als Normalspektren und benutzt sie zur bequemen und genauen Messung der Wellenlänge von Lichtstrahlen.

Weitere Beugungserscheinungen sind z. B. das Schillern von Spinnfäden, das Erscheinen farbiger Ringe um Flammen, die man durch angelaufene Fensterscheiben betrachtet, die sog. Höfe der Sonne und des Mondes usw. Eine wichtige Rolle spielen Beugungserscheinungen auch bei der

Bildentstehung im Mikroskop. Da ein mikroskopisches Objekt nicht selbstleuchtend ist, sondern erst mittels durchfallenden Lichts sichtbar gemacht wird, und da in ihm zahlreiche enge lichtdurchlässige Stellen mit lichtundurchlässigen abwechseln, so wirkt es optisch wie eine Vielheit von neben- und übereinander liegenden komplizierten Gittern. Außerdem findet auch eine Beugung im Objektiv statt, die um so mehr ausgesprochen ist, je kleiner sein Durchmesser, also je stärker die Vergrößerung ist. Auf diesen Beugungserscheinungen beruht es, daß das Bild eines Objektpunktes nicht ebenfalls punktförmig, sondern scheibenförmig verbreitert erscheint. Infolgedessen können zwei Punkte des Objekts, die so nahe aneinander liegen, daß ihre scheibchenförmigen Bilder sich teilweise decken, nicht getrennt erkannt werden, mag man auch noch so scharfe Vergrößerungen anwenden. Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops hat also eine bestimmte Grenze, die nach ABBE und HELMHOLTZ dann erreicht ist, wenn der Abstand zweier Punkte im Objekt ca. 1 Wellenlänge (bei schiefer Beleuchtung ca. $\frac{1}{2}$ Wellenlänge) des angewandten Lichtes beträgt. Man kann nun das Auflösungsvermögen einmal dadurch steigern, daß man sehr kurzwelliges Licht (blaues, violettes, ultraviolette);

letzteres nur für Mikrophotographie) anwendet. Das zweite, für die Praxis vornehmlich in Betracht kommende Mittel ist die Benutzung von Immersions-systemen, da in solchen, als optisch dichteren Medien die Lichtgeschwindigkeit, somit auch die Wellenlänge kleiner ist als in Luft [§ 116]. Ist λ die Wellenlänge des angewandten Lichts, n der Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit, so wird in dieser die Wellenlänge $\lambda:n$. Die äußerste Grenze des Auflösungsvermögens ist gegenwärtig die Erkennung von zwei Punkten, deren Abstand im Objekt $0,1 \mu$ beträgt (Untersuchung mit ultraviolettem Licht von $350 \mu\mu$ Wellenlänge und mit numerischer Apertur 1,66).

Ultramikroskopie. Dunkelfeldbeleuchtung. In neuester Zeit hat man gelernt, auch Teilchen sichtbar zu machen, die jenseits des mikroskopischen Auflösungsvermögens liegen. Diese Ultramikroskopie beruht auf dem Prinzip der Dunkelfeldbeleuchtung, wobei die Objekte hell auf dunklem Grunde erscheinen und eben infolge der dadurch gesteigerten Kontrastwirkung noch zur Wahrnehmung kommen, wo die gewöhnliche Hellfeldbeleuchtung versagt. Bei dieser Methode erfolgt die Abbildung nicht mittels direkter Beleuchtungsstrahlen, sondern durch Strahlenbüschel, die an den Teilchen des Objekts eine Beugung erfahren und so ins Gesichtsfeld gelangen. Um dies zu erreichen, gibt es verschiedene Mittel. Bei dem zuerst konstruierten Ultramikroskop (SIEDENTOPF und ZSIGMONDY 1903) wird das Licht einer seitlich stehenden sehr starken Lichtquelle L (Fig. 113) durch einen Kondensator im Objekt konzentriert,

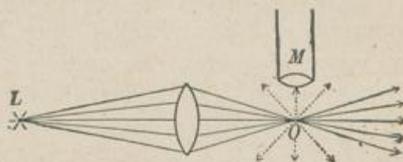


Fig. 113.

so daß also die direkten Beleuchtungsstrahlen annähernd rechtwinklig zur Mikroskopachse verlaufen und nur die (gestrichelt gezeichneten) Beugungsbüschel ins Mikroskop gelangen. Das hier angewandte Prinzip ist analog demjenigen, das dem Sichtbarwerden der „Sonnenstäubchen“ zugrunde liegt. Diese in der Luft suspendierten feinsten Staubteilchen werden ja in einem Bündel Sonnenstrahlen, das in einen nicht zu hellen Raum eintritt, auch nur dadurch sichtbar, daß das von ihnen abgebeugte Licht ins Auge des seitlichen Beobachters gelangt. Man kann aber Dunkelfeldbeleuchtung auch bei axial einfallendem Licht erreichen, wenn man z. B. im Beleuchtungsapparat oder im Objektiv Zentralblenden anbringt und, zur vollständigen Ausschaltung der direkten Beleuchtung, auch noch die seitlich der Blende eindringenden Strahlen durch Totalreflexion an der Oberfläche des Deckgläschens beseitigt. Sehr zweckmäßig hierfür sind die sog. Spiegelkondensoren, bei denen die Beleuchtungsstrahlen nach dem Objekt nur durch Spiegelung hingeleitet werden. Fig. 114 zeigt z. B. schematisch den Kardiodkondensator der Firma ZEISS. P ist ein Glaskörper mit parabelartig gekrümmten Seitenflächen, J die Immersionsschicht, O der Objektträger, auf dem das Präparat mit Deckgläschen liegt. B ist eine Zentralblende, welche Strahlen von der Apertur 0 bis 1,1 abhält. Die ausgezogene Pfeillinie stellt den Verlauf eines beleuchtenden Strahles vor, der an den Seitenflächen des Kondensors sowie im Deckgläschen total

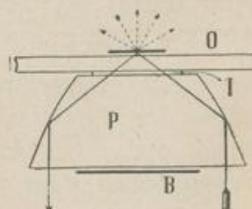


Fig. 114.

reflektiert wird. Von den beleuchteten Stellen des Präparates gehen dann wieder Beugungsbüschel (gestrichelt gezeichnet) in das Mikroskop. — Mittels Dunkelfeldbeleuchtung kann man noch Teilchen erkennen, deren Durchmesser bis zu herab zu $4 \mu\mu$ beträgt¹, vorausgesetzt, daß der Abstand zweier Teilchen dem Auflösungsvermögen des Mikroskops entspricht. Das Sichtbarwerden der Teilchen beruht, wie erwähnt, auf Entstehung von hellen Beugungslichtscheibchen. Diese geben durchaus keinen Aufschluß über die wahre Form und Größe der Teilchen, erlauben aber ihr Vorhandensein und ihre Bewegung, event. auch ihre Zahl festzustellen. Die ultramikroskopische Anwendung der Dunkelfeldbeleuchtung ist daher sehr wichtig zum Studium von nicht homogenen Medien (z. B. durch Goldteilchen gefärbte Rubingläser, Kolloide in Lösungen und Zellen), zur Beobachtung der BROWN'schen Molekularbewegung (zitternde Bewegung kleinster in Flüssigkeiten suspendierter Teilchen, hervorgerufen durch Anprall der Flüssigkeitsmoleküle, die sich analog den Gasmolekülen bewegen) usw. Aber auch für mikroskopische Untersuchungen im engeren Sinne ist die Dunkelfeldbeleuchtung wertvoll, da infolge der starken Kontrastwirkung feinste Objekte (z. B. Spirochaeten, Bakteriengeißeln) auch ungefärbt gut wahrgenommen werden können.

§ 141. **Begriff der Polarisation.** Polarität wird die Eigenschaft genannt, daß zwei Enden eines Körpers, die Pole (man denke z. B. an einen Magneten), besondere Eigenschaften gegenüber den anderen Seiten haben. Nach der üblichen Anschauung pflanzt sich nun das Licht durch transversale Ätherschwingungen fort, und zwar so, daß die Ätherteilchen in allen möglichen Ebenen — immer senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung — pendeln. Ein gewöhnlicher Lichtstrahl, dessen Achse senkrecht auf der Ebene des Papiers steht, würde also

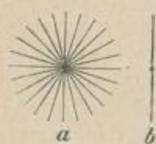


Fig. 115.

auf dem Querschnitt etwa ein Bild ergeben, wie es Fig. 115a andeutet. Demgegenüber schwingen beim geradlinig polarisierten Lichte, dessen Querschnitt Fig. 115b zeigt, alle Ätherteilchen nur in einer Ebene, ebenfalls senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung; diese Ebene heißt Schwingungsebene, die zu ihr senkrechte Polarisationssebene². Man erhält geradlinig (oder linear) polarisiertes Licht aus gewöhnlichem durch Doppelbrechung, ferner durch Spiegelung und einfache Brechung (s. u.).

§ 142. **Doppelbrechung.** Die Kristalle aller Systeme, mit Ausnahme des regulären, sind anisotrop³, d. h. sie haben in verschiedenen, und zwar besonders in zwei zueinander senkrechten Richtungen verschiedene physikalische Eigenschaften (Dichte, Elastizität,

¹ Der Durchmesser von Wasserstoffmolekülen ist berechnet worden auf $0,1 \mu\mu$, von Alkoholmolekülen auf $0,5 \mu\mu$, von Molekülen der löslichen Stärke auf $5 \mu\mu$. Vgl. auch die Zusammenstellung über Lichtwellenlängen im § 135. — ² Bisweilen wird auch die Schwingungsebene als Polarisationssebene bezeichnet und umgekehrt. — ³ α privativum, ἴσος gleich, τρόπος Richtung, Einrichtung.

Wärmeleitungsvermögen usw.). So ist auch in diesen beiden Richtungen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts verschieden groß, und dadurch ist eine Doppelbrechung bedingt, d. h. ein auffallender Strahl teilt sich im Kristall in zwei Strahlen, die Gegenstände werden daher doppelt gesehen. Der eine von beiden Strahlen folgt dem SNELLIUS-schen Gesetze [§ 116] und heißt daher der ordentliche, während dies beim außerordentlichen nicht der Fall ist. Beide sind polarisiert, und zwar so, daß ihre Schwingungsebenen senkrecht zueinander sind; kurz ausgedrückt, sie sind zueinander senkrecht polarisiert. Alle doppelbrechenden Kristalle haben nun eine oder zwei Symmetrieachsen; in den senkrecht durch diese gelegten Ebenen sind die physikalischen Eigenschaften (also auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes) gleich, dagegen verschieden von denjenigen in der Richtung der Achsen selbst. Wenn sich also Licht in der Richtung dieser Achsen fortpflanzt, werden sich die Ätherschwingungen des ordentlichen und außerordentlichen Strahles, die ja in dazu senkrechten Ebenen (und senkrecht zueinander) erfolgen, nach dem eben Gesagten gleich schnell fortpflanzen; mit anderen Worten, es tritt dann keine Doppelbrechung ein. Diese Richtungen, auch optische (Haupt-) Achsen genannt, fallen bei den optisch einachsigen Systemen, zu denen das quadratische und hexagonale gehört, mit der kristallographischen Hauptachse zusammen oder sind ihr parallel; bei den optisch zweiachsigen dagegen, wo die Verhältnisse überhaupt viel komplizierter sind, ist dies nicht der Fall. Jede Ebene, die durch einen Kristall so gelegt ist, daß die optische Achse in sie fällt, sowie jede dazu parallele Ebene heißt Hauptschnitt. Zu den optisch einachsigen Kristallen gehört z. B. der Kalkspat, wegen seiner Doppelbrechung auch isländischer Doppelspat genannt; er kristallisiert in Rhomboëdern. Bei seiner Grundform sind zwei gegenüberliegende Ecken (a und c Fig. 116) vor den anderen dadurch ausgezeichnet, daß alle drei hier zusammenstoßende Winkel stumpfe sind. Verbindet man diese Ecken, so erhält man die kristallographische Hauptachse ac , die zugleich optische Achse ist; $abcd$ ist ein Hauptschnitt. Während also in der Richtung der optischen Achse keine Doppelbrechung eintritt, muß dies in allen anderen

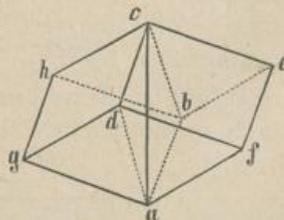


Fig. 116.

Richtungen der Fall sein, weil eben dann die beiden Komponenten, in die das Licht zerlegt wird, ungleiche Geschwindigkeit besitzen. Hat der ordentliche Strahl eine kleinere Geschwindigkeit als der außerordentliche, wird er also stärker gebrochen, so heißt der betreffende Kristall optisch negativ, im anderen Falle positiv.

§ 143. **Polarisation durch Doppelbrechung.** Wie oben gezeigt, bietet die Doppelbrechung ein bequemes Mittel, polarisiertes Licht zu erhalten. Da aber die Schwingungsebenen des ordentlichen und außerordentlichen Strahles aufeinander senkrecht stehen, durch ihre Vereinigung nach Austritt aus dem Kristall also die Polarität fortfallen würde, so muß einer dieser Strahlen beseitigt werden. Beim Turmalin z. B., einem rötlich bis grünen Kristall, geschieht dies von selbst durch Absorption des ordentlichen Strahls. Es tritt hier also nur ein polarisierter Strahl heraus und dieser schwingt in der Richtung der optischen Achse; durch Turmalinplatten, die parallel zur optischen Achse geschliffen sind, also einen Hauptschnitt vorstellen, gehen somit nur diejenigen Komponenten eines gewöhnlichen Lichtstrahls durch, die parallel der optischen Achse schwingen. Eine solche Turmalinplatte dient dazu, um gewöhnliches Licht zu polarisieren, heißt daher **Polarisator**. Legt man eine zweite Turmalinplatte von gleicher Beschaffenheit so auf die erste, daß die Achsen parallel sind, so können die durch die erste gegangenen Lichtstrahlen auch die zweite passieren; blickt man also durch die

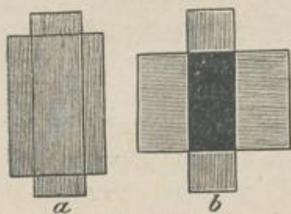


Fig. 117.

Platten, so ist das Gesichtsfeld hell. Legt man sie aber mit gekreuzten Achsen aufeinander, so muß das Gesichtsfeld dunkel sein, weil ja immer nur parallel der Achse schwingende Strahlen durchgehen können (Fig. 117). Zwischen diesen Extremen gibt es natürlich Übergänge (s. u.). Die zweite Platte dient zum Nachweis polarisierten Lichtes, weil ja gewöhnliches, das nach allen Richtungen schwingt, in jeder Stellung durch sie gehen würde; sie heißt daher **Analysator**. Zwei Turmalinplatten zusammen bilden einen vollkommenen Polarisationsapparat. Zweckmäßig verwendet man dazu die Turmalinzange, eine federnde Zange, die an ihren Enden zwei um ihre Achse drehbare Turmalinplatten trägt.

Häufiger als den Turmalin, der braun oder grün gefärbtes und dadurch geschwächtes Licht liefert, benutzt man zur Darstellung polarisierten Lichtes den **Doppelspat** in Form des **NICOLSCHEN PRISMAS**, kurz **Nicol** genannt.

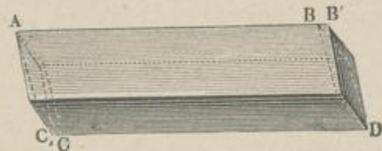


Fig. 118.

$AB'DC'$ (Fig. 118) sei ein natürliches Kalkspatrhomboëder, dessen durch die Kanten AB' und $C'D$ gehende Hauptschnittsebene in der Zeichnungsebene liegen möge (Fig. 119). Man schleift nun zunächst (entsprechend den punktierten Linien der Figur) die Endflächen so ab, daß sie mit den Kanten AB und CD Winkel von 68° statt wie ursprünglich

von 71°) bilden. $ABCD$ (Fig. 115) sei dann der neue Durchschnitt durch die Eckpunkte. Darauf wird der Kristall senkrecht auf diese Ebene AD und zugleich senkrecht auf die neuen Endflächen AC und BD durchsägt, so daß also zwei dreiseitige Prismen entstehen, und dann werden die Schnittflächen wieder in der alten Lage durch Kanadabalsam zusammengekittet.

Trifft nun ein Lichtstrahl ab (Fig. 119) auf die rhombische Vorderfläche des Prismas, so wird er in zwei Strahlen zerlegt. Da der ordentliche Strahl bc sich im Doppelspat langsamer fortpflanzt als im Kanadabalsam, dieser mithin für ihn ein optisch dünneres Medium vorstellt, so wird er bei genügend

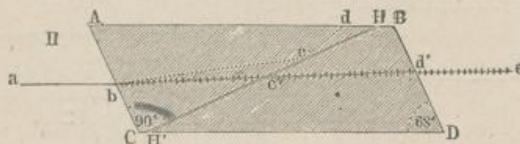


Fig. 119.

schrägem Auffall an der Balsamschicht total reflektiert und seitlich bei d in der dunklen Einfassung des Prismas absorbiert. Der außerordentliche Strahl bc' dagegen, der im Kristall rascher verläuft als im Balsam, geht unbehindert durch diesen und verläßt das Prisma bei d' parallel mit seiner ursprünglichen Richtung. Ein Nicol läßt also nur Strahlen hindurch, die ebenso schwingen wie der außerordentliche Strahl, d. h. parallel dem Hauptschnitt oder, was dasselbe ist, parallel der kürzeren Diagonale seiner rhombischen Endflächen, wie Fig. 120, zeigt, die die Endfläche eines Nicols samt Fassung darstellt. PP ist die zur Schwingungsebene senkrechte Polarisationssebene. Je nachdem also die Achsen zweier Nicols parallel oder rechtwinklig gekreuzt sind, resultiert Helligkeit oder Dunkelheit, wie beim Turmalin. Ein Nicol kann natürlich ebenfalls sowohl als Polarisator wie als Analysator dienen.

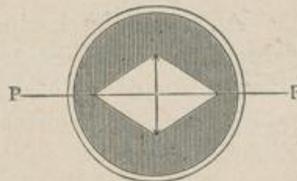


Fig. 120.

Bilden die optischen Achsen beider Nicols (bzw. Turmalinplatten) einen anderen Winkel als einen Rechten, sei z. B. MN (Fig. 121) die Richtung der Achse im ersten, PQ die im zweiten Nicol, so wird das durch den Polarisator tretende Licht, dessen Schwingungsrichtung und Amplitude OC sei, nach dem Parallelogramm der Kräfte in die Schwingungen OA und OB zerlegt, von denen nur erstere den Analysator passiert, da sie in dessen Hauptschnitt PQ fällt. Die Helligkeit des durchgelassenen Lichtes entspricht der Größe der Komponente $AO = OC \cos \alpha$, ist also proportional dem Kosinus des Winkels α .

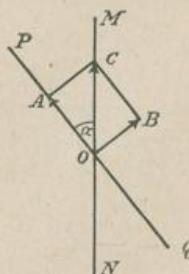


Fig. 121.

§ 144. **Polarisation durch Reflexion und einfache Brechung.** Gewöhnliches Licht wird auch durch Reflexion, ausgenommen an Metallspiegeln, in linear polarisiertes um-

gewandelt (MALUS). Und zwar ist die Polarisationssebene des reflektierten Lichts identisch mit der Einfallsebene; nach § 141 erfolgen also die Schwingungen senkrecht zu dieser

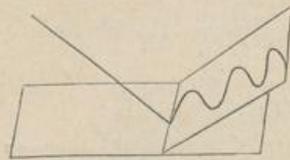


Fig. 122.

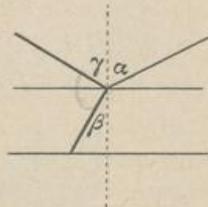


Fig. 123.

und parallel zur Oberfläche des Spiegels (Fig. 122). Gewöhnlich findet hierbei nur eine teilweise Polarisation statt; nur wenn der Einfallswinkel so groß ist, daß der reflektierte Strahl

mit dem gebrochenen einen rechten Winkel bildet, ist alles reflektierte Licht polarisiert (Gesetz von BREWSTER).

Die Größe dieses Polarisationswinkels hängt vom Brechungsindex [§ 116] ab. Dieser ist hier (Fig. 123) $\sin \alpha : \sin \beta$. Nun ist $\alpha = \gamma$ und $\beta + \gamma = R$. Also $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\cos \gamma} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$. Bei vollständiger Polarisation ist also die Tangente des Einfallswinkels gleich dem Brechungsindex. Weißes Licht kann durch Reflexion stets nur teilweise polarisiert werden, da seine Bestandteile verschiedene Brechungsindex, somit auch verschiedene Polarisationswinkel haben.

Auch das durch eine Glasplatte hindurchgegangene, also einfach gebrochene, Licht ist teilweise polarisiert, und zwar steht bei der Brechung die Polarisationssebene senkrecht zu der Einfallsebene; die Schwingungen des Lichts erfolgen hier also parallel der Einfallsebene. Das so erhaltene polarisierte Licht ist aber wegen der Beimengung anderen Lichts sehr schwach; verstärkt wird es, indem man es durch mehrere Glasplatten hindurchgehen läßt, da hierbei das nicht polarisierte Licht durch wiederholte Reflexion beseitigt wird.

Die verschiedene Schwingungsrichtung des reflektierten und durchgelassenen Lichtes beruht darauf, daß Lichtstrahlen, deren Ätherteilchen senkrecht oder nur wenig geneigt zur Oberfläche der Glasfläche schwingen, leicht in diese eindringen können, während Strahlen, bei denen die Ätherschwingungen parallel zur Glasfläche erfolgen, reflektiert werden. Um einen rohen Vergleich zu gebrauchen, wird ja auch ein Messer, das mit der Spitze auf ein Brett fällt, in dieses leicht eindringen können; dagegen wird es zurückprallen, wenn es mit der Breitseite auffällt.

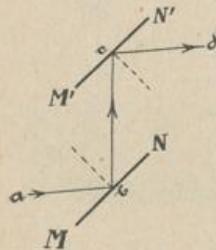


Fig. 124.

Man kann nach dem Gesagten auch zwei Spiegel als Polarisationsapparat benutzen. Fällt z. B. der Lichtstrahl ab unter dem Polarisationswinkel auf den Spiegel MN (Fig. 124), der hier Polarisator ist, so wird er in der Richtung bc reflektiert, und gleich-

zeitig schwingen seine Teilchen alle senkrecht zur Einfallsebene. Bildet $M'N'$, der Analysator, denselben Winkel zur Achse, die hier mit dem Lichtstrahl bc zusammenfällt, so kann er nur dann bc vollständig reflektieren, wenn die Einfallsebene abc parallel zur Einfallsebene bcd ist. Dies ist aber nur der Fall, wenn $M'N'$ zu MN entweder so steht wie in der Figur oder aber (unter Beibehaltung seiner Neigung zur Achse bc) um 180° gedreht ist. Wird dagegen $M'N'$ um 90° bzw. 270° gedreht, so daß also jetzt die Einfallsebene bcd senkrecht zu abc steht, so wird kein Licht an $M'N'$ reflektiert. Dreht man also $M'N'$ einmal vollständig im Kreise herum, so findet für ein Auge in d viermal ein allmählicher Wechsel zwischen Hell und Dunkel statt. Benutzt man als Analysator einen Satz Glasplatten und beobachtet das durchgehende Licht, so sind die Erscheinungen analog, jedoch gerade umgekehrt.

§ 145. **Interferenz polarisierten Lichtes.** Polarisierte Lichtstrahlen zeigen nur dann Interferenzerscheinungen, wenn sie in einer Ebene schwingen. Derartige Interferenzerscheinungen treten z. B. auf, wenn man ein dünnes Gipsblättchen zwischen Polarisator und Analysator eines Polarisationsapparates bringt. Ein solches Gipsblättchen liefert durch Doppelbrechung¹ zwei senkrecht zueinander polarisierte Strahlen, die sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. Durch den Polarisator in die Richtung ab (Fig. 125) gebrachte Lichtstrahlen werden also durch das Gipsblättchen in zwei Teilstrahlen zerlegt, die etwa in den Richtungen ef und gh schwingen [vgl. § 143, letzten Absatz], und diese Teilstrahlen am Analysator wieder in Komponenten nach den Richtungen ab und cd . Je nachdem nun der Analysator parallel oder senkrecht zum Polarisator steht, gehen nur die in der Richtung ab bzw. cd schwingenden Komponenten durch ihn hindurch. Jedenfalls haben aber die vorher rechtwinklig zueinander polarisierten Strahlen nach Passieren des Analysators dieselbe Schwingungsebene, und da sie ferner aus Komponenten bestehen, die infolge der Doppelbrechung einen Gang-, somit auch einen Phasenunterschied, abhängig von der Dicke des Gipsblättchens, besitzen, so werden sie sich durch Interferenz schwächen oder verstärken. Das Gesichtsfeld wird also bei Anwendung einfarbigen

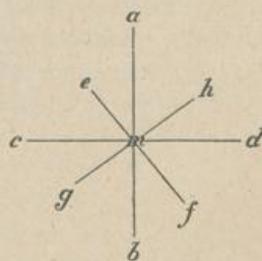


Fig. 125.

¹ Da in der Richtung der optischen Achsen keine Doppelbrechung stattfindet [§ 142], muß bei Anwendung parallelen Lichtes ein solches Gipsblättchen parallel zur optischen Achse geschnitten sein; bei Anwendung konvergenter Lichtes kann es dagegen auch senkrecht zur Achse geschnitten sein, da hier die schräg einfallenden Strahlen Doppelbrechung erleiden.

Lichtes mehr oder weniger hell erscheinen, als es ohne Zwischenschaltung des Gipsblättchens der Fall wäre. Benutzt man jedoch weißes Licht, so muß, da ja immer nur eine bestimmte Strahlenart (entsprechend ihrer Wellenlänge und der Dicke des Blättchens) geschwächt oder verstärkt wird, das Gesichtsfeld in einer bestimmten Farbe erscheinen¹.

In ähnlicher Weise entsteht in Platten optisch einachsiger Kristalle, die senkrecht zur Achse geschnitten sind, bei Anwendung konvergenter Lichtstrahlen zwischen gekreuzten Nicols ein System von hellen und dunklen bzw. farbigen Ringen, das von einem schwarzen Kreuz in der Richtung der Achsen des Polarisators und Analysators durchzogen ist; zwischen parallelen Nicols erscheinen die komplementären Farben und ein helles Kreuz. Bei optisch zweiachsigen Kristallen sind die Erscheinungen noch komplizierter.

Hierauf beruht auch das Polarisationsmikroskop, bei dem polarisiertes Licht konvergent gemacht wird, dann durch den zu untersuchenden Körper dringt und schließlich hinter dem Okular noch einen Analysator passiert. Es dient einmal zum Erkennen doppelbrechender Substanz, denn diese verrät sich durch ihren Farbenglanz; ferner treten dadurch feinere Strukturunterschiede besser hervor.

§ 146. **Zirkulare Polarisation.** Während es sich bei den verschiedenen Interferenzerscheinungen um die Zusammensetzung von Strahlen handelte, welche dieselbe Schwingungsebene, aber verschiedene Phase hatten, betrachten wir nun die Zusammensetzung von Strahlen mit verschiedener Schwingungsebene. Zum besseren Verständnis sei fol-

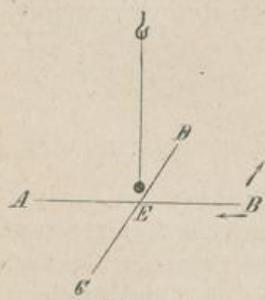


Fig. 126.

gendes vorausgeschickt: Wenn einem Pendel, das durch einen bestimmten Impuls zwischen A und B (Fig. 126) schwingt, gleichstarke Impulse senkrecht zu dieser Bahn an verschiedenen Stellen erteilt werden, so entstehen verschiedene Schwingungsformen. Ist z. B. das Pendel in B angelangt, hat es also von der Ruhelage E aus $\frac{1}{4}$ einer ganzen Schwingung [§ 33] zurückgelegt, und erhält es hier einen Impuls in der Richtung und Stärke von ED ($=EB$), so wird eine Kreisbewegung nach links resultieren. Trifft der zweite Impuls das Pendel in Punkt A seiner Bahn, wo es $\frac{3}{4}$ einer ganzen Schwingung zurückgelegt hat, so entsteht analog eine Kreisbewegung nach rechts. Wirkt dagegen der zweite Impuls auf das Pendel in E ein, wenn es

¹ Die Farbenercheinungen, die bei Interferenz polarisierten Lichtes auftreten, werden auch chromatische Polarisation genannt.

also seine Bewegung erst beginnt oder eine halbe bzw. ganze Schwingung zurückgelegt hat, so entsteht eine geradlinige Bewegung in diagonaler Richtung. Trifft endlich der zweite Impuls das Pendel auf der Strecke zwischen A und E bzw. E und B , so resultiert eine elliptische Bewegung. Genau dasselbe findet nun beim polarisierten Lichte statt. Wenn z. B. die beiden durch einen doppelbrechenden Körper hindurchgegangenen, senkrecht zueinander polarisierten Schwingungen sich wieder zusammensetzen, so hängt es allein von ihrem Gangunterschied ab, welche Form der Bewegung resultiert. Ist er $= 0$ oder beträgt er $\frac{1}{2}$ Wellenlänge oder ein Vielfaches davon, so entsteht geradlinig polarisiertes Licht; beträgt er $\frac{1}{4}$ Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches davon, so entsteht kreisförmig polarisiertes Licht, und für die Zwischenwerte elliptisch polarisiertes Licht. Für die beiden letzten Formen ist streng genommen die Bezeichnung „polarisiert“ nicht ganz passend, da ja z. B. kreisförmig polarisiertes Licht sich nach allen Richtungen gleich verhält. Es ist vom natürlichen Lichte nur dadurch zu unterscheiden, daß, wenn man den Gangunterschied seiner beiden Komponenten um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge erhöht oder erniedrigt, indem man es z. B. durch ein entsprechend dickes Glimmerblättchen („Viertelwellenblättchen“) schickt, geradlinig polarisiertes Licht entsteht.

§ 147. **Drehung der Polarisationssebene.** Ebenso wie unter Umständen aus zwei geradlinigen Bewegungen eine kreisförmige entsteht, kann jede geradlinige Bewegung als Resultante zweier gleichgroßer, entgegengesetzt gerichteter Kreisbewegungen aufgefaßt werden. Wirken z. B. auf das Teilchen a (Fig. 127) zwei gleiche Impulse in der Richtung der Pfeile, so wird es den Weg ab beschreiben. Setzt aber der nach links gerichtete Impuls später ein, wenn a schon in a' ist, oder wirkt er schwächer als der nach rechts gerichtete, dann resultiert die Schwingungsrichtung $a'b'$ [vgl. § 16, 1]. In der Tat findet nun beim Quarz und einigen anderen festen Körpern, besonders aber bei vielen Flüssigkeiten (z. B. Lösungen von Zucker, Dextrin, Kampfer, Weinsäure, ätherische Öle usw.) eine Zerlegung geradlinig polarisierten Lichts in zwei entgegengesetzt kreisförmige Bewegungen statt¹. Und da sich hierbei letztere ungleich schnell fortpflanzen, so wird, wenn sie sich wieder zu geradlinig polarisiertem Lichte vereinigen, das letztere in einer anderen Ebene schwingen, die Polarisationssebene wird also, wie man sagt, durch diese optisch aktiven Substanzen gedreht sein, z. B. nach

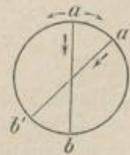


Fig. 127.

¹ Als Ursache nimmt man Besonderheiten im inneren Bau der Kristallteilchen bzw. Flüssigkeitsmoleküle an.

rechts (wie beim Rohrzucker usw.), wenn die rechtsherum gehende kreisförmige Bewegung sich schneller fortpflanzt. Diese Drehung der Polarisationssebene ist für die verschiedenen Lichtstrahlen verschieden groß; sie nimmt vom Rot zum Violett zu. Für ein und dieselbe Farbe ist sie proportional der Dicke der benutzten Quarzplatte bzw. bei Flüssigkeiten proportional der Dicke ihrer Schicht und ihrer Konzentration. Man kann daher auf diese Weise den Gehalt von Lösungen an optisch aktiven Stoffen ermitteln. Die hierzu benutzten Polarisationsapparate heißen Polarimeter oder Polaristroßometer¹; dienen sie speziell zur Zuckerbestimmung, auch Saccharimeter².

Durch eine l dm lange Schicht einer Zuckerlösung, die in 100 ccm z gr Zucker enthält, wird die Polarisationssebene des Lichtes z. B. für das gelbe Natriumlicht um den Winkel $\alpha = 0,665^\circ \cdot z \cdot l$ gedreht. Ist α bekannt, so ergibt sich daraus ohne weiteres z . Bei den einfachsten Saccharimetern wird nun die Zuckerlösung zwischen gekreuzte Nicols gebracht, wodurch (bei Anwendung einfarbigen Lichtes) das bisher dunkle Gesichtsfeld heller wird. Dreht man hierauf den Okular-Nicol so lange, bis das Gesichtsfeld wieder dunkel geworden ist, so ist dadurch der Drehungswinkel α bekannt. Genauere Resultate erhält man, wenn man zwischen beide Nicols eine Doppelquarzplatte einschaltet. Diese besteht aus zwei aneinandergelagerten, gleichdicken, senkrecht zur optischen Achse geschliffenen Quarzplatten, von denen eine rechts-, die andere linksdrehend ist. Beide Platten erscheinen sowohl bei gekreuzten wie bei parallelen Nicols gleich hell (bzw. bei Anwendung weißen Lichtes gleich gefärbt); nach Zwischenschaltung der Zuckerlösung

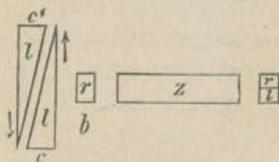


Fig. 128.

werden sie dagegen ungleich. Der Winkel, um den der Okular-Nicol gedreht werden muß, damit sie wieder gleich werden, entspricht wieder α . Beim SOLEIL'schen Saccharimeter bleibt der Okular-Nicol parallel zum Polarisator stehen; hier wird ein sog. Kompensator benutzt, um die Größe der Drehung zu bestimmen. Ein solcher besteht aus einer rechtsdrehenden Quarzplatte b (Fig. 128)

und zwei linksdrehenden Quarzkeilen c, c' . Letztere können so gegeneinander verschoben werden, daß ihre (genau durch eine Mikrometerschraube meßbare) gemeinsame Dicke gleich, größer oder kleiner wird, als die von b . Da nun das Drehungsvermögen einer 1 mm dicken Quarzschicht bekannt ist, so ergibt sich daraus der optische Effekt derjenigen Zuckerlösung, welcher durch den Kompensator das Gleichgewicht gehalten wird.

Magnetismus.

§ 148. **Definition.** Magnetismus³ wird die ihrem Wesen nach noch nicht genau erforschte Kraft genannt, welche Körper befähigt,

¹ *στροβός* das Herumdrehen im Kreise. — ² *saccharum* Zucker. —

³ Etymologie unsicher; entweder nach dem sagenhaften Hirten MAGNES, oder nach der Landschaft *Magnesia*, oder von *μάγω* bezaubern.

Eisen und ähnliche Körper anzuziehen und, wenn sie in horizontaler Ebene frei beweglich aufgehängt sind, eine bestimmte Richtung einzunehmen. Ein natürlicher Magnet ist der schon den Alten bekannte Magneteisenstein oder Magnetit (Fe_3O_4). Für physikalische und technische Zwecke kommen jedoch nur künstliche Magnete in Betracht, die aus Eisen hergestellt werden [§§ 153, 193].

§ 149. **Magnetische Anziehung.** Die künstlichen Magnete unterscheidet man nach ihrer Form in Stab- und Hufeisenmagnete, sowie (frei bewegliche) Magnetnadeln. Jeder Magnet hat zwei Stellen nahe an seinen beiden Enden, an denen die Anziehungskraft am größten ist, die Pole (Nord- und Südpol). Von hier nimmt die Anziehungskraft nach der Mitte hin allmählich ab, bis sie in der Indifferenzzone gleich Null ist. Man kann dies leicht zeigen, wenn man einen Magneten in Eisenfeilspäne legt. Je nach den Polen gibt es Nord- und Südmagnetismus, und es besteht das wichtige Gesetz, daß gleichnamige Pole sich abstoßen, ungleichnamige sich anziehen. Also z. B. Nordpol und Nordpol stoßen sich ab, Nordpol und Südpol ziehen sich an. Die von jedem Pol ausgehende magnetische Wirkung bezeichnet man als Polstärke, wofür man auch gleichbedeutend magnetische Menge oder Masse sagt. Das Produkt aus der Polstärke eines Poles und dem Abstand beider Pole heißt magnetisches Moment des Magneten.

Für zwei aufeinander wirkende magnetische Körper gilt nun das dem Gravitationsgesetz [§ 11] analoge COULOMBSche Gesetz, daß nämlich die Kraft der magnetischen Anziehung bzw. Abstoßung direkt proportional dem Produkte der Polstärken, umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung der Pole ist,

$$F = \frac{m m^1}{r^2} \cdot k.$$

Hierbei ist k eine von der gewählten Einheit der Polstärke abhängige Konstante. Setzt man diese gleich 1, so kann man als absolute Einheit der Polstärke (oder magnetischen Masse) diejenige Polstärke definieren, welche auf eine gleichgroße im Abstände 1 cm die Kraft 1 Dyne [§ 11] ausübt¹.

§ 150. **Magnetisches Feld. Kraftlinien.** Der ganze Raum, auf den sich die magnetische Wirkung erstreckt, heißt magnetisches Feld. Ein Magnet wirkt nicht nur durch Luft, sondern auch durch andere

¹ Für diesen Fall wird also $F = \frac{m^2}{r^2}$ und $m = \sqrt{F \cdot r^2}$. Hieraus ergibt sich als Dimension der Polstärke [§§ 5, 11] $\sqrt{m l t^{-2} \cdot l^2} = m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$ bzw. $gr^{1/2} cm^{3/2} sec^{-1}$.

Körper hindurch, Eisen ausgenommen. Die Richtung der magnetischen Kräfte kann man erkennen, wenn man z. B. auf die Pole eines Hufeisenmagneten ein Kartenblatt legt und darauf Eisenfeilspäne streut.

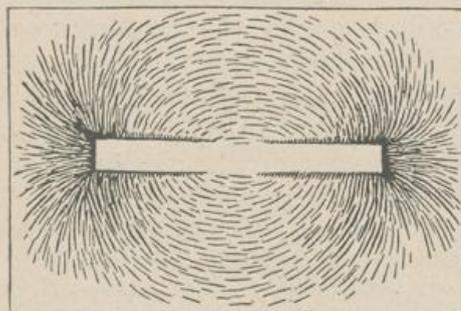


Fig. 129.

Letztere ordnen sich dann in Kurven, die sog. magnetischen Kraftlinien, an, die von einem Pol zum anderen ziehen und genau die Kraftrichtung des Magneten in jedem Punkte des magnetischen Feldes anzeigen (Fig. 129). Im einpoligen Felde strahlen die Kraftlinien radiär von dem Pole aus [vgl. § 190].

Es ist üblich, die Richtung der Kraftlinien dadurch zu bezeichnen, daß man annimmt, sie gehen außerhalb des Magneten vom Nordpol zum Südpol; demgemäß verlaufen sie im Innern des Magneten vom Südpol zum Nordpol. Die Einführung des Kraftlinienbegriffs ist zur Veranschaulichung mancher magnetischer Vorgänge sehr geeignet. Die Tatsache, daß ein Körper Magnetismus bekommt bzw. verliert, kann man z. B. auch dadurch ausdrücken, daß man sagt, er sendet Kraftlinien aus, bzw. er zieht seine Kraftlinien ein. Wird anderseits ein Körper von Kraftlinien geschnitten, so wird er magnetisch. Entsprechend obiger Definition entsteht an der Eintrittsstelle der Kraftlinien ein Südpol, an ihrer Austrittsstelle ein Nordpol. Weiterhin dienen die Kraftlinien auch zu einer übersichtlichen Darstellung der Feldstärke. Macht man nämlich die (an sich willkürliche) Annahme, daß in einem

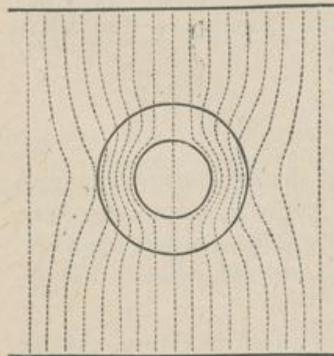


Fig. 130.

homogenen Felde von einem Pol, der die Einheit der magnetischen Menge besitzt, in einer zur Richtung der Kraftlinien senkrechten Ebene durch jedes Quadratcentimeter 1 Kraftlinie geht, dann kann man offenbar die Polstärke 2 dadurch definieren, daß hier durch jedes Quadratcentimeter 2 Kraftlinien gehen usw. Je dichter also an einer Stelle die Kraftlinien sind, desto größer ist hier die Feldstärke. Bringt man z. B. in ein magnetisches Feld einen Ring aus weichem Eisen, so gehen die meisten Kraftlinien bogenförmig um dessen Mitte herum (Fig. 130); das heißt nichts anderes, als daß im Innern eines solchen Eisenrings die Stärke des magnetischen Feldes sehr gering ist. Man benutzt diese magnetische Schirmwirkung

des Eisens z. B. dazu, um Magnetnadeln vom Einfluß des Erdmagnetismus unabhängig zu machen, indem man sie in ein Gehäuse aus Eisen bringt.

§ 151. **Magnetische Influenz.** Nähert man ein Stück Eisen einem Magneten, so wird es ebenfalls magnetisch, und zwar wird der dem

Nordpol des Magneten genäherte Teil zum Südpol und umgekehrt. Diese Erscheinung, auf der auch die Anziehung beruht, heißt magnetische Influenz und findet ihre Erklärung am besten durch die Annahme, daß in jedem unmagnetischen Eisen schon beide Arten von Magnetismus enthalten sind, aber so angeordnet, daß sie sich gegenseitig neutralisieren, nach außen also nicht wirken können. Nähert man aber einen Magneten, so zieht er den ungleichnamigen Magnetismus in das zugewandte Ende, den gleichnamigen stößt er in das entgegengesetzte. Diese Annahme erklärt auch die Indifferenzzone; denn hier stoßen ja Nord- und Südmagnetismus zusammen und neutralisieren sich daher.

§ 152. **Konstitution der Magnete.** Früher hatte man die bequeme, aber vage Vorstellung, der Magnetismus bestehe aus zwei Fluida (Flüssigkeiten), welche durch Influenz voneinander getrennt würden. Damit ist jedoch die Tatsache nicht zu erklären, daß, wenn man einen Magneten in der Mitte zerbricht, jeder dieser Teile wieder ein vollkommener Magnet mit Nord- und Südpol und Indifferenzzone ist. Dieser Versuch kann beliebig oft wiederholt werden. Man erklärt diese Erscheinung durch die Molekulartheorie, indem man sich vorstellt, daß schon die Moleküle kleinste Magnete sind. In den Magneten sind sie so regelmäßig angeordnet, daß alle Nordpole nach der einen, die Südpole nach der anderen Seite gerichtet sind, so daß sich ihre Wirkung addiert; im unmagnetischen Eisen dagegen sind sie ganz unregelmäßig durcheinander gelagert und daher unwirksam. Die Influenz erklärt sich demnach so, daß der Magnet auf die Moleküle des Eisens eine richtende Wirkung ausübt und alle gleichnamigen Pole nach derselben Seite hin dreht. Diese Drehung der Moleküle ist bei manchen Körpern, z. B. Schmiedeeisen, leicht; aber nach Entfernung des Magneten kehren die Moleküle auch wieder leicht in die frühere Lage zurück. Diese Körper besitzen also nur temporären Magnetismus. Bei anderen Körpern dagegen, z. B. Stahl, ist das Richten der Moleküle schwerer; dafür bleiben sie auch lange in der neuen Lage. Diese Körper besitzen demnach permanenten oder dauernden Magnetismus. Die Kraft, welche die Moleküle in ihrer jeweiligen Lage zu halten sucht, wird Koërzitivkraft¹ genannt. Sie stellt sich nicht nur der Magnetisierung entgegen, sondern auch der Entmagnetisierung. Besitzt also ein Körper bereits Magnetismus, so erfolgt die Änderung seines magnetischen Zustandes nicht proportional der magnetisierenden Kraft, sondern bleibt hinter dieser zurück. Diese Eigenschaft, welche besonders bei Elektromagneten von Bedeutung ist, nennt man Hysteresis². Auf ihr beruht es

¹ *coërceo* zusammenhalten. — ² *ἰστέργω* das Zuspätkommen.

auch, daß weiches Eisen nach Aufhören der magnetisierenden Kraft etwas remanenten¹ Magnetismus behält. — Eine dritte Hypothese über die Konstitution der Magnete wird bei der Elektrizität besprochen werden [§ 193].

§ 153. **Herstellung von Magneten.** Ein Eisenstück zum Magneten machen, heißt nach dem Gesagten also weiter nichts, wie seinen Molekülen eine gleichmäßige Richtung geben. Das gewöhnliche Mittel hierzu ist das Bestreichen mit kräftigen Magneten, der sogenannte Strich. Beim einfachen Strich wird der Pol eines Magneten von der Mitte des Stahlstabes nach einem Ende geführt, dort hochgehoben, und dies Verfahren mehrfach wiederholt; dann wird mit dem anderen Pol des Magneten von der Mitte aus nach dem anderen Ende mehrfach gestrichen. Beim Doppelstrich stréicht man mit den entgegengesetzten Polen zweier Magnete oder bequemer mit einem Hufeisenmagneten von der Mitte nach der einen Seite, dann über den ganzen Stab zurück bis zum anderen Ende, wieder zurück usw., bis man schließlich in der Mitte aufhört. Durch das Streichen nimmt der Magnetismus indes nur bis zu einer bestimmten Grenze, der magnetischen Sättigung, zu; diese ist erreicht, wenn alle Moleküle gleichgerichtet sind. Da ein Stab durch Bestreichen nur ziemlich oberflächlich magnetisiert wird, so können dünne Lamellen ebenso stark magnetisch sein wie dicke Stäbe. Aus diesem Grunde vereinigt man auch oft dünne Lamellen zu einem Hufeisenmagneten und nennt dies dann ein magnetisches Magazin. Wird ein Stab während des Magnetisierens erschüttert, so wird sein Magnetismus stärker. Erschüttert man aber einen fertigen Magneten, wozu auch das Abreißen des Ankers (d. i. das Eisenstück, welches an die Pole eines Hufeisenmagneten angehängt wird) gehört, so wird die magnetische Kraft verringert. Man kann dies leicht mittels der Molekulartheorie erklären. Das Erschüttern lockert den molekularen Zusammenhang, befördert also während des Magnetisierens die Drehung der Moleküle; beim fertigen Magneten wird dagegen die gleichmäßige Richtung dadurch gestört. — Die stärksten Magnete erhält man übrigens durch Elektrizität [§ 193].

§ 154. **Tragkraft.** Unter der Tragkraft eines Magneten versteht man das Gewicht, das seiner Anziehungskraft das Gleichgewicht hält. Die Tragfähigkeit prüft man, indem man an den Anker eines Magneten nacheinander immer größere Gewichte anhängt, bis er schließlich abfällt. Es ist festgestellt, daß die Tragkraft eines Hufeisenmagneten die doppelte Tragkraft eines seiner Pole übertrifft.

§ 155. **Diamagnetismus.** Starke Magnete, besonders Elektromagnete, ziehen nicht nur Eisen, sondern auch andere Körper an;

¹ *remaneo* zurückbleiben.

alle diese heißen paramagnetisch. Manche Körper, z. B. Wismut und Antimon, werden dagegen von Magneten abgestoßen; sie heißen diamagnetisch. Die Erklärung dieser Erscheinung ist ähnlich wie die des Auftriebs. Trotzdem alle Körper der Schwere unterworfen sind, entfernen sie sich doch von der Erde, wenn sie sich in einer Flüssigkeit von größerem spezifischen Gewichte befinden. Ebenso wird ein Körper dann von einem Magneten abgestoßen, wenn das Medium, in dem er sich befindet, stärker als er selbst vom Magneten angezogen wird. Daraus geht hervor, daß ein und derselbe Körper sowohl paramagnetisch als diamagnetisch sein kann.

§ 156. **Erdmagnetismus.** Ein frei beweglicher Magnet, z. B. eine Magnetnadel, nimmt eine ungefähr nordsüdliche Richtung ein; darauf beruht der für Seeleute unentbehrliche Kompaß. Diese Erscheinung kann nach dem Gesetze von der magnetischen Anziehung nur so gedeutet werden, daß die Erde selbst ein großer Magnet ist, und zwar liegt ihr Südpol im Norden, der Nordpol im Süden. Indes liegen die magnetischen Pole der Erde nicht genau an den geographischen. Denn eine Magnetnadel zeigt nicht genau von Norden nach Süden, sondern weicht seitlich von dieser Richtung ab, und zwar ist diese Abweichung, die sogenannte Deklination, also der Winkel zwischen astronomischem und magnetischem Meridian, für jeden Ort verschieden. Außerdem steht eine Magnetnadel auch nie genau horizontal, sondern stets geneigt; diese Inklination, also der Winkel zur Horizontalebene, hängt ebenfalls von der Lage des betreffenden Ortes ab.

Dasselbe gilt auch für die Intensität des Erdmagnetismus, die natürlich an den magnetischen Polen am größten ist. Man kann sich die Totalintensität (T Fig. 131) in eine vertikale (V) und eine horizontale (H) Komponente zerlegt denken. Letztere, die sogenannte Horizontalintensität des Erdmagnetismus kann, ähnlich wie die Erdanziehung durch Pendelschwingungen, aus den Schwingungszeiten einer in Bewegung versetzten horizontalen Magnetnadel berechnet werden; sie ist nämlich an verschiedenen Orten der Erde umgekehrt proportional den Quadraten der Schwingungszeiten. Die Totalintensität ergibt sich dann aus der Formel $H = T \cos i$, wo i der Inklinationswinkel ist. Die Linien, welche Orte gleicher Deklination, Inklination, Intensität verbinden, heißen Isogonen, bzw. Isoklinen, bzw. Isodynemen. Alle diese erdmagnetischen Elemente zeigen tägliche, säkulare und unregelmäßige Schwankungen.

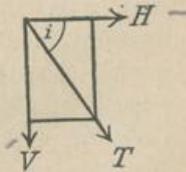


Fig. 131.

*Isogonen**Isoklinen**Isodynemen**Isodynemen*

Elektrizität.

§ 157. **Arten der Elektrizität.** Wenn man gewisse Körper reibt, so werden sie befähigt, andere leichte Körper anzuziehen. Diese zuerst beim Bernstein (*ἤλεκτρον*) beobachtete Eigenschaft wird Elektrizität genannt. Elektrizität kann jedoch nicht nur durch mechanische Arbeit entstehen, sondern auch durch chemische, thermische u. a. Energie und läßt sich auch umgekehrt in solche überführen. Wie beim Magnetismus unterscheidet man zwei Arten von Elektrizität, positive und negative, und stellt sich diese der Bequemlichkeit halber oft wieder als zwei Fluida vor (die modernen Anschauungen über das Wesen der Elektrizität sind in §§ 212, 216, 218 erwähnt). Je nachdem man die Elektrizität im Zustande der Ruhe oder Bewegung betrachtet, spricht man von statischer Elektrizität und vom elektrischen Strome.

A. Statische Elektrizität¹ (Reibungselektrizität).

§ 158. **Elektrische Anziehung und Abstoßung.** Das am längsten bekannte Mittel, Körper elektrisch zu machen, besteht darin, sie zu reiben. Die dabei entstehende Elektrizität ist entweder von der Beschaffenheit, wie sie geriebenes Glas annimmt, oder aber sie gleicht derjenigen, die geriebenes Siegelack (Harz) zeigt. Man bezeichnet (willkürlich) die Glaselektrizität als positive, die Harzelektrizität als negative Elektrizität. Das Material, mit dem man reibt, erhält immer gleichviel entgegengesetzte Elektrizität wie der geriebene Körper. Durch Versuche läßt sich zeigen, daß gleichgroße, aber entgegengesetzte Elektrizitätsmengen sich gegenseitig neutralisieren, und ferner, daß gleichnamig elektrische Körper sich abstoßen, ungleichnamige sich anziehen. Man kann letzteres z. B. mit dem sog. elektrischen Pendel nachweisen; dasselbe besteht aus zwei Holundermarkkugeln, die mittels je eines Seidenfadens an einem Stativ aufgehängt sind. Hierbei gilt das COULOMBSche Gesetz [vgl. § 149]: Die Kraft der elektrischen Anziehung bzw. Abstoßung ist direkt proportional dem Produkt der betr. Elektrizitätsmengen, umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer Entfernung,

$$F = \frac{e e'}{r^2} \cdot k.$$

Setzt man in dieser Formel die von der gewählten Einheit der Elektri-

¹ Die Lehre von der statischen Elektrizität heißt auch Elektrostatik; ihre Anwendung zu Heilzwecken wird nach medizinischem Sprachgebrauch meist Franklinisation genannt.

zitätsmenge abhängige Konstante $k = 1$, so ergibt sich als absolute elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge diejenige Elektrizitätsmenge, welche auf eine gleichgroße im Abstände 1 cm die Kraft 1 Dyne ausübt¹. Die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge heißt nach dem Entdecker des obigen Gesetzes ein Coulomb².

§ 159. **Leiter und Nichtleiter.** Außer durch Reibung kann ein Körper auch durch Berührung mit einem elektrischen Körper elektrisch werden. Nach ihrem Verhalten hierbei unterscheidet man Leiter und Nichtleiter. Bei ersteren verbreitet sich die Elektrizität von der Berührungsstelle aus schnell über den ganzen Körper; man kann ihn also von einer einzigen Stelle aus „laden“, umgekehrt aber auch „entladen“. Letzteres geschieht z. B., wenn man ihn mit der Hand berührt, weil dann die Elektrizität durch den ebenfalls gut leitenden menschlichen Leib zur Erde abfließt, die das größte Magazin sowohl für positive wie für negative Elektrizität vorstellt. Auf dieser Eigenschaft der Leiter beruhen gewisse Elektroskope, d. s. Apparate zum Erkennen der Elektrizität. Durch den Korken eines Glasbehälters (Fig. 132) geht hier eine Metallstange, die oben in einen Knopf, unten in zwei Streifen von Blattgold usw. endigt. Berührt man den Knopf mit einem elektrischen Körper, so fließt die Elektrizität in die Goldstreifen, die sich dann gegenseitig abstoßen. Bei den Nichtleitern bleibt dagegen die Elektrizität nur an der Stelle, der sie direkt zugeführt wird, und umgekehrt behält ein solcher Körper seine Elektrizität, wenn nur eine Stelle abgeleitet wird. Da somit Nichtleiter, welche Leiter umgeben, diese vor dem Verluste der Elektrizität schützen, heißen sie auch Isolatoren [vgl. § 167]. Zu ihnen gehören z. B. Glas, Harz, Seide, Wolle, Luft³; zu den Leitern vor allem die Metalle, unter denen wieder Silber am besten leitet, ferner Kohle, Flüssigkeiten und feuchte Körper, z. B. der Tierleib.



Fig. 132.

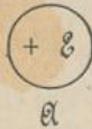
§ 160. **Elektrisches Potential.** Ein mit der positiven Elektrizitätsmenge $+E$ geladener Körper A (Fig. 133) besitzt die Eigenschaft, andere ebenfalls positiv elektrische Körper abzustößen. Nähert

¹ Als Dimension der elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge ergibt sich analog dem im § 149 Anm. Gesagten, $m^{3/2} l^{3/2} t^{-1}$ bzw. $gr^{3/2} cm^{3/2} sec^{-1}$.

— ² 1 Coulomb entspricht 3.10^9 elektrostatischen Einheiten [vgl. § 219]. —

³ Auch feuchte Luft ist ein guter Isolator! Leitend wird Luft durch Ionisierung [vgl. 212].

man ihm also einen mit der Elektrizitätseinheit $+e$ geladenen Körper B aus der Unendlichkeit¹ bis etwa zum Punkte P , so wird gegen die abstoßenden Kräfte von A eine bestimmte Arbeit geleistet. Über-



\times
 \mathcal{F}

Fig. 133.

\oplus
 \mathcal{B}

läßt man dann B der Einwirkung von A , so wird umgekehrt B von P aus in die Unendlichkeit abgestoßen und leistet nach dem Gesetze von der Erhaltung

der Energie eine ebenso große Arbeit, wie vorher zur Annäherung aufgewandt werden mußte. B besitzt also in P eine bestimmte potentielle Energie oder, wie man auch sagt, ein bestimmtes Potential². Das Potential in einem Punkte eines elektrischen Feldes³ entspricht demnach der Arbeit, die gegen elektrische Kräfte aufgewandt werden muß, um die Einheit der (gleichnamigen) Elektrizitätsmenge aus unendlicher Entfernung bis zu diesem Punkte heranzubringen. Umgekehrt kann man auch sagen, es entspricht der Arbeit, die elektrische Kräfte leisten, um die Einheit der (gleichnamigen) Elektrizitätsmenge von diesem Punkte aus bis zur Unendlichkeit fortzubewegen. Hierbei ist es ganz gleich, welchen Weg die Elektrizitätseinheit zwischen P und der Unendlichkeit zurücklegt. Wäre das nämlich nicht der Fall, würde man z. B. auf dem Wege

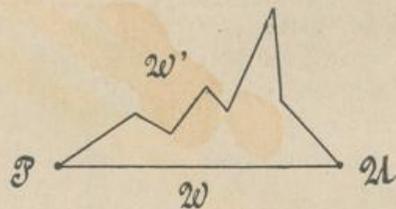


Fig. 134.

W (Fig. 134) weniger Arbeit zur Annäherung der Elektrizitätseinheit aufwenden, als auf dem Wege W' bei ihrer Abstoßung geleistet wird, so erhielte man ja eine Arbeitsleistung ohne entsprechende Energieaufwendung, kurz ein Perpetuum mobile, was bekanntlich ein Ding der Unmöglichkeit ist. In

jedem Punkte eines elektrischen Feldes hat daher das Potential

¹ Mit „unendlich“ ist hier die Entfernung gemeint, in der die von A ausgeübte Abstoßung $= 0$ ist. — ² Ungefähr gleichbedeutend damit ist der Begriff „elektrische Spannung“. Diese äußert sich in dem Bestreben der Elektrizität, den Leiter zu verlassen, und kann etwa mit dem Druck eines Gases auf die Wand des einschließenden Behälters verglichen werden. — ³ „Elektrisches Feld“ heißt der Raum, in dem elektrische Kräfte wirksam sind. „Feldstärke“ ist die in einem Punkte des elektrischen Feldes auf die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge ausgeübte Kraft, gemessen in Dynen. Auch hier benutzt man wieder Kraftlinien [§ 150] zur bequemen Darstellung der Richtung und Größe der elektrischen Kräfte. Je dichter die Kraftlinien, desto größer die Feldstärke.

nur einen ganz bestimmten Wert. Die Flächen, welche Punkte gleichen Potentials einschließen, heißen Äquipotentialflächen. Die elektrischen Kräfte bzw. Kraftlinien stehen überall senkrecht zu den Potentialflächen.

Das Potential¹ ist direkt proportional der Elektrizitätsmenge, umgekehrt der Entfernung, $V = \frac{e}{r}$. Herrscht in 2 Punkten verschiedenes Potential, so entspricht die Potentialdifferenz (oder der Spannungsunterschied) an diesen Punkten der Arbeit, die zur Überführung der Elektrizitätseinheit aus der einen Lage in die andere erforderlich ist. Ebenso wie nun eine Flüssigkeit bestrebt ist, von einem höheren Niveau zu einem tieferen zu fließen, wie ein Gas sich von Orten größeren Druckes zu solchen geringeren Druckes ausbreitet, fließt auch die Elektrizität von Orten höheren zu solchen niedrigeren Potentials. Die Erfahrungstatsache, daß alle zur Erde abgeleiteten Körper ihre Elektrizität verlieren, drückt man daher dadurch aus, daß man für die Erde das Potential 0 annimmt, wie man ja auch aus praktischen Gründen das Meeresniveau willkürlich als Nullniveau annimmt. Und wie man streng genommen nur von Temperatur- und Niveaudifferenzen sprechen kann, gibt es auch kein absolutes Potential, sondern nur Potentialdifferenzen. Aus dem Gesagten folgt ohne weiteres, daß an allen Stellen eines Leiters, bei dem die Elektrizität im Gleichgewicht ist, dasselbe Potential herrscht und umgekehrt. Die praktische Einheit für Potentiale und Potentialdifferenzen heißt Volt (nach dem berühmten Physiker VOLTA). Während nun eine Arbeit aufgewendet werden muß, um Elektrizität von Orten niederen Potentials zu solchen höheren Potentials zu bringen, wird im umgekehrten Falle von der Elektrizität eine Arbeit geleistet, die gleich dem Produkt aus Elektrizitätsmenge und Potentialdifferenz ist [vgl. § 179].

§ 161. Elektrische Kapazität. Wie das Niveau einer Flüssigkeit nicht nur durch ihre Menge, sondern auch durch die Weite, die Kapazität², des Behälters bedingt ist, wie die Temperaturzunahme eines Körpers nicht nur von der zugeführten Wärmemenge, sondern auch von der Wärmekapazität [§ 98] abhängt, kommt auch für das Potential eines Körpers dessen elektrisches „Fassungsvermögen“ oder seine elektrische Kapazität in Betracht. Das heißt: Um verschiedene Körper auf dasselbe Potential zu bringen, sind verschieden große Elektrizitätsmengen erforderlich. Die Kapazität ist somit das

¹ In Formeln gewöhnlich mit V bezeichnet, was wohl Abkürzung von Vis Kraft ist. — ² *capacitas* Fassungsvermögen.

Verhältnis zwischen Elektrizitätsmenge und Potential, $\kappa = \frac{e}{V}$. Die praktische Einheit der Kapazität wird nach dem großen Physiker FARADAY mit dem Namen Farad bezeichnet. Ein Körper hat die Kapazität 1 Farad, wenn er bei Ladung mit 1 Coulomb das Potential 1 Volt annimmt. Gewöhnlich benutzt man jedoch als Einheit das Mikrofarad, den millionsten Teil des Farads. Die elektrische Kapazität hängt nicht wie die Wärmekapazität von der stofflichen Beschaffenheit des Körpers ab, sondern von seiner Größe und Form¹ sowie von der Anwesenheit anderer Leiter [vgl. § 167].

§ 162. **Elektrometer.** Aus der erwähnten Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ folgt natürlich, daß man jede dieser drei Größen (Kapazität, Elektrizitätsmenge, Potential) kennt, wenn die beiden anderen gegeben sind. So ist z. B. $V = \frac{e}{\kappa}$. Das bedeutet aber, daß das Potential eines Körpers seiner Ladung proportional ist. Da nun der Ausschlag eines Elektroskops [§ 159] proportional der zugeführten Elektrizitätsmenge ist, ist er auch proportional dem Potential, zu dem das Elektroskop geladen wurde, somit auch proportional dem Potential des ladenden Körpers. Man kann daher mit jedem Elektroskop nicht nur Elektrizitätsmengen, sondern auch Potentiale bzw. Potentialdifferenzen messen, indem man den Ausschlag aus der Ruhelage feststellt, und nennt

den Apparat dann Elektrometer. Bei manchen Elektrometern dient zur Ablesung des Ausschlags eine, gewöhnlich nach Volts geeichte, Skala. Für genaue Messungen, auch kleinere Potentiale, wird viel das Quadrantelektrometer von Lord KELVIN (früher W. THOMSON) benutzt.

Hier befindet sich ein ungefähr sohlenförmiges Aluminiumblättchen zwischen vier, kreuzweise miteinander verbundenen, metallischen Quadranten, die zusammen eine Art Schachtel bilden (Fig. 135). Werden nun die Quadrantenpaare mit den entgegengesetzten Polen

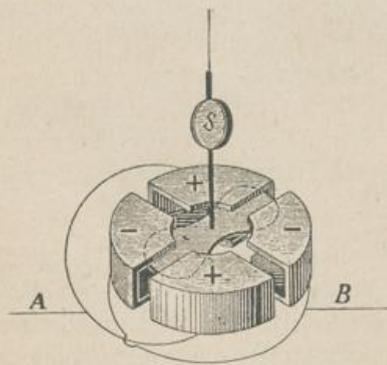


Fig. 135.

einer Elektrizitätsquelle durch die Leitungen A und B verbunden, also auf gleiche entgegengesetzte Potentiale von bekannter Größe gebracht, während das Aluminiumblättchen mit dem zu untersuchenden Körper verbunden wird, so

¹ Setzt man in die Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ für V seinen Wert $\frac{e}{r}$ ein [§ 160], so ergibt sich $\kappa = r$. Für isolierte Kugeln ist also die Kapazität zahlenmäßig gleich dem Radius.

wird das Blättchen aus seiner Ruhelage (die einer Spaltrichtung entspricht) abgelenkt. Und zwar ist seine Drehung, die man durch Spiegelablesung (mittels des Spiegels *S*) mißt, proportional der übergegangenen Elektrizitätsmenge bzw. dem Potential des zu messenden Körpers; auch läßt die Richtung zugleich die Art der übergegangenen Elektrizität erkennen. Man kann auch umgekehrt das Aluminiumblättchen auf ein bekanntes hohes Potential laden und entweder den zu messenden Körper mit dem einen Quadrantenpaar verbinden, während das andere Paar zur Erde abgeleitet wird, oder aber die Drähte *A* und *B* an zwei Stellen legen, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll.

§ 163. **Verteilung der Elektrizität.** Da gleichnamige Elektrizitätsmengen sich abstoßen, so folgt unmittelbar daraus, daß sich bei Leitern die Elektrizität stets an der Oberfläche befinden muß. Experimentell wies dies FARADAY dadurch nach, daß er sich mit einem Elektroskop in das Innere eines isoliert aufgestellten Metallkäfigs begab. Wurde das Elektroskop mit dessen Wand leitend verbunden, so zeigte es auch bei stärkster Elektrisierung des Käfigs keinen Ausschlag. Die Elektrizitätsmenge pro Flächeneinheit heißt elektrische Dichte (genauer „Oberflächendichte“) und ist der Elektrizitätsmenge direkt, dem Krümmungsradius umgekehrt proportional. Auf einer Kugel ist die Dichte also überall gleich, und um so größer, je kleiner die Kugel ist. Am größten ist die Dichte an Hervorragungen, besonders an Spitzen. Hier bekommt die zentrifugale Kraft das Übergewicht, und trotz der umgebenden Isolatoren strömt Elektrizität aus, wobei Lichterscheinungen [§ 168] entstehen können. Auch wird an stark geladenen Spitzen der elektrische Wind beobachtet, der darauf beruht, daß Luft- und Staubteilchen angezogen, gleichnamig geladen dann kräftig abgestoßen werden.

§ 164. **Elektrische Influenz.** Elektrizität entsteht auch schon durch Annäherung eines elektrischen Körpers. Man spricht dann von Influenzwirkung¹. Zur Erklärung nimmt man an, daß schon in jedem unelektrischen Körper beide Arten von Elektrizität vorhanden sind, jedoch so, daß sie sich neutralisieren. Nähert man nun einem solchen unelektrischen Körper *B* (Fig. 136) einen elektrischen Körper

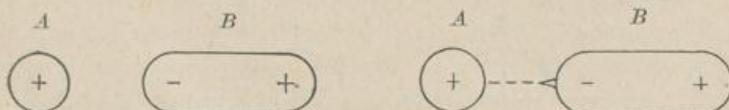


Fig. 136.

Fig. 137.

A, so wird die gleichnamige Elektrizität von *B* in das abgewandte Ende gestoßen, die ungleichnamige in das zugewandte angezogen. Letztere heißt dann gebundene, erstere freie Elektrizität. Wird

¹ *influo* hineinfließen, beeinflussen.

A wieder entfernt, so findet wieder ein Ausgleich statt, und *B* wird wieder unelektrisch. Wird aber vorher die freie Elektrizität, hier also die positive, zur Erde abgeleitet, und dann erst *A* entfernt, so bleibt auf *B* negative Elektrizität zurück. Die Ableitung kann nun auch durch Spitzen geschehen. Bringt man eine solche an der *A* zugewandten Seite von *B* an (Fig. 137), so strömt die negative Elektrizität aus [§ 163], die positive bleibt zurück. Gleichzeitig neutralisiert aber die ausströmende negative Elektrizität die positive von *A*, so daß es den Anschein hat, als wäre durch die Spitze positive Elektrizität von *A* nach *B* hinübergesaugt worden. Dies Prinzip kommt z. B. zur Anwendung bei der

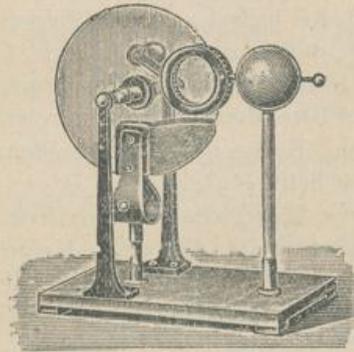


Fig. 138.

§ 165. **Reibungselektriermaschine.** Eine solche (Fig. 138) besteht aus einer vertikalen, drehbaren Glasscheibe, die bei ihrer Bewegung an das sogenannte Reibzeug, ein mit Zinnamalgame bestrichenes Lederkissen, gepreßt wird. Dadurch entsteht auf dem Reibzeug negative, auf der Glasscheibe positive Elektrizität. Letztere gelangt durch die Drehung auf die entgegen-

gesetzte Seite. Dort sind zu beiden Seiten der Glasscheibe mehrere Spitzen angebracht, die zu einer isoliert stehenden Metallkugel, dem sogenannten Konduktor, führen. Durch Influenz entsteht nun im Konduktor positive, in den Spitzen negative Elektrizität; letztere strömt gegen die Glasscheibe aus und macht sie wieder unelektrisch. Die Reibungselektriermaschine hat nur noch historisches Interesse; sie ist jetzt vollkommen verdrängt durch die Influenzmaschinen [§ 167].

§ 166. **Ansammlungsapparate.** Auf Influenz beruhen auch die Apparate, welche die Ansammlung größerer Elektrizitätsmengen ge-

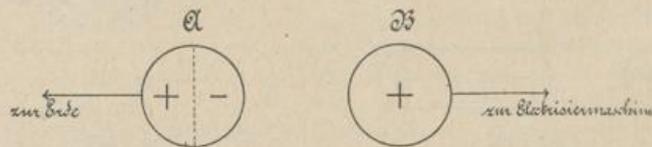


Fig. 139.

statten. Ein solcher Apparat, auch Kondensator genannt, besteht aus zwei sich nahe gegenüberstehenden Leitern, welche durch eine isolierende Zwischenschicht („Dielektricum“) voneinander getrennt sind. *A* und *B* (Fig. 139) seien z. B. zwei solche

durch Luft getrennte Konduktoren; *B* sei mit einer Elektrisiermaschine verbunden, *A* zur Erde abgeleitet („geerdet“). Wäre der Konduktor *B* nur allein vorhanden, so könnte er durch die Maschine nur so viel Elektrizität (angenommen positive) zugeführt erhalten, bis auf ihm dasselbe Potential erreicht ist wie auf der Maschine. Steht ihm aber der geerdete Konduktor *A* gegenüber, so entsteht auf diesem durch Influenz positive und negative Elektrizität. Erstere, die ja „frei“ ist, fließt zur Erde ab; letztere wird durch die positive Elektrizität von *B* gebunden, bindet aber rückwärts auch einen Teil der Elektrizität von *B*. Hierdurch wird aber die freie Elektrizität von *B*, d. h. solche, die nach außen wirken kann, verringert; mit andern Worten, das Potential von *B* sinkt, dafür wächst aber wieder seine Kapazität [§ 161], so daß er jetzt mehr Elektrizität von der Elektrisiermaschine aufnehmen kann als vorher, nämlich soviel, bis er deren Potential wieder erreicht. Entfernt man dann *A*, so ist auf *B* jetzt nur freie Elektrizität vorhanden, deren Menge und somit auch Potential weit höher ist, als es bei einfacher Ladung möglich gewesen wäre. Die Kapazität eines Leiters wird also durch die Nachbarschaft eines andern, geerdeten, Leiters erhöht. Gewöhnlich bezeichnet man *B* als Kollektor¹, *A* als Kondensator² (im engeren Sinne), da ja durch *A* eine „Verdichtung“ der Elektrizität auf *B* stattfindet.

Unter Kapazität eines Kondensators versteht man diejenige Elektrizitätsmenge, die nötig ist, um den Kollektor auf das Potential 1 zu laden, während der Kondensator (im engeren Sinne) geerdet ist. Diese Kapazität wächst mit der Größe der Konduktoren und nimmt ab mit ihrer Entfernung; sie ist aber auch wesentlich von der Natur des Dielektriums abhängig. Letzteres wird verständlich, wenn man annimmt, daß die elektrische Energie durch Bewegungen des Lichtäthers fortgepflanzt wird, wobei die Moleküle der Dielektrica eine wichtige Rolle spielen [vgl. § 218]. Die Zahl, welche angibt, wieviel mal mehr Elektrizität der Kollektor aufnehmen kann, wenn Luft durch eine gleichdicke Schicht eines andern Dielektriums ersetzt ist, heißt Dielektrizitätskonstante; sie ist z. B. für Glas 4—8, für Hartgummi 2—3, für Glimmer 6—8. Man kann also auch sagen, die Kapazität eines Leiters ist direkt proportional der Dielektrizitätskonstante des umgebenden Isolators.

Der einfachste Kondensator ist die FRANKLINSche Tafel, eine einfache Glastafel, die beiderseits mit Stanniol belegt ist, so jedoch, daß ein breiter Rand frei bleibt (damit keine Funken überspringen). Die viel angewandte Leidener Flasche (Fig. 140) ist ein Glasgefäß, das innen und außen bis in die Nähe des oberen Randes mit Stanniol belegt ist. Hier ist das Glas das Dielektrikum, die innere Belegung der Kollektor, die äußere der Kondensator (im engeren Sinne).

¹ colligo sammeln. — ² condense verdichten.

Um die Flasche bequem laden zu können, ist mit der inneren Belegung eine Metallstange verbunden, die mit einem Knöpfe endigt. Man ladet eine solche Leidener Flasche, indem man die äußere Belegung mit der Erde und den Knopf mit einer Elektrizitätsquelle verbindet. Da die erreichbare Spannung von der



Fig. 140.

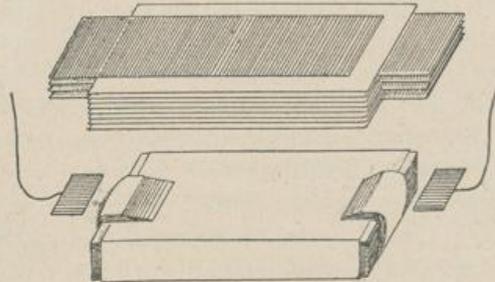


Fig. 141.

Größe der Belegungen abhängt, vereinigt man zweckmäßig mehrere Flaschen zu einer sog. Leidener Batterie, indem man die äußeren Belegungen auf eine gemeinschaftliche leitende Unterlage stellt und die Knöpfe der inneren Belegungen miteinander oder mit einem Hauptknopfe verbindet. Ein handlicher Kondensator von großer Kapazität ist ferner der **FIZEAUSche** Kondensator, der namentlich bei Funkeninduktoren zur Anwendung kommt. Er besteht aus einer großen Zahl paraffingetränkter Papierblätter, die mit Stanniolstreifen belegt sind; letztere ragen abwechselnd nach einer Seite über die Papierblätter hinaus und sind so miteinander verbunden, daß alle paarigen und alle unpaarigen Blätter je eine große Metallbelegung bilden. Fig. 141 zeigt diese Anordnung sowie die Art der Verbindung mit dem zu- und ableitenden Drahte.

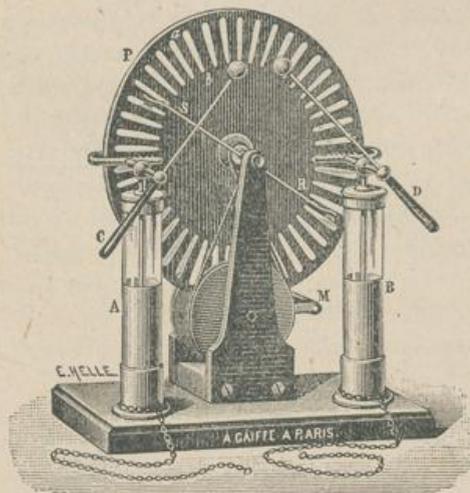


Fig. 142.

aus Stanniol (z. B. *ab*) beklebt sind. Beide Scheiben werden von zwei mit Spitzen versehenen Metallgabeln umfaßt, die mit zwei an

§167. Influenzelektrischer-

maschinen. Diese von **HOLTZ** und **TÖPLER** gleichzeitig erfundenen Maschinen dienen zur Erzeugung größerer Mengen von statischer Elektrizität. In neuerer Zeit haben sich besonders die selbsterregenden **WIMSHURSTMASCHINEN** eingebürgert (Fig. 142). Diese bestehen aus zwei in entgegengesetzter Richtung rotierenden Glas- oder Hartgummischeiben, die beide mit zahlreichen Sektoren

den Handgriffen C und D befestigten Konduktorkugeln sowie mit zwei Leidener Flaschen (A und B) in Verbindung stehen. Vor jeder Scheibe befindet sich ferner ein sogenannter Ausgleicher oder Anreger (in Fig. 142 sieht man nur den vorderen RS , während der hintere, senkrecht zu diesem stehende unsichtbar ist), an dessen Enden Metallpinsel sitzen, die auf den Stanniolbelägen schleifen.

Zur ungefähren Erklärung der (in Wirklichkeit viel komplizierteren) Verhältnisse diene die schematische Fig. 143, in der der innere und äußere Kreis die vordere bzw. hintere Scheibe vorstellt, ab den vorderen, cd den hinteren Ausgleicher. Zunächst sei angenommen, daß sich nur der innere Kreis in der Pfeilrichtung bewegt, und daß der Sektor bei a etwas negative Elektrizität (etwa vom letzten Gebrauch her) besitzt. Geht derselbe an den Sektoren des äußeren Kreises vorbei, so entsteht durch Influenz in diesen positive und negative Elektrizität, die sich aber bald wieder ausgleichen, wenn der Sektor vorbei ist. Kommt letzterer aber an die Stelle d , wo der Ausgleicher cd die hintere Scheibe berührt, so entsteht dort gebundene positive Elektrizität, während die freie negative durch den metallischen Ausgleicher nach c hinströmt. Da sich

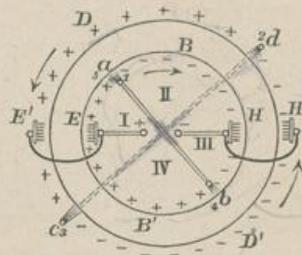


Fig. 143.

nun auch der äußere Kreis (die hintere Scheibe) in umgekehrter Richtung wie der innere (die vordere Scheibe) dreht, so entsteht in allen ihren Sektoren links von d positive, in denen rechts von c negative Elektrizität. Kommt nun einer der negativ geladenen hinteren Sektoren an die Stelle b , wo der vordere Ausgleicher die vordere Scheibe berührt, so influenziert er hier positive (gebundene) Elektrizität, während die negative durch den Ausgleicher nach a abströmt, welches ja die Stelle war, von der wir ausgingen. Zugleich ziehen die bei d vorübergehenden positiven Sektoren der hinteren Scheibe negative Elektrizität an und stoßen die positive durch den Ausgleicher nach d . Es resultiert daraus eine immer stärkere Ladung der Sektoren derart, wie es in der Figur durch die Zeichen $+$ und $-$ angedeutet ist. In zwei Quadranten (I und III) ist also die Elektrizität beider Scheiben gleichnamig. Dort bringt man die Spitzenkämme an, die dann den mit ihnen verbundenen Konduktoren fortwährend positive bzw. negative Elektrizität zuführen.

§ 168. **Entladung.** Ein elektrisch geladener Körper kann einmal dadurch entladen werden, daß man ihn mit einem anderen Körper von niedrigerem Potential, insbesondere mit der Erde, leitend verbindet; dann fließt die Elektrizität in kontinuierlichem Strom ab, auf dessen Gesetze im nächsten Abschnitt eingegangen werden soll. Ist jedoch die Spannung der Elektrizität genügend hoch¹, so findet eine Entladung auch durch einen Isolator hindurch statt. Und zwar erfolgt dieselbe, wenn sich in der Nähe des geladenen Körpers ein

¹ Bei Entladung zwischen 2 Kugeln von 1 cm Durchmesser ist z. B. für einen Funken von 0,1 bzw. 1 bzw. 10 mm Länge eine Spannung von ca. 1000 bzw. 5000 bzw. 30000 Volt erforderlich.

anderer Körper mit entgegengesetzter Elektrizität befindet (die eventuell erst durch Influenz entsteht), in Gestalt des elektrischen Funkens. Man spricht dann auch von einer disruptiven¹ Entladung. Dieselbe dauert außerordentlich kurze Zeit (ca. $\frac{1}{250000} - \frac{1}{500000}$ Sekunde) und ist bei nicht zu großem Widerstande oszillierend², d. h. besteht aus einer Reihe sehr schnell hin und her gehenden Einzelentladungen, deren Dauer nur Milliontel von Sekunden beträgt [vgl. § 215]. Die Wirkungen des elektrischen Funkens sind sehr mannigfaltig. Abgesehen von der Lichtwirkung, die besonders schön in GEISSLERschen Röhren [§ 206] zutage tritt, kann er feste Gegenstände durchbohren, chemische Zersetzungen oder Verbindungen herbeiführen (z. B. Bildung von Ozon aus dem Sauerstoff der Luft), beeinflusst in eigentümlicher Weise den tierischen Organismus (sog. elektrische Schläge, die eventuell tödlich werden können) usw.

Kann wegen zu großer Entfernung beider Leiter keine Funkenentladung zustande kommen, so entstehen beim Ausströmen von hochgespannter Elektrizität an Stellen großer Dichte, besonders an Spitzen, bei positiver Ladung Büschel violetter Strahlen, sog. Büschellicht, bei negativer kleine Lichtpünktchen (sog. Spitzenlicht). Bei starker Lufterlektrizität werden diese Erscheinungen bisweilen an den Spitzen hoher Gegenstände beobachtet (St. Elmsfeuer). Das sog. Glimmlicht ist eine schwache Lichthülle, welche an spitzen Gegenständen, besonders an den Elektroden in GEISSLER-Röhren vorkommt.

§ 169. **Blitzableiter.** Der Blitz ist ein elektrischer Funken im großen, der durch disruptive Entladung ungleichnamiger Lufterlektrizität oder, beim sogenannten Einschlagen, durch Vereinigung von Lufterlektrizität mit der entgegengesetzten eines irdischen Gegenstandes, besonders des Grundwassers, entsteht. Der Donner entspricht seinerseits dem Knall, der den elektrischen Funken begleitet, und muß wegen der geringeren Geschwindigkeit des Schalles natürlich später wahrgenommen werden. Menschen, welche direkt vom Blitze getroffen werden, erleiden ausgedehnte Verbrennungen und gehen meist zugrunde. Aber auch die Nähe eines einschlagenden Blitzes ist gefährlich wegen des sogenannten Rückschlages, d. i. die plötzliche Wiederherstellung des durch Influenz (des Blitzes) gestörten elektrischen Gleichgewichts. Der von FRANKLIN erfundene Blitzableiter bietet dem zustande gekommenen Blitze eine bequeme (metallische) Bahn bis zum Grundwasser hin, leitet ihn also von der Umgebung ab. Ob er auch das Zustandekommen eines Blitzes verhüten kann, indem durch Spitzenausstrahlung [§ 164] ein Ausgleich der elektrischen Spannungen zwischen Wolken und Erdboden stattfindet, wird heute für fraglich gehalten.

¹ *disrumpo* zerreißen, zerschmettern. — ² *oscillum* Schaukei.

B. Strömende Elektrizität.

a. Der galvanische Strom und seine Gesetze.

§ 170. **Galvani und Volta.** Im Jahre 1780 wurde der Bologneser Professor LUIGI GALVANI von einem Assistenten aufmerksam gemacht, daß Froschschenkel, mit einem Skalpell berührt, jedesmal zuckten, wenn Funken aus dem Konduktor einer nahen Elektrisiermaschine gezogen wurden. Während dies heute durch den Rückschlag erklärt wird, sah GALVANI darin eine Äußerung der tierischen Elektrizität und stellte zahlreiche Versuche darüber an. Als er u. a. enthäutete Froschschenkel mittels kupferner Drähte an einem Eisengeländer aufhängte, zuckten dieselben lebhaft, wenn sie das Geländer berührten. Auch dies schrieb GALVANI der tierischen Elektrizität zu. ALESSANDRO VOLTA (Professor in Pavia) dagegen erklärte diese Erscheinung so, daß durch die Berührung der beiden Metalle Elektrizität entsteht, welche durch die Schenkel fließt und sie zum Zucken bringt. Diese VOLTASche Erklärung hat am meisten Anklang gefunden. Doch ist sie nur zum Teil richtig, und auch GALVANI hatte recht; denn in der Tat existieren in den lebenden Nerven und Muskeln (sowie auch in anderen Körpergeweben) elektrische Spannungen. Jedenfalls gebührt VOLTA das Verdienst, eine neue Entstehungsart der Elektrizität gefunden zu haben. Und wenn man jetzt auch die Entstehung des elektrischen Stromes nicht mehr auf die einfache Berührung zweier Leiter, sondern auf die dabei eintretenden chemischen Vorgänge zurückführt, so bleiben die von VOLTA gefundenen Tatsachen trotzdem bestehen.

§ 171. **Gesetze der Kontaktelektrizität.** VOLTA fand also, daß bei Berührung zweier verschiedener Metalle das eine positiv, das andere negativ elektrisch wird; heute sagen wir, daß hierbei eine Potentialdifferenz entsteht. Die (ihrem Wesen nach unbekannte) Kraft, welche diese Potentialdifferenz erzeugt, heißt elektromotorische Kraft [§ 173]. VOLTA fand nun weiter, daß sich die Metalle und Kohle, die sog. Leiter erster Klasse in einer Reihe so anordnen lassen, daß jeder in der Reihe voranstehende Körper bei Berührung mit einem nachfolgenden ein höheres Potential annimmt, also ihm gegenüber positiv wird. Diese VOLTASche Spannungsreihe lautet (etwas modifiziert):
 + Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Kohle —
 Die Potentialdifferenz ist nun um so größer, je weiter die betreffenden Körper in dieser Reihe auseinanderstehen. Sie ist aber unabhängig von der Form und Größe der sich berührenden Platten und wird auch nicht geändert, wenn noch andere Metalle dazwischengeschaltet sind; durch eine Kombination von *Zn*, *Fe*, *Ag*, *Pt* wird also dieselbe Spannungsdifferenz erzielt wie zwischen *Zn* und *Pt*. Daraus geht auch hervor, daß, wenn ausschließlich Leiter erster Klasse ring-

förmig verbunden sind, in diesem Kreise kein Strom möglich ist, weil ja jedes Metall gleichzeitig als Anfangs- und Endglied der Reihe betrachtet werden kann, die Potentialdifferenz also $= 0$ ist.

Diesen Gesetzen der Spannungsreihe gehorchen aber die Leiter zweiter Klasse, zu denen besonders Flüssigkeiten (Säuren und Salzlösungen) gehören, nicht. Bei einer Kombination von Leitern erster und zweiter Klasse ist also die Potentialdifferenz der Endglieder nicht gleich der algebraischen Summe derjenigen der Zwischenglieder, so daß hier die Anordnung zu einem geschlossenen Kreise möglich ist. Taucht nämlich ein Metall in eine Flüssigkeit, so wird das herausstehende Ende meist negativ elektrisch, die Flüssigkeit und dadurch auch das eingetauchte Ende meist positiv; und zwar ist die Spannungsdifferenz um so größer, je weiter vorn in der Spannungsreihe das Metall steht; *Zn* wird also am stärksten negativ, *Cu* bedeutend schwächer. Tauchen nun *Zn* und *Cu* zusammen in eine Flüssigkeit (Fig. 144), so geht die starke positive Elektrizität des unteren Zinkendes

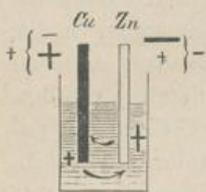


Fig. 144.

durch die Flüssigkeit zum Kupfer und trifft an dessen hervorstehendem Ende mit schwach negativer Elektrizität zusammen, macht es daher schwach positiv. Umgekehrt geht die schwach positive Elektrizität des unteren Kupferendes bis zum oberen Zinkende und schwächt dessen stark negative Elektrizität so, daß es schwach negativ elektrisch wird. Im allgemeinen wird

von zwei in eine Flüssigkeit tauchenden Metallen das in der VOLTASCHEN Spannungsreihe voranstehende an seinem freien Ende negativ, das weiter hinten stehende positiv elektrisch.

§ 172. **Galvanische Elemente.** Die Verbindung zweier Metalle mit einer Flüssigkeit heißt galvanisches Element oder galvanische Kette. Sind die beiden Metalle außerhalb der Flüssigkeit durch einen sog. Schließungsdraht verbunden, so ist die Kette geschlossen, sonst offen. In einer geschlossenen Kette fließt beständig ein elektrischer Strom, der durch die fortwährend wirkende elektromotorische Kraft andauernd im Gange erhalten wird. Man nennt diesen Strom auch dem Entdecker zu Ehren galvanischen Strom [vgl. § 188 Anm.]. Der (positive) Strom fließt z. B. im Schließungsdraht eines Zink-Kupfer-Elements vom positiven Kupfer zum negativen Zink. Im Elemente selbst muß er natürlich vom Zink zum Kupfer fließen, damit der Stromkreis geschlossen ist. Die freien Enden der Metalle eines Elementes, bzw. die Enden der damit verbundenen Drähte, heißen Pole oder Elektroden; diejenige Elektrode, von welcher der Strom herkommt, beim positiven Strom also die positive, wird speziell Anode genannt, die andere

Kathode¹. Unter Anode und Kathode ohne nähere Bezeichnung versteht man stets den äußeren positiven oder negativen Pol. Durch Vereinigung mehrerer Elemente entsteht eine galvanische Batterie.

Die älteste Form derselben ist die Voltasche Säule; sie besteht aus abwechselnd übereinandergeschichteten Zink- und Kupferplatten, zwischen denen immer befeuchtete Tuchlappen liegen. Die Reihenfolge ist also hier Zink, Feuchtigkeit, Kupfer; Zink, Feuchtigkeit, Kupfer usw. — Eine Abart ist die ZAMBONISche Säule, die aus 1000—2000 Plattenpaaren von unechtem Gold- und Silberpapier zusammengesetzt ist, wobei die kupfer- bzw. zinnhaltigen Metallseiten jedes Paares gegeneinander sehen. Die im Papier stets enthaltene Feuchtigkeit bildet die erforderliche Flüssigkeit.

Eine nähere Beschreibung einiger moderner galvanischer Elemente erfolgt im § 188. Zunächst sollen einige für das Verständnis des galvanischen Stroms notwendige Grundbegriffe erläutert werden, nämlich elektromotorische Kraft, Stromstärke und Widerstand.

§ 173. Als **elektromotorische Kraft** (E) bezeichnet man diejenige (ihrem Wesen nach unbekannt) Kraft, die Elektrizität in Bewegung setzt. Sie ist z. B., wie wir sahen, wirksam bei der Berührung zweier verschiedener Metalle, indem sie die in denselben bis dahin im Gleichgewicht bzw. neutralen Zustande befindliche Elektrizität so verschiebt, daß eben ein Metall positiv, das andere negativ elektrisch wird. Die elektromotorische Kraft ist also die Ursache einer Potentialdifferenz, aber nicht identisch mit dieser [vgl. § 177]. Eine Potentialdifferenz ist nicht möglich ohne eine elektromotorische Kraft; wohl aber können elektromotorische Kräfte ohne Potentialdifferenzen auftreten (z. B. bei der Induktion). Die durch die elektromotorische Kraft erzeugte Potentialdifferenz ist am größten an den Polen der Stromquelle. Sind diese durch eine überall gleichmäßige Leitung verbunden, so findet ein kontinuierlicher Abfall des Potentials oder, wie man auch sagt, ein kontinuierlicher Spannungsverlust vom positiven zum negativen Pole hin statt. Ist jedoch an einer Stelle der Leitung ein Widerstand eingeschaltet, so herrscht zu beiden Seiten desselben eine größere Potentialdifferenz, als sie ohne den Widerstand an den betreffenden Stellen existieren würde (weil eben zur Überwindung des Widerstandes elektromotorische Kraft verbraucht wird); und bei unendlich großem Widerstand, d. h. bei völliger Unterbrechung der Leitung, ist die Potentialdifferenz ein Maximum. Wegen ihrer nahen Verwandtschaft mißt man elektromotorische Kräfte ebenso wie Potentialdifferenzen durch ein gemeinschaftliches Maß, nämlich Volts [§ 160]. Die Messung selbst erfolgt durch Elektrometer [§ 162] bzw. in der Praxis durch Voltmeter [§ 192].

§ 174. Als **Stromstärke** oder Stromintensität (I), bezeichnet

¹ ὁδός Weg, ἀνά aufwärts, κατά hinab. Also Elektrode = Weg der Elektrizität, Anode = Eintrittsstelle, Kathode = Austrittsstelle des elektrischen Stromes.

man diejenige Elektrizitätsmenge, die in 1 Sekunde durch irgendeinen Querschnitt der Strombahn hindurchgeht¹; also $I = \frac{e}{t}$. Um die wichtige Tatsache, daß die Stromstärke an allen Stellen eines (unverzweigten) Stromkreises gleich ist, dem Verständnis näher zu bringen sei an die Verhältnisse bei strömendem Wasser erinnert. Würde nämlich bei einem Flusse durch irgendeinen Querschnitt seines Bettes weniger Wasser hindurchgehen als durch einen anderen, so würde Stauung eintreten, was eben nicht der Fall ist. Bei engem Querschnitt fließt das Wasser schneller; die Menge, die hindurchgeht, bleibt somit dieselbe. Genau so ist es beim elektrischen Strom, nur mit der Abweichung, daß hier die Elektrizität durch enge Querschnitte nicht schneller fließt, sondern dichter wird. Ist also, der Stromkreis an einer Stelle verengt, so ist hier die Stromdichte (d. h. das Verhältnis zwischen Stromstärke und Querschnitt) größer, die Stromstärke aber bleibt dieselbe. Die Stromstärke kann nun durch irgendeine von ihr abhängige Wirkung des elektrischen Stromes gemessen werden. So hat z. B., wie wir noch sehen werden, die Stromstärke einen Einfluß auf die Größe der Ablenkung einer Magnetnadel, auf die Menge der Zersetzungsprodukte, die der Strom erzeugt, usw. Als praktische Einheit hat man diejenige Stromstärke gewählt, die ein konstanter Strom besitzt, der aus einer Silbersalzlösung in 1 Sekunde 1,118 mg Silber abscheidet [§ 186]. Diese Einheit heißt dem gleichnamigen Physiker zu Ehren ein Ampère. Die Stromstärke 1 Ampère besitzt derjenige Strom, bei dem die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb im Verlaufe von 1 Sekunde durch den Querschnitt des Stromkreises geht². Also $1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Sekunde}}$. Zum Messen der Stromstärke dienen in der Praxis die Ampèremeter [§ 192].

§ 175. Unter elektrischem Widerstand versteht man alles, was die Bewegung des elektrischen Stromes schwächt, also die Stromstärke vermindert. Der Widerstand (W) ist offenbar um so größer, je länger und je schmaler die Strombahn ist; er ist also direkt proportional der Länge (l), umgekehrt proportional dem Querschnitt (q) des Leiters. Der Widerstand ist aber natürlich auch von der Natur des Leiters abhängig; gute Leiter setzen dem elektrischen Strom einen geringen Widerstand entgegen, schlechte Leiter einen großen. Man bezeichnet

¹ Zuweilen wird Stromstärke mit elektromotorischer Kraft verwechselt, da „Stärke“ an „Kraft“ denken läßt. Besser wäre daher vielleicht die Bezeichnung „Sekundenstrom“ für Stromstärke; doch hat sich der letztere Ausdruck so eingebürgert, daß man sich mit ihm eben abfinden muß. — ² Die absolute elektrostatische Einheit der Stromstärke ist vorhanden, wenn die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge [§ 158] in 1 Sekunde durch den Querschnitt des Leiters fließt. Dimension: $m^{1/2}l^{3/2}t^{-2}$ bzw. $gr^{1/2}cm^{3/2}sec^{-2}$ [vgl. § 191].

dies Verhalten als spezifischen Widerstand (k) und berechnet denselben gewöhnlich für einen Draht von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Den kleinsten spezifischen Widerstand haben Metalle, besonders Silber und Kupfer, einen erheblich größeren schon Kohle, und einen noch weit größeren Flüssigkeiten [vgl. § 103]. Der elektrische Widerstand wird demgemäß durch die Formel $W = \frac{l}{q} k$ ausgedrückt.

Der spezifische Widerstand (somit auch sein reziproker Wert, die spezifische Leitfähigkeit) hängt auch von der Temperatur ab. Im allgemeinen wird der Widerstand der Metalle mit steigender Temperatur größer, der von Elektrolyten [§ 185] geringer. Warme Lösungen leiten also besser als kalte, so daß man z. B. für medizinische Zwecke die Elektroden mit warmer Salzlösung anfeuchtet. Ebenfalls kleiner bei steigender Temperatur wird auch der Widerstand der Kohle und der Oxyde einiger Erdmetalle (Magnesium, Thorium, Osmium), was z. B. bei der Nernstlampe praktisch verwertet wird. Erwähnenswert ist noch, daß die an sich geringe Leitfähigkeit des metallischen Selens durch Belichtung, insbesondere mit rotem Lichte, verstärkt wird; hierauf beruht u. a. eine Methode der Fernphotographie.

Als praktische Einheit des Widerstandes hat man den Widerstand gewählt, den ein Quecksilberfaden von 1,063 m Länge und 1 qmm Querschnitt dem Strome bietet. Diese Widerstandseinheit wird nach dem gleichnamigen Physiker ein Ohm genannt. Die Messung von Widerständen kann auf verschiedene Weise erfolgen. Bei der Substitutionsmethode z. B. wird zuerst der unbekannte Widerstand in eine Strombahn eingeschaltet und die Stromstärke an einem Meßinstrument abgelesen; dann wird der unbekannte Widerstand durch einen Widerstandskasten (s. u.) ersetzt, der so reguliert wird, daß wieder dieselbe Stromstärke herrscht; sein Widerstand ist somit jetzt gleich dem unbekanntem. Die beste Methode ist aber die Messung mit der WHEATSTONEschen Brücke [§ 178].

Apparate, welche in bequemer Weise die Einschaltung von Widerständen in die Strombahn gestatten, heißen Rheostate¹. Von den vielen Arten seien hier nur zwei angeführt.

Die Stöpselrheostate oder Widerstandskästen, deren Schema Fig. 145 zeigt, sind Kästen, auf deren Deckel dicke Metallklötze in geringem Abstände voneinander liegen. Je zwei benachbarte Klötze sind im Innern des Kastens durch einen, meist spiralförmig aufgerollten, Draht von bestimmtem Widerstand leitend verbunden. Außerdem kann aber noch dadurch eine Verbindung zwischen ihnen hergestellt werden, daß in die Lücken zwischen ihnen dicht anschließende Metallstöpsel eingesetzt werden. In letzterem Falle geht der Strom natürlich durch die Stöpsel, weil dieser Weg für ihn einen geringeren Wider-

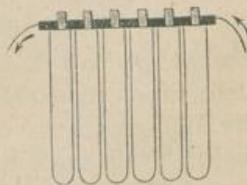


Fig. 145.

¹ τὸ ῥέος das Fließende, ἰσχύει zum Stehen bringen, hemmen.

stand bietet [§ 178]. Wird aber ein Stöpsel herausgezogen, so muß der Strom durch den zugehörigen Drahtkreis fließen. Solche Stöpselrheostate gestatten daher die Einschaltung genau abgemessener bekannter

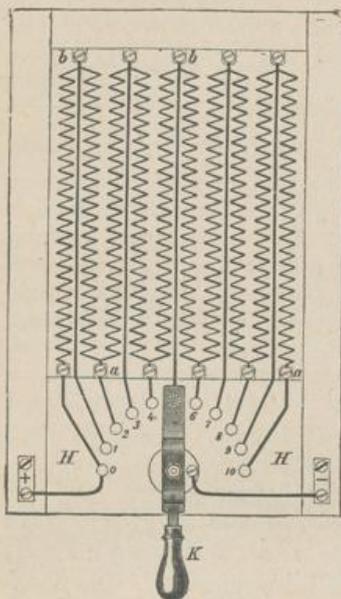


Fig. 146.

Widerstände in die Strombahn. — Zuweilen kommt es aber nur darauf an, rasch Widerstände einzuschalten, ohne ihre Größe genau zu kennen. Diesem Zwecke dienen z. B. Kurbelrheostate. Bei der in Fig. 146 abgebildeten Form sind eine Anzahl Metallspiralwindungen in einem Rahmen befestigt und enden in Metallknöpfen, auf denen eine Messingfeder mittels des Griffes *K* verschoben werden kann. Das eine Ende der Leitung ist mit dem Knopf *o*, das andere mit der Messingfeder verbunden, so daß je nach der Stellung der letzteren eine verschiedene Zahl von Spiralen (in Fig. 146 z. B. 5) und somit auch entsprechende Widerstände eingeschaltet sind.

§ 176. Ohmsches Gesetz. Über die gegenseitigen Beziehungen zwischen Stromstärke, elektromotorischer Kraft und Widerstand gibt das berühmte OHMSCHE GEsETZ Aufschluß, welches der Grundpfeiler der ganzen Elektrotechnik ist. Es lautet: Die Stromstärke (*I*) ist direkt proportional der

elektromotorischen Kraft (*E*), umgekehrt proportional dem Widerstände (*W*), also

$$I = \frac{E}{W}.$$

Hieraus folgt ohne weiteres

$$E = I \cdot W. \quad W = \frac{E}{I}.$$

Die bereits erwähnten praktischen Einheiten für Stromstärke, elektromotorische Kraft und Widerstand sind nun so gewählt, daß

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{\text{Ohm}} \text{ bzw. } 1 \text{ Milliampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1000 \text{ Ohm}}.$$

Man kann also 1 Ampère auch definieren als die Stromstärke, die entsteht, wenn die elektromotorische Kraft der Stromquelle 1 Volt und der Widerstand im Stromkreise 1 Ohm beträgt. Analog 1 Volt als diejenige elektromotorische Kraft, die bei 1 Ohm Widerstand die Stromstärke 1 Ampère ergibt. Und 1 Ohm als den Widerstand, der vorhanden ist, wenn bei einer elektromotorischen Kraft 1 Volt die Stromstärke 1 Ampère entsteht.

Der gesamte Stromkreis setzt sich nun aus zwei Teilen zusammen: aus dem inneren Stromkreis, das ist die Strombahn innerhalb der

Stromquelle (Element, Dynamomaschine usw.) und aus dem äußeren Stromkreis, das ist der Schließungsbogen. Dementsprechend ist zu unterscheiden ein innerer oder wesentlicher Widerstand (w_i) und ein äußerer oder außerwesentlicher Widerstand (w_a). Das OHMSche Gesetz heißt also genauer

$$I = \frac{E}{w_i + w_a}.$$

Aus dieser Formel ergeben sich wichtige praktische Folgerungen. Will man größere Stromintensität erzielen, als ein einziges Element liefern kann, so verbindet man mehrere Elemente zu einer Batterie. Hierbei kann man entweder den positiven Pol des einen Elements mit dem negativen des nächsten verbinden (Hintereinander-, Reihen- oder Serienschaltung), oder alle positiven Pole miteinander und ebenso alle negativen vereinigen (Nebeneinander- oder Parallelschaltung). Im letzteren Falle vergrößert man bei n Elementen die Flächen der Elektroden um das n fache. Die elektromotorische Kraft bleibt hierbei dieselbe wie bei 1 Elemente, da sie ja von der Größe der Metallplatten unabhängig ist [§ 171]; dagegen wird der innere Widerstand um das n fache kleiner, weil ja jetzt der Strom durch eine n mal breitere Flüssigkeit geht. Es ist daher hier $I = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + w_a}$.

Ist der äußere Widerstand so gering daß er vernachlässigt werden kann, so ist also $I = n \cdot \frac{E}{w_i}$, d. h. man erzielt eine n fache Intensität. Ist aber w_a groß, so wird die Intensität nicht wesentlich vergrößert. In diesem Falle bedient man sich der Hintereinanderschaltung. Hierbei wird die elektromotorische Kraft um das n fache vergrößert, aber auch der innere Widerstand. Es ist also $I = \frac{nE}{nw_i + w_a}$. Kann nw_i gegenüber w_a vernachlässigt werden, so ist $I = \frac{nE}{w_a}$, d. h. die Intensität wird um das n fache vergrößert. Also bei großem inneren Widerstande schaltet man die Elemente nebeneinander, bei großem äußeren hintereinander. Ist der äußere Widerstand aber im Verhältnis zum inneren weder sehr groß noch sehr klein, so wendet man eine gemischte Schaltung an. Durch Rechnung läßt sich zeigen, daß bei einer gegebenen Zahl von Elementen diejenige Schaltung die größte Stromstärke liefert, bei welcher der innere Widerstand dem äußeren möglichst gleichkommt.

Das OHMSche Gesetz gilt auch für jeden einzelnen Teil eines Stromkreises. Man kann daher mit seiner Hilfe die Potentialdifferenz oder den Spannungsunterschied zwischen zwei Punkten der Strom-

bahn berechnen, wenn der Widerstand auf dieser Strecke und die Stromstärke bekannt ist. Es ist nämlich $e = I \cdot w$. Während es sich also in der analogen obigen Formel $E = I \cdot W$ um die elektromotorische Kraft (E) und den gesamten Widerstand im Stromkreise (W) handelt, kommt hier nur die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten der Strombahn (e) und der lokale Widerstand dieser Stelle (w) in Betracht. Die Stromstärke ist dagegen in beiden Fällen dieselbe, da sie ja überall in einem Stromkreise gleich ist.

§ 177. **Klemmenspannung.** Eine Potentialdifferenz ist, wie bereits [§ 173] erwähnt, zwar eine Folge der elektromotorischen Kraft, darf aber mit ihr nicht identifiziert werden. Selbst an den Polen eines geschlossenen Elements (bzw. einer Dynamomaschine usw.) ist die Potentialdifferenz — hier gewöhnlich Klemmenspannung genannt (nach den Klemmen, die zur Befestigung des Schließungsdrahtes dienen) — nicht gleich der elektromotorischen Kraft, sondern kleiner. Die elektromotorische Kraft hat ja nicht nur die Aufgabe, die Elektrizität durch den äußeren Stromkreis, also vom positiven zum negativen Pol der Stromquelle zu schaffen, sondern sie muß dieselbe auch durch den inneren Stromkreis, also durch das Element usw. selbst hindurch treiben. Es ist also $E = I (w_a + w_i)$. Die Klemmenspannung dagegen, die nur den Strom im äußeren Schließungskreise zu unterhalten hat, ist $e = I \cdot w_a$, also um so viel kleiner als die elektromotorische Kraft, wie der Spannungsverlust im Inneren des Elementes usw. ($I \cdot w_i$) beträgt. Ist allerdings der äußere Widerstand unendlich groß — was z. B. der Fall ist, wenn das Element nicht durch einen Schließungsbogen geschlossen ist —, dann kann die Klemmenspannung für praktische Zwecke der elektromotorischen Kraft gleichgesetzt werden; denn dann kommt eben $I \cdot w_i$ gegenüber $I \cdot w_a$ nicht in Betracht.

§ 178. **Stromverzweigungen.** Für Stromverzweigungen gelten die beiden KIRCHHOFFSchen Gesetze:

1. An jedem Verzweigungspunkte ist die Summe der Stromstärken aller ankommenden Ströme gleich der Summe der Stromstärken aller abfließenden. Anders ausgedrückt, die algebraische Summe der Stromstärken daselbst ist gleich Null, wenn man nämlich die ankommenden Ströme als positiv, die abfließenden als negativ bezeichnet. Dies Gesetz ist lediglich ein Ausdruck dafür, daß in einem elektrischen Strome keine „Stauung“ eintreten kann [§ 174].

2. In jedem geschlossenen Teile eines Stromnetzes ist die Summe aller elektromotorischen Kräfte gleich der Summe aller Spannungsverluste (bzw. gleich der Summe aller

Produkte aus Stromstärke und Widerstand für jeden Teil der Leitung). Hierbei sind solche elektromotorischen Kräfte, die gleichgerichtete Ströme erzeugen, mit gleichen Vorzeichen zu versehen, andernfalls mit entgegengesetzten. Dieses Gesetz ist eine Verallgemeinerung des OHMSchen Gesetzes.

Betrachten wir zunächst eine einfache Verzweigung, wie sie in Fig. 147

dargestellt ist. Zwischen Punkt A und B herrscht eine bestimmte Potentialdifferenz e , ganz gleich, ob der Strom auf dem oberen oder unteren Wege von A nach B gelangt [§ 160]. Es ist also nach § 176

$$e = i_1 w_1 = i_2 w_2,$$

folglich

$$i_1 : i_2 = w_2 : w_1.$$

In Worten: Die Stromstärken der Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweigbahnen. Hierauf beruhen ja auch die schon erwähnten Stöpselrheostate.

Verbindet man die beiden Stromzweige noch durch einen Draht, so erhält man die sog. WHEATSTONESche Brücke (Fig. 148). Wie

aus den Pfeilen sofort hervorgeht, kreuzen sich in der „Brücke“ CD zwei Ströme. Durch geeignete Anordnung der Widerstände in den Strecken 1, 2, 3, 4 kann man bewirken, daß diese sich kreuzenden Ströme sich aufheben, daß also in der

Brücke kein Strom herrscht. Ist dies der Fall, dann muß natürlich in den Punkten C und D dasselbe Potential herrschen; denn bestände eine Potentialdifferenz, so würde auch ein Strom zirkulieren [§ 160]. Herrscht aber in C und D dasselbe Potential, so ist auch die Potentialdifferenz zwischen A und D dieselbe wie zwischen A und C , ebenso die Potentialdifferenz zwischen D und B gleich derjenigen zwischen C und B . Anders ausgedrückt, es ist $i_1 w_1 = i_3 w_3$ und $i_2 w_2 = i_4 w_4$. Wenn nun in der Brücke kein Strom herrscht, kann man sich offenbar diesen Draht entfernt denken, ohne daß am Gleichgewicht des Systems etwas geändert wird. Dann muß aber $i_1 = i_2$ und $i_3 = i_4$ sein, weil ja

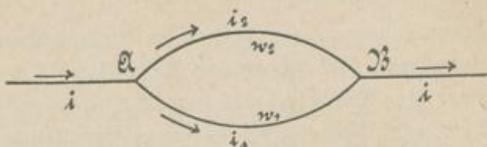


Fig. 147.

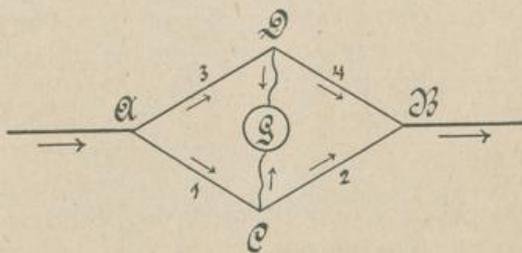


Fig. 148.

in derselben Strombahn stets die gleiche Stromstärke herrscht. Berücksichtigt man dies und dividiert die beiden eben angeführten Gleichungen, so erhält man $w_1:w_2 = w_3:w_4$. Unter dieser Bedingung herrscht also in der Brücke kein Strom. Umgekehrt kann man nach dieser Formel, wenn in der Brücke kein Strom herrscht — was sich ja leicht durch ein Galvanometer [§ 192] nachweisen läßt — den Widerstand einer der Zweigbahnen berechnen, wenn die drei anderen Widerstände, bzw. ein Widerstand und das Verhältnis der beiden anderen, bekannt sind. Ist z. B. w_3 der unbekannte Widerstand, dann ist $w_3 = \frac{w_1}{w_2} \cdot w_4$.

Um den Widerstand von Flüssigkeiten mittels der Brückenmethode zu messen, muß man Wechselströme [§ 198] anwenden, da sie sonst zersetzt würden. An Stelle des Galvanometers, das für Wechselströme ungeeignet ist, schaltet man dann in die Brücke ein Telephon ein, das so lange tönt, wie ein Strom durch die Brücke geht.

Eine spezielle Anwendung der WHEATSTONESchen Brücke ist das Bolometer¹, das zur Messung strahlender Wärme dient. Hier bildet ein berußter Metalldraht bzw. -streifen einen Zweig der Meßvorrichtung. Durch Bestrahlung wird sein Widerstand vergrößert [§ 175]; infolgedessen macht das Galvanometer in der Brücke, das vorher durch Regulierung der Zweigwiderstände stromlos gemacht worden ist, einen der absorbierten Strahlungsenergie proportionalen Ausschlag.

b. Wärme-, Licht- und chemische Wirkungen.

§ 179. **Stromarbeit und Stromeffekt.** Die Arbeit, die ein elektrischer Strom leisten kann, muß nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie theoretisch gleich der Arbeit sein, die zur Stromerzeugung notwendig war [vgl. § 160]. Zum leichteren Verständnis des Begriffes Stromarbeit ist ein Vergleich mit strömendem Wasser zweckmäßig. Wird z. B. 1 Kilogramm Wasser 10 Meter gehoben, so ist dazu eine Arbeit von 10 Kilogrammmetern erforderlich. Andererseits leistet diese Wassermenge, wenn sie dieselbe Strecke herunterfällt, die gleiche Arbeit; wenn sie nur 5 Meter fällt, 5 Kilogrammmeter usw. Die von strömendem Wasser geleistete Arbeit ist als proportional dem Gewicht bzw. der Menge des Wassers und der Niveaudifferenz. Genau so liegen die Verhältnisse bei der strömenden Elektrizität. Auch hier ist die Energie des elektrischen Stromes bzw. die von ihm geleistete Arbeit gleich dem Produkt aus Elektrizitätsmenge und Potentialdifferenz (die ja durchaus das Analogon der Niveaudifferenz ist). Wie bereits erwähnt, mißt man nun in der Praxis Elektrizitätsmengen nach Coulombs [§ 158], Potentialdifferenzen nach Volts [§ 160]. Daraus folgt, daß die elektrische Energie bzw. Arbeit sich durch Volts \times Coulombs oder kurz Volt-Coulombs ausdrücken läßt. Bewegt

¹ βόλος Wurf, Strahl.

sich also z. B. eine Elektrizitätsmenge von 100 Coulomb zwischen zwei Punkten, deren Potentialdifferenz 5 Volt beträgt, so leistet der Strom eine Arbeit von 500 Volt-Coulomb. 1 Volt-Coulomb hat denselben Wert wie 1 Joule [§ 12].

Unter Stromeffekt versteht man die Stromarbeit pro Sekunde [§ 13]. Das praktische Maß des Stromeffektes ist demnach $\frac{1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Sekunde}}$. Da nun 1 Coulomb pro Sekunde nichts anderes ist wie 1 Ampère [§ 174], so nennt man das praktische Maß des Stromeffektes 1 Volt-Ampère. Dieses hat wieder denselben Wert wie 1 Watt, das ja 1 Joule pro Sekunde ist [§ 13].

Es ist also, allgemein ausgedrückt, die Stromarbeit in t Sekunden $= E \cdot I \cdot t$ oder (da nach dem OHMSchen Gesetze $E = I \cdot W$) auch $= I^2 \cdot W \cdot t$ Volt-Coulomb bzw. Joule bzw. Wattstunden [§ 13]. Und der Stromeffekt ist $= E \cdot I$ bzw. $I^2 W$ Watt.

§ 180. **Joulesche Wärme.** Die Stromarbeit äußert sich stets darin, daß sie den Leiter mehr oder weniger erwärmt. Diese sog. JOULESche Wärme, die von der Stromrichtung ganz unabhängig ist, entspricht als eine Form der Stromarbeit natürlich einer der im vorigen Paragraphen angegebenen Formeln. Gewöhnlich wählt man zu ihrem Ausdruck die Formel $I^2 W \cdot t$ (bzw. für die Zeiteinheit $I^2 \cdot W$). Die Stromwärme ist also proportional dem Widerstand und dem Quadrate der Stromstärke (JOULESches Gesetz). Da 1 Joule = 0,24 Grammkalorien [§ 78], so beträgt die JOULESche Wärme $0,24 \cdot I^2 \cdot W \cdot t$ Grammkalorien.

Nach obiger Formel hat man es also in der Hand, durch passende Widerstände die Umwandlung der Stromenergie in Wärme zu verringern oder zu erhöhen. Wo die Wärmewirkung eine unerwünschte Beigabe ist (z. B. in Telegraphenleitungen) wird man einen möglichst geringen Widerstand wählen (gute Leiter, große Querschnitte!). Wo dagegen die Erwärmung Selbstzweck ist, wird man einen großen Widerstand (dünne Drähte!) einschalten. Von den vielfachen Anwendungen der JOULESchen Wärme seien z. B. die Sicherungen erwähnt; es sind dies in die Strombahn eingeschaltete Drähte bzw. Streifen aus Blei oder leicht schmelzbaren Legierungen, die bei einer bestimmten Stromstärke durchbrennen und somit den Strom selbsttätig unterbrechen, falls die vorgeschriebene Stromstärke überschritten wird, was z. B. bei Kurzschluß¹ der Fall ist; auf diese Weise sichern sie also die in der Strombahn befindlichen Apparate vor Zerstörung. Weiter wird die JOULESche Wärme zu Heizapparaten

¹ Kurzschluß nennt man die Verbindung des zu- und ableitenden Teils der Strombahn durch einen Leiter von sehr geringem Widerstand, also z. B. auch durch direkte Berührung.

benutzt. Hierher gehören auch die elektrischen Thermophore, bei denen in Asbestgewebe eingebettete Drähte erhitzt werden, um erkrankte Körperteile zu erwärmen. Erwähnt sei auch die Galvano-kaustik, d. i. die Durchtrennung bzw. Zerstörung von Körpergeweben mittels verschiedenartig geformter Brenner aus Platin-Iridium, die erst am Orte des Eingriffes durch einen hindurchgesandten Strom glühend gemacht werden. Eine der wichtigsten Anwendungen der JOULESchen Wärme ist schließlich ihre Benutzung zu Beleuchtungszwecken.

§ 181. **Elektrisches Glühlicht.** Bei den von EDISON erfundenen elektrischen Glühlampen wird ein Leiter bis zur Weißglut erhitzt und hierdurch das bekannte schöne Licht erzeugt. Bei den ursprünglichen Lampen geht der Strom durch einen dünnen, hufeisenförmig gebogenen Kohlenfaden, der sich in einer luftleeren Glasbirne befindet, weil er sonst infolge von Sauerstoffzutritt verbrennen würde. Widerstandsfähiger sind die Metallfadenlampen, bei denen dünne Fäden aus Osmium, Tantal, Wolfram usw. verwandt werden. Im Gegensatz dazu wird bei den Nernstlampen das Glühlicht in freier Luft erzeugt; als Glühkörper funktioniert hier ein Stift, der aus Oxyden seltener Erdmetalle besteht und ein sehr helles weißes Licht gibt. Da er aber den elektrischen Strom nur bei höherer Temperatur leitet, muß er durch eine ihn umgebende zum Glühen gebrachte Platinspirale erst vorgewärmt werden, so daß das Licht erst $\frac{1}{2}$ bis 1 Minute nach Einschalten des Stroms erscheint.

§ 182. **Bogenlicht.** Auf der JOULESchen Wärme beruht auch das elektrische Bogenlicht. Benutzt man nämlich zwei Kohlen als Elektroden und sendet einen starken Strom hindurch, so geht derselbe kontinuierlich durch die Spitzen, wenn sie einander berühren; entfernt man sie dann aber, so entsteht zwischen ihnen ein außerordentlich heller Lichtbogen, auch DAVYScher Lichtbogen genannt. Bei dem Übergang durch die Luftschicht entsteht nämlich eine so bedeutende Wärme (ca. 4000° CELSIUS), daß die Kohlenspitzen und die Luft glühend werden. Hierbei fliegen Stücke von der positiven zur negativen Kohle über, und da erstere überhaupt stärker erhitzt wird, so brennt sie schneller ab; es bildet sich ein Krater in ihr, während die negative Kohle spitz bleibt. Schließlich wird dadurch die Luftschicht zwischen beiden Kohlen und somit der Widerstand zu groß und der Strom erlischt. Daher ist eine Regulation nötig, wie sie z. B. automatisch von der Differentiallampe von v. HEFNER-ALTENECK geleistet wird.

Der untere Teil des Eisenstabes AB (Fig. 149) wird von wenigen starken Windungen des Stromkreises umgeben. Dieser geht von hier zum Hebel CD , der in der Mitte von AB befestigt ist und in E seinen Drehpunkt hat; vom

Hebel dann durch beide Kohlen und schließlich zur Batterie zurück. In a zweigt sich eine Nebenleitung ab, die in vielen schwachen Windungen um den oberen Teil von AB geht und sich bei b mit dem ersten Stromkreise wieder vereinigt. Berühren sich die Kohlen, so geht der Strom hauptsächlich durch den unteren Draht, weil hier der Widerstand kleiner ist. Dadurch wird der Eisenstab nach unten gezogen [§ 194] und infolge der Hebelwirkung die obere Kohle nach oben, so daß der Lichtbogen entsteht. Wird nun die Entfernung zwischen beiden Kohlen größer, so wächst der Widerstand im unteren Stromkreise, und der Strom fließt mehr durch den oberen. Dadurch wird der Eisenstab nach oben gezogen, und die obere Kohle geht durch Hebelwirkung nach unten.

Eine größere Lichtausbeute und günstigeres (gelbes) Licht als die gewöhnlichen Kohlenbogenlampen geben die sog. Flammenbogenlampen, nach dem Erfinderauch BREMER-Lampen genannt; hier sind die Kohlen mit bestimmten Salzen, besonders Fluorkalzium, getränkt. Medizinisch wertvoll sind die Quecksilberbogenlampen, bei denen in einem luftverdünnten Rohre zwischen Quecksilberelektroden ein Lichtbogen aus Quecksilberdampf erzeugt wird; dieses Licht ist nämlich besonders reich an ultravioletten Strahlen. Da gewöhnliches Glas diese größtenteils absorbieren würde, benutzt man hierbei Rohre aus Quarzglas („Quarzlampen“).

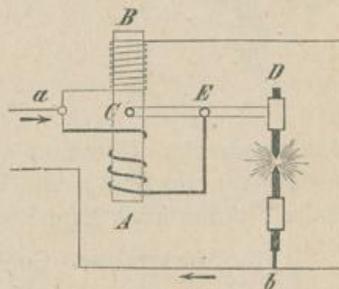


Fig. 149.

§ 183. Peltiersches Phänomen. Geht der Strom durch eine Stelle, an der zwei einen Stromkreis bildende Metalle zusammengelötet sind, so zeigt sich hier außer der JOULESchen Wärme, je nach der Stromrichtung, noch eine besondere Erwärmung oder Abkühlung. Am stärksten zeigt sich dieses PELTIERsche Phänomen an Lötstellen von Wismut und Antimon. Geht der Strom vom Antimon zum Wismut, so findet eine Erwärmung statt, im umgekehrten Falle eine Abkühlung. Dies tritt auch bei anderen Metallen ein, und es läßt sich wieder eine thermoelektrische Spannungsreihe aufstellen. Fließt der Strom zuerst durch das in der Reihe voranstehende Metall, so findet eine Erwärmung, sonst eine Abkühlung statt. Die Endglieder dieser Reihe sind Antimon und Wismut.

§ 184. Thermoelektrizität. Wird umgekehrt die Lötstelle zweier Metalle erwärmt, so entsteht ein Strom in bestimmter Richtung, z. B. vom Wismut zum Antimon; wird sie abgekühlt, so entsteht ebenfalls ein elektrischer Strom, aber von entgegengesetzter Richtung. Die thermoelektrische Kraft ist im allgemeinen der Temperaturdifferenz proportional und um so größer, je weiter die Metalle in der

11*

7 Ampere in 1 Sek. 1,195 mg Silber abgeführt

Spannungsreihe auseinanderstehen. Will man die schwache elektromotorische Kraft eines solchen Thermostromes erhöhen, so vereinigt man mehrere Thermoelemente zu einer Thermosäule, bei der immer die ungeraden Lötstellen an einer Seite liegen und zusammen erwärmt werden. Fig. 150 zeigt z. B. die NOBILISCHE Thermosäule,

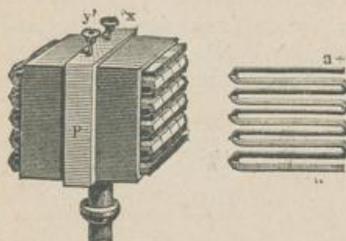


Fig. 150.

die hauptsächlich zur Messung strahlender Wärme benutzt wird, da schon sehr geringe Temperaturdifferenzen elektrische Ströme erzeugen, die mit einem Galvanometer (Thermomultiplikator) sehr genau nachzuweisen sind. Auch zur Messung sehr hoher und sehr niedriger Temperaturen finden Thermosäulen bzw. Thermoelemente Anwendung; für den ersten Fall benutzt man eine Kombination von Platin und Platin-Rhodium, für den zweiten von Platin und Konstantan. Manche Arten von Thermosäulen werden auch zum Laden kleinerer Akkumulatoren benutzt.

§ 185. **Elektrolyse.** Geht ein elektrischer Strom durch sog. Leiter zweiter Klasse [§ 171], so werden diese zersetzt. Man nennt diesen Vorgang Elektrolyse¹, die betreffenden Flüssigkeiten auch Elektrolyte. Die Zersetzungsprodukte treten nur an den Elektroden auf, nämlich an der negativen Elektrode (Kathode) die Wasserstoffatome der Säuremoleküle bzw. die Metallatome der Laugen- und Salzmoleküle, dagegen an der positiven Elektrode (Anode) die übrigbleibenden Atomgruppen. Geht also z. B. ein elektrischer Strom durch ein Gefäß mit verdünnter Salzsäure (HCl), in das als Elektroden zwei Drähte oder Platten tauchen, so entsteht an der Kathode H , an der Anode Cl . Wenn nun die Zersetzungsprodukte auf die Elektroden oder die Flüssigkeit chemisch einwirken, was meist der Fall ist, so entstehen sekundäre Prozesse. Geht z. B. der Strom durch verdünnte Salpeterlösung (KNO_3), so entsteht primär an der Kathode K , an der Anode NO_3 . Das K setzt sich aber mit dem Lösungswasser um nach der Formel $K + H_2O = KOH + H$. Den analogen Vorgang an der Anode erläutert die Formel $2 NO_3 + H_2O = 2 HNO_3 + O$. Es wird also hier durch sekundäre Prozesse an der Kathode Wasserstoff, an der Anode Sauerstoff frei. Die scheinbare Zersetzung von Wasser durch den elektrischen Strom ist stets auf solche sekundäre Prozesse (bedingt durch die im Wasser enthaltenen Salze) zurückzuführen; chemisch ganz reines Wasser wird nicht zersetzt, leitet auch den elektrischen Strom so gut wie gar nicht.

¹ λῶσις Auflösung, Zersetzung.

positiv Anode / Oxidation
negativ Kathode / Reduktion (Metall + H)

Eine Erklärung dieser Erscheinungen gibt die jetzt allgemein angenommene Theorie von CLAUDIUS-HELMHOLTZ-ARRHENIUS. Danach ist es eine charakteristische Eigenschaft aller Elektrolyte, daß in ihnen eine Anzahl von Molekülen in zwei Teilmoleküle (bzw. Atomgruppen) zerfällt¹, die beide mit gleichviel aber entgegengesetzter Elektrizität verbunden sind. Diese elektrolytische Dissoziation² der Moleküle ist um so ausgedehnter, je verdünnter die Lösungen sind. Da gleichgroße Mengen entgegengesetzter Elektrizität vorhanden sind, neutralisieren sie sich gegenseitig, so daß die Flüssigkeit als Ganzes unelektrisch ist. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Atomen bzw. Atomgruppen sind auch die mit Elektrizität geladenen Teilmoleküle chemisch ganz unwirksam. Geht nun ein elektrischer Strom durch die Lösung, so werden die elektropositiven Atome bzw. Atomgruppen von der negativen Kathode angezogen, die elektronegativen dagegen von der positiven Anode. Die in den Lösungen vorhandenen elektrisch geladenen Teilmoleküle bzw. Atomgruppen wandern also unter dem Einfluß des elektrischen Stromes durch die Flüssigkeit hindurch zur Kathode bzw. Anode. Man nennt sie deshalb auch Ionen³ und zwar speziell die zur Kathode gehenden Kationen, die zur Anode gehenden Anionen. Metall- und Wasserstoffatome sind stets Kationen; man kann auch sagen, „sie schwimmen mit dem Strom“. Die übrigen Atomgruppen sind Anionen. Demnach zerfällt z. B. das Schwefelsäuremolekül (H_2SO_4) in das elektropositive Kation $H_2\oplus$ und das elektronegative Anion $\ominus SO_4$. Analog Silbernitrat ($AgNO_3$) in $Ag\oplus$ und $\ominus NO_3$. Gelangen die Ionen bei ihrer Wanderung an die Elektroden, so geben sie hier ihre Elektrizität an diese ab und verhalten sich jetzt wie gewöhnliche chemische Atome bzw. Atomgruppen in statu nascendi, so daß eben an den Elektroden (und zwar nur hier) chemische Umsetzungen eintreten. Nach dieser Theorie besteht also die Arbeitsleistung des elektrischen Stromes nur im Transport der Ionen zu den Elektroden und in der Neutralisation ihrer Ladung daselbst. Der Transport der Ionen ist seinerseits wieder die Grundlage für die Fortpflanzung des elektrischen Stromes in den Elektrolyten; es handelt sich dabei also um Konvektion nicht um Leitung der Elektrizität [vgl. § 104].

§ 186. **Faradaysche Gesetze.** Für alle elektrolytischen Zersetzungen gelten die beiden folgenden, von FARADAY gefundenen Grundgesetze:

1. Die Menge der Zersetzungsprodukte ist in gleichen Zeiten der Stromstärke proportional. Man kann somit auch

¹ Diese Annahme findet eine wesentliche Stütze darin, daß der osmotische Druck in Elektrolyten größer ist, als der Zahl der Vollmoleküle entspricht.

² *dissocio* trennen. — ³ *ιον* gehend, wandernd; *ἀνά* hinauf, *κατά* hinab.

die Stromstärke durch die elektrolytischen Wirkungen des Stromes messen, wenn man eine Einheit hierfür festgelegt hat. In der Tat ist, wie bereits erwähnt [§ 174], die praktische Einheit der Stromstärke, 1 Ampère, auf diese Weise bestimmt worden.

2. Die durch den gleichen Strom in verschiedenen Elektrolyten während gleicher Zeiten abgeschiedenen Zersetzungsprodukte verhalten sich wie ihre chemischen Äquivalentgewichte. Unter letzteren versteht man den Quotienten aus Atomgewicht und Wertigkeit der Elemente bzw. Radikale. Ein Strom, der 1 gr *H* abscheidet, scheidet demnach auch ab 35,5 gr *Cl*, 108 gr *Ag*, 62 gr *NO*₃, $\frac{1,6}{2}$ gr *O*, $\frac{6,5}{2}$ gr *Zn*, $\frac{1,97}{3}$ gr *Au* usw.

Man kann also die Stromstärke messen, wenn man weiß, wieviel Zersetzungsprodukte („elektrochemische Äquivalente“) ein Strom von 1 Ampère in 1 Sekunde liefert. Es sind dies z. B. 1,118 mgr Silber, 0,328 mgr Kupfer, 0,174 ccm Knallgas usw. Die hierauf beruhenden Apparate zur Messung der Stromstärke heißen Voltameter (nicht zu verwechseln mit Voltmetern!).

Beim Knallgasvoltameter z. B. mißt man die Menge des durch Zersetzung angesäuerten Wassers entstandenen Gemenges von Wasserstoff und Sauerstoff, welches Knallgas heißt. Beim Silbervoltameter stellt man die Gewichtszunahme fest, die eine als Kathode benutzte und mit Silbernitratlösung gefüllte Platinschale dadurch erfährt, daß sich beim Stromdurchgang Silber auf ihr niederschlägt.

§ 187. **Anwendungen der Elektrolyse.** Die Elektrolyse dient u. a. zur Reindarstellung von Metallen aus ihren Verbindungen, insbesondere des Aluminiums. Bei der Galvanostegie¹ wird auf elektrolytischem Wege ein festhaftender metallischer Überzug, z. B. von Gold, Silber, Nickel, auf anderen minderwertigen Metallen erzeugt („galvanische Vergoldung, Versilberung, Vernickelung“ usw.). Der betreffende Gegenstand wird als Kathode in den Strom geschaltet; als Elektrolyt dient eine Lösung eines Gold-, Silber-, Nickel- usw. Salzes, aus der die Metall-Ionen zur Kathode wandern und den dort befindlichen Gegenstand überziehen. Als Anode dient ein Streifen aus Gold, Silber, Nickel usw., der durch die Anionen aufgelöst wird und so die elektrolytische Flüssigkeit beständig erneuert. Ähnlich ist die Galvanoplastik, bei der man von einem mit ganz schwacher Fettschicht überzogenen Gegenstand, der wieder als Kathode eingeschaltet wird, einen Metallabguß herstellt. Auch medizinisch wird die Elektrolyse vielfach angewandt. Bringt man die (oft nadel-förmigen) Elektroden an die zu beeinflussende Stelle, so bilden die im wesentlichen Kochsalz enthaltenden Körpersäfte den Elektro-

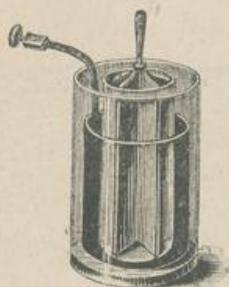
¹ *στέγω* mit einer Decke versehen.

lyten. An der Anode findet Säurebildung, an der Kathode Laugenbildung statt, was z. B. zur Blutstillung und zur Beseitigung von Haaren und Neubildungen aller Art benutzt wird. Bei der Iontophorese werden gelöste Medikamente durch die Haut hindurch in den Körper, entsprechend den Gesetzen der Ionenwanderung, eingeführt.

§ 188. **Konstante Elemente.** Die ursprünglichen galvanischen Elemente hatten alle den Fehler, daß ihre elektromotorische Kraft bald abnahm. Es beruht dies darauf, daß durch elektrolytische Prozesse, die natürlich auch im Inneren eines solchen Elementes vor sich gehen, die Elektroden verändert werden, was man auch mit dem Namen galvanische Polarisation bezeichnet. Im Kupfer-Zink-Schwefelsäure-Element scheiden sich z. B. am Zink¹ die SO_4 -Ionen ab und bilden mit dem Zink Zinksulfat; am Kupfer tritt der elektropositive Wasserstoff auf und umgibt es mit einem feinen Häutchen. Es tauchen also nicht mehr die reinen Elektroden in die Flüssigkeit; und da die elektromotorische Kraft eines Elements nur von der Natur der Elektroden (und der Flüssigkeit) abhängt, so ist klar, daß durch die Polarisation eine Änderung der elektromotorischen Kraft bewirkt wird. Und zwar wird dieselbe kleiner, da durch die Ionen die Elektrizität der Elektroden zu einem Teil neutralisiert wird. Ja, es tritt sogar ein dem ursprünglichen entgegengesetzt gerichteter Strom, der sog. Polarisationsstrom, zwischen den veränderten Elektroden auf, indem z. B. im angeführten Falle das untere Kupferende durch den darauf abgelagerten positiven Wasserstoff zur Anode, das Zinksulfat zur Kathode wird. Um konstante Elemente zu erhalten, d. h. solche, deren elektromotorische Kraft annähernd gleich bleibt, muß man also die Wirkung der Polarisation beseitigen². Diese „Depolarisation“ wird dadurch erreicht, daß man die Kathode in eine Flüssigkeit tauchen läßt, die den hauptsächlich die Polarisation bedingenden Wasserstoff sofort oxydiert. Oft nimmt man auch für jede Elektrode eine besondere Flüssigkeit, die entweder durch eine poröse Scheidewand (die der Ionenwanderung kein Hindernis bietet) getrennt oder (bei verschiedenem spezifischen Gewicht) einfach übereinander geschichtet sind.

¹ Zum Verständnis dieser Vorgänge muß man beachten, daß für die innere Strombahn Zink die Anode, Kupfer die Kathode vorstellt, während für die äußere Strombahn Kupfer Anode, Zink Kathode ist (vgl. Fig. 152).
— ² Da man in der Medizin den galvanischen Strom auch konstanten Strom nennt (besser wäre: kontinuierlichen Strom) muß man sich vor Mißverständnissen hüten. Also auch inkonstante Elemente liefern „konstanten“ Strom.

Beim DANIELL-Element (Fig. 151) z. B. taucht innerhalb eines Glasgefäßes ein Zinkzylinder in 25%ige Schwefelsäure. Im Zinkzylinder steht wieder ein poröser Tonzylinder, gefüllt mit konzentrierter Kupfervitriollösung, in die ein Kupferblech taucht. Der Vorgang im Element ist folgender (Fig. 152):



ca. 1/10 NAT. GRÖSSE

Fig. 151.

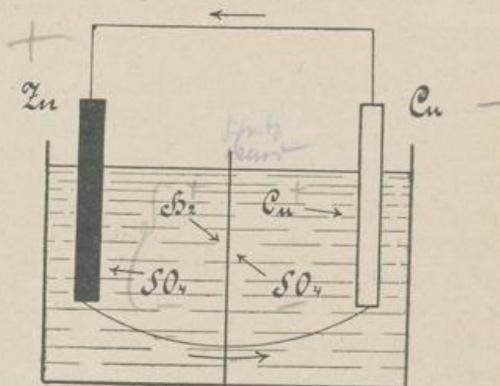


Fig. 152.

Das Kupfervitriol und die Schwefelsäure zerfallen in die Ionen Cu und SO_4 bzw. H_2 und SO_4 . Es wandern nun Cu und H_2 zur Kathode, also zum Kupfer, die beiden SO_4 -Ionen zum Zink. Am Kupfer schlägt sich also Kupfer nieder. Die H_2 -Ionen der Schwefelsäure treffen auf die SO_4 -Ionen des Kupfersulfats und verbinden sich mit diesen wieder zu Schwefelsäure, während die SO_4 -Ionen der

Schwefelsäure sich mit dem Zink zu Zinksulfat ($ZnSO_4$) verbinden, das sich in der Schwefelsäure auflöst. Das Resultat ist also, daß sich beständig Zink auflöst und gleichzeitig äquivalente Mengen Kupfer an der Kupferelektrode niederschlagen. Die Klemmenspannung [§ 177] beträgt hier rund 1 Volt.

Das Chromsäure-Element, wegen seiner gebräuchlichen Form (Fig. 153) auch Flaschenelement genannt, enthält eine Zink- und eine Kohlen-Elektrode, die in ein Gemisch von Schwefelsäure und doppeltchromsaurem Kali tauchen. Aus letzterem bildet sich Chromsäure, die den entstehenden Wasserstoff oxydiert. Um den Zinkverbrauch einzuschränken, werden die Elektroden nur während des Gebrauchs in die Flüssigkeit gesenkt; man spricht daher auch von „Tachelementen“.



Fig. 153.

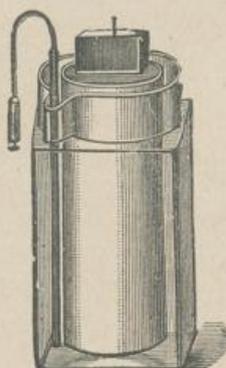


Fig. 154.

Beim LECLANCHÉ-Element (Fig. 154) taucht Zink in Salmiaklösung, Kohle in die Braunsteinfüllung (MnO_2) eines porösen Tonzylinders. Hier wirkt der aus dem Braunstein abgespaltene Sauerstoff depolarisierend. Vom LECLANCHÉ-

Daniell	Zink	H_2SO_4	$CuSO_4$	Cu
Chromsäure	"	H_2SO_4	doppeltchromsaure K.	Stoff
Leclanché	"	NH_4Cl	MnO_2	Stoff

Element gibt es verschiedene Modifikationen; u. a. gehören die meisten der bequemen Trocken-Elemente dazu, bei denen eine mehr oder weniger erhärtete Füllmasse (Sägespäne, Kreide, Ton usw.), mit dem Elektrolyten getränkt ist.

§ 189. **Akkumulatoren.** Während der Polarisationsstrom in den galvanischen Elementen eine unerwünschte Erscheinung ist, wird er in den von PLANTÉ erfundenen sekundären Elementen oder Akkumulatoren planmäßig nutzbar gemacht. Das Prinzip derselben ist folgendes: Zwei Bleiplatten, deren Oberfläche durch Oxydation an der Luft stets mit Bleioxyd bedeckt ist, tauchen in verdünnte Schwefelsäure. Beim Laden (Fig. 155) geht Sauerstoff zur positiven

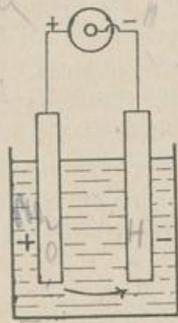


Fig. 155.

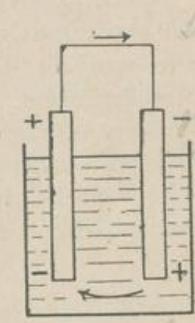


Fig. 156.

Elektrode und oxydiert sie zu Bleisuperoxyd (PbO_2), Wasserstoff dagegen zur negativen Elektrode, die hierdurch zu metallischem Blei in fein verteilter Form („Bleischwamm“) reduziert wird. Verbindet man nun nach Ausschaltung der äußeren Stromquelle beide Elektroden (Fig. 156), so geht jetzt im äußeren Stromkreise der Strom von der positiven Elektrode zur negativen, im Innern des Akkumulators dagegen von der Bleischwamm-Elektrode zur Bleisuperoxyd-Elektrode. Letztere wird durch den jetzt hier auftretenden Wasserstoff wieder zu Bleioxyd reduziert, erstere durch Sauerstoff ebenfalls zu Bleioxyd oxydiert. Die Entladung hört auf, wenn beide Elektroden chemisch gleichartig geworden sind, da dann eben keine elektromotorische Kraft mehr wirksam ist. Man muß dann also den Akkumulator von neuem laden. Bei den neueren Akkumulatoren bringt man nach FAURE als „aktive“ Masse auf die Bleiplatten einen Brei von Mennige (Pb_2O_3) bzw. Bleiglätte (PbO), wodurch die „Formierung“ der Bleiplatten, d. h. ihre Überführung in den für den Sekundärstrom wirksamen Zustand, erheblich beschleunigt wird. Damit diese Massen besser haften, macht man die Bleiplatten gitterförmig oder versieht sie mit riefen- bzw. muldenförmigen Vertiefungen. Eine Akkumu-

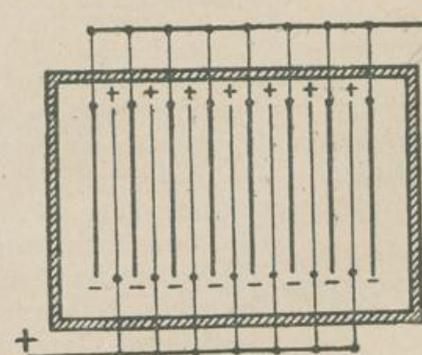
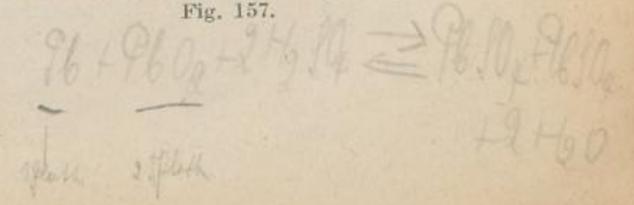


Fig. 157.



*Während des Ladens
 an der neg. Elektrode
 wird Wasserstoff
 gebildet. Die Lösung
 bildet sich
 PbO₂ auf der
 neg. Elektrode
 PbO₂ reduziert
 zu Wasserstoff
 an der neg. Elektrode
 während des Ladens
 an der neg. Elektrode
 wird Wasserstoff
 gebildet. Die Lösung
 bildet sich
 PbO₂ auf der
 neg. Elektrode
 PbO₂ reduziert
 zu Wasserstoff
 an der neg. Elektrode*

lator-, Zelle“ besteht nun aus einer gewissen Zahl positiver und negativer Platten, die miteinander abwechseln; von letzteren wird gewöhnlich eine mehr genommen, so daß jede positive Platte zwischen zwei negativen steht. Alle positiven Platten enden oben in einer Bleileiste, ebenso die negativen. In der Zelle sind die Platten also parallel geschaltet (Fig. 157). Die Zellen selbst werden gewöhnlich hintereinander geschaltet. Die Akkumulatoren zeichnen sich einmal durch ihre große und sehr konstante elektromotorische Kraft (ca. 2 Volt) aus; vor allem können sie aber zur Aufspeicherung elektrischer Energie dienen.

c. Elektromagnetismus und Elektrodynamik.

§ 190. **Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom.** Im Jahre 1820 entdeckte OERSTEDT, daß ein elektrischer Strom, der eine Magnetnadel umfließt, dieselbe ablenkt. und zwar senkrecht zu seiner Ebene zu stellen sucht. Die Richtung der Ablenkung ergibt sich aus der sog. AMPÈRESchen Schwimmregel: Denkt man sich in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, das Gesicht der Nadel zugekehrt, so wird ihr Nordpol nach links abgelenkt. Dasselbe Resultat erhält man auch durch die sog. Rechte-Hand-Regel: Hält man die rechte

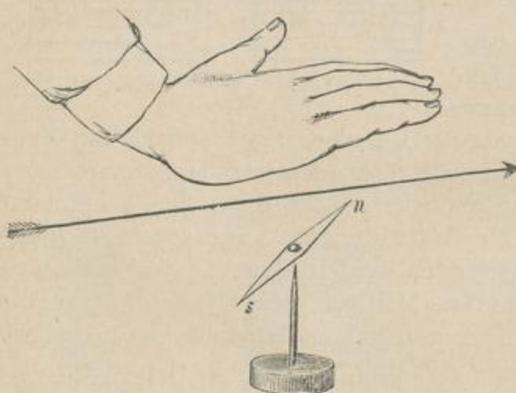


Fig. 158.

Hand in der Richtung des positiven Stromes so über den Stromleiter, daß die Handfläche der Magnetnadel zugekehrt ist, so wird ihr Nordpol nach der Richtung des abgepreizten Daumens abgelenkt (Fig. 158). Die Ablenkung der Magnetnadel dient zum Nachweis elektrischer Ströme. Die betreffenden Apparate heißen Galvanoskope.

Die Tatsache, daß ein elektrischer Strom magnetische Wirkungen hervorbringt, kann man auch so ausdrücken, daß ein stromdurchflossener Leiter ein magnetisches Feld besitzt, daß auch von ihm Kraftlinien [§ 150] ausgehen. Bei einem geraden Leiter bilden diese Kraftlinien konzentrische Kreise um die einzelnen Teile der Strombahn. Durch benachbarte Leiter wird der Verlauf der Kraftlinien in gesetzmäßiger Weise beeinflusst, bei einem Kreisstrom z. B. ist in einer bestimmten Ebene der Kraftlinienverlauf so, wie in Fig. 159 angedeutet.

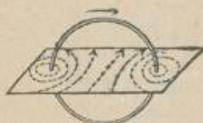


Fig. 159.

§ 191. **Biot-Savartsches Gesetz.** Ein Stromelement (d. i. ein sehr kleines Stück eines stromdurchflossenen Leiters) von der Länge l (Fig. 160) wirkt bei der Stromstärke i auf einen im Abstände r befindlichen Magnetpol m , wenn die Richtung von l und r den Winkel φ bilden, mit einer Kraft $F = \frac{m \cdot i \cdot l}{r^2} \cdot \sin \varphi$. Liegt der Magnetpol in der

Mitte eines kreisförmigen Stromes, so wird φ ein rechter Winkel, da ja der Radius senkrecht auf jedem Teil der Peripherie steht; es wird also $\sin \varphi = 1$. In diesem Falle nimmt das Gesetz die einfache Form an:

$$F = \frac{m \cdot i \cdot l}{r^2}.$$

Hieraus ergibt sich die sog. absolute elektromagnetische Einheit der Stromstärke.

Diese besitzt nämlich der Strom, der beim Durchfließen der Längeneinheit (1 cm) auf einen Magnetpol von der Stärke 1 im senkrechten Abstände 1 cm die Kraft 1 Dyne ausübt¹. Diese absolute elektromagnetische Einheit der Stromstärke ist gleich $3 \cdot 10^{10}$ elektrostatischen Einheiten der Stromstärke [§ 174] oder auch gleich 10 Ampère. 1 Ampère ist also gleich 0,1 absoluten elektromagnetischen Einheiten der Stromstärke.

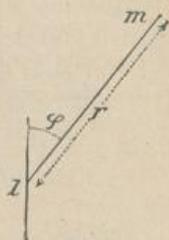


Fig. 160.

§ 192. **Strommessung mittels der Magnetnadel.** Da die Ablenkung der Magnetnadel der Stromstärke proportional ist, kann sie zur Bestimmung derselben benutzt werden. Der einfachste hierauf beruhende Apparat ist die **Tangentenbussole**. Hier fließt ein Strom durch einen vertikalen, in die Ebene des magnetischen Meridians gestellten Kreis aus Metalldraht und wirkt auf eine horizontale Magnetnadel ein. Wie sich zeigen läßt, ist hier die Tangente des Ablenkungswinkels der Stromstärke proportional; daher der Name. Zu feineren Messungen dienen die **Multiplikatoren** oder (**Nadel-**) **Galvanometer**, bei denen die Wirkung des Stromes dadurch verstärkt ist, daß er in vielen Windungen die Nadel umkreist. Außerdem wendet man hier **astatische Nadeln** an. Bei diesen ist der störende Einfluß des Erdmagnetismus dadurch aufgehoben, daß eine gleich starke Magnetnadel über der ersten so angebracht ist, daß die ungleichnamigen Pole übereinanderliegen (Fig. 161). Aus der AMPÈRESCHEN

¹ Aus obiger Formel ergibt sich auch die Dimension [§ 5] der Stromstärke im elektromagnetischen Maßsystem. Es ist nämlich $i = \frac{F \cdot r^2}{m \cdot l}$. Da sich r und l als Längenmaße heben, ist die Dimension von $i = \frac{\text{Kraft} \times \text{Länge}}{\text{Polstärke}}$. Unter Berücksichtigung von §§ 11 und 149 (Anmerkung) ist demnach die Dimension $\frac{m l t^{-2} \cdot l}{m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}} = m^{1/2} l^{1/2} t^{-1}$ bzw. $\text{gr}^{1/2} \text{cm}^{1/2} \text{sec}^{-1}$.

Regel folgt ohne weiteres, daß die zweite Nadel außerhalb des Stromkreises angebracht sein muß, weil ja sonst überhaupt keine Ausschläge zustande kämen.

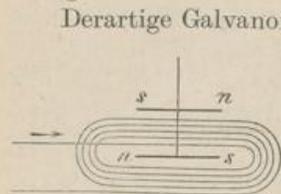


Fig. 161.

Derartige Galvanometer werden aber (nicht nur zur Messung von Stromstärken, sondern auch von Spannungsdifferenzen benutzt. Sind sie so geeicht, daß die Skala für jeden Ausschlag der Nadel die Zahl der Ampères bzw. Volts direkt anzeigt, so heißen sie Ampèremeter bzw. Voltmeter (nicht zu verwechseln mit Voltmeter).

Kennt man nämlich die Ausschläge eines Galvanometers für eine bestimmte Zahl von Ampères und seinen Widerstand in Ohms, so ergibt sich ja nach der Formel $1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Ohm}$ [§ 176] auch sofort der Spannungsunterschied, der den Ausschlag hervorruft.

Ein Ampèremeter kommt stets in den Hauptstromkreis, und zwar — da die Stromstärke in demselben überall gleich ist — an eine beliebige Stelle desselben. Es besteht aus wenigen Windungen von dickem Draht, damit nicht das Instrument selbst durch größeren Widerstand die Stromstärke beeinflusst.

Ein Voltmeter wird dagegen stets an die beiden Punkte des Hauptstromkreises angelegt, deren Spannungsdifferenz gemessen werden soll; es liegt also im Nebenschluß. (Im Gegensatz zur Stromstärke ist ja die Spannung innerhalb eines Stromkreises nicht konstant, sondern fällt vom positiven zum negativen Pol). Um die Stromstärke und Spannungsverteilung im Hauptkreise möglichst wenig zu beeinflussen, müssen die Voltmeter einen großen Widerstand besitzen; sie bestehen daher aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes.

Fig. 162 zeigt z. B. das Schema einer von einer Dynamomaschine M versorgten Lichtanlage L . A ist das in die Hauptleitung eingeschaltete Ampèremeter.

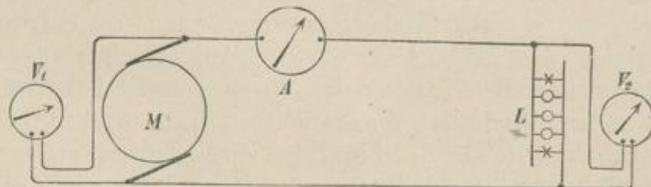


Fig. 162.

meter; die Voltmeter V_1 und V_2 liegen im Nebenschluß zur Hauptleitung, und zwar mißt V_1 die Spannung an den Polen der Maschine (Klemmenspannung), V_2 den Spannungsunterschied an den Enden der Lichtanlage.

Eine dritte Anwendung finden Galvanometer zur Messung von Elektrizitätsmengen, wenn es sich um Ströme von sehr kurzer Dauer, z. B. den Entladungsstrom von Leidener Flaschen handelt. Der erste Ausschlag der Galvanometernadel bei einem solchen Stromstoß ist nämlich der durch das Galvanometer hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge proportional. Ein hierzu benutztes Instrument heißt ballistisches Galvanometer.

Drehspulengalvanometer s. § 194, aperiodische Galvanometer s. § 198.

§ 193. **Elektromagnete.** Solange ein elektrischer Strom um einen Eisenstab geht, ist dieser magnetisch. Ein solcher durch den elektrischen Strom erzeugter Elektromagnet besitzt einen zwar nur temporären, aber äußerst starken Magnetismus. Nach der Molekulartheorie kann man sich vorstellen, daß der Strom ebenso wie die Magnetnadel auch alle Molekularmagnete in eine bestimmte Richtung bringt. Dadurch ist verständlich, daß auch für Elektromagnete das in § 152 über Koerzitivkraft, Hysteresis, remanenten Magnetismus Gesagte

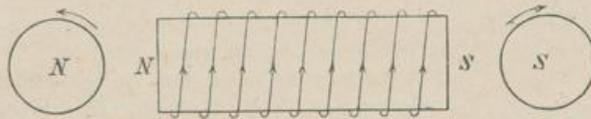


Fig. 163.

Geltung hat. Die Lage des Nordpols findet man wieder leicht nach der AMPÈRESCHEN Regel. Ferner ergibt eine einfache Überlegung, daß, wenn man von oben auf einen Südpol sieht, der Strom im Sinne des Uhrzeigers verläuft, beim Nordpol umgekehrt (Fig. 163).

Von den unzähligen auf Elektromagnetismus beruhenden Apparaten seien hier nur zwei beschrieben. Beim Telegraphen¹ von MORSE wird auf der Geberstation *G* (Fig. 164) durch Druck auf den Knöpf des sog. Schlüssels

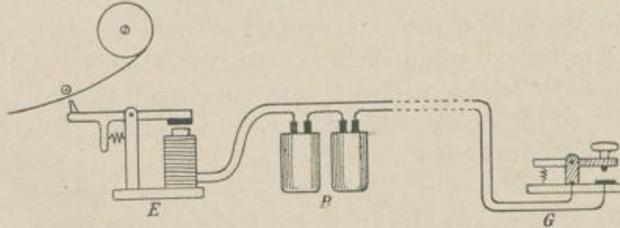


Fig. 164.

der von der Batterie *B* gelieferte Strom geschlossen; während dieser Zeit wird auf der Empfängerstation *E* ein Elektromagnet wirksam und zieht einen Anker an. Dabei wird durch Hebelwirkung ein Schreibstift gegen einen durch ein Uhrwerk gleichmäßig schnell vorbeibewegten Papierstreifen gedrückt und macht je nach der Dauer des Stromes Punkte und Striche. Aus diesen setzt sich dann das sog. MORSE-Alphabet zusammen. Da aber bei großen Entfernungen der Widerstand im Drahte zu groß wird, so daß der Elektromagnet nicht kräftig genug funktioniert, so wendet man ein sog. Relais an. Hier hat der erste Elektromagnet nur einen sehr leichten Hebel anzuziehen, durch den

¹ τηλε fern, γράφω schreiben.

ein neuer Stromkreis mit besonderen Elementen geschlossen wird, der dann erst den Schreibapparat in Tätigkeit setzt. Wie STEINHEIL zeigte, ist beim Telegraphen nur ein Leitungsdraht nötig; versenkt man nämlich seine beiden Enden genügend tief in die Erde, so besorgt diese die Rückleitung.

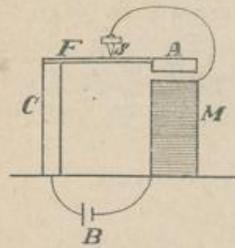


Fig. 165.

Der WAGNERSche Hammer ist ein selbsttätiger Stromunterbrecher. Hier wird ein Eisenstück *M* (Fig. 165) durch den herumgesandten Strom magnetisch und zieht den Anker *A* an, der durch eine Feder *F* an *C* befestigt ist. Hierdurch wird aber die Leitung unterbrochen; *M* verliert seinen Magnetismus, und die Feder geht in ihre alte Lage zurück, wodurch der Strom wieder geschlossen wird usf. Der WAGNERSche Hammer ist u. a. ein Bestandteil kleinerer Induktionsapparate [§ 204] sowie auch der elektrischen Klingeln; bei letzteren ist mit dem Anker

ein Klöppel verbunden, der bei Anziehung des Ankers gegen eine Glocke schlägt.

§ 194. Wirkungen zwischen elektrischen Strömen und Magneten.

Eine von einem Strom durchflossene Drahtspirale bzw. Drahtspule heißt ein Solenoid¹ (Fig. 166). Ein solches sucht nicht nur einen

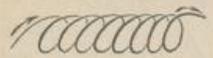


Fig. 166.

Magneten senkrecht zu der Richtung seiner einzelnen Stromkreise, mit anderen Worten also in die Richtung seiner Achse zu stellen,

sondern der Magnet wird auch entweder in die Spirale hineingezogen oder von ihr abgestoßen. Das Solenoid wirkt somit wie ein Stabmagnet; auch der Kraftlinienverlauf in beiden ist sehr ähnlich. Der Nordpol des Solenoids ist wieder nach der AMPÈRESchen Regel zu finden. In Fig. 166 ist er z. B. links; daher wird auf der rechten Seite ein magnetischer Südpol abgestoßen; ein Nordpol angezogen. Ein Stab aus weichem Eisen wird durch das Solenoid zuerst magnetisiert (bzw. von den Kraftlinien des Solenoids geschnitten) und dann wieder angezogen oder abgestoßen. Darauf beruht u. a. die Differentiallampe [§ 182].

Ist umgekehrt der elektrische Stromkreis beweglich, so sucht der Magnet denselben senkrecht zu seiner Achse zu stellen und übt

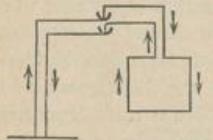


Fig. 167.

ferner auf ihn anziehende oder abstoßende Wirkung aus. Man kann dies mittels des AMPÈRESchen Gestells (Fig. 167) nachweisen, bei dem der Stromkreis frei beweglich in Quecksilbernäpfchen aufgehängt ist. Daher wird auch unter dem Einflusse des Erdmagnetismus die Ebene eines solchen Strom-

¹ solenoid Röhre.

kreises sich senkrecht zum magnetischen Meridian stellen. Durch geeignete Anordnungen kann man auch bewirken, daß ein Magnet unter dem Einflusse eines elektrischen Stromkreises beständig rotiert und umgekehrt.

Auf der Drehung eines beweglichen Stromkreises unter dem Einflusse eines Magneten beruhen auch die (Dreh-) Spulengalvanometer von DEPRED'ARSONVAL, WESTON u. a. Die drehbare Spule befindet sich hier zwischen den Polen eines starken Hufeisenmagneten und wird, solange kein Strom durch sie fließt, durch eine Spiralfeder usw. in einer bestimmten Lage erhalten (Fig. 168). Geht nun der Strom durch sie hindurch, so dreht sie sich, indem sie dabei die Elastizität der Feder überwindet, um einen der Stromstärke proportionalen Winkel, um nach Aufhören des Stromes in die Ruhelage zurückzukehren. An der Spule ist ein Zeiger befestigt, der über einer Skala spielt, die nach Ampères oder Volts geeicht ist [vgl. § 192]. Diese Art von Galvanometern ist unempfindlich gegen Änderungen des Erdmagnetismus und den Einfluß benachbarter Ströme, da diese gegenüber dem starken Feldmagneten nicht in Betracht kommen.

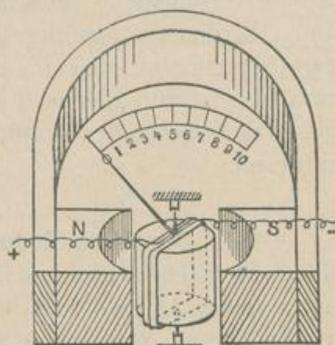


Fig. 168.

Erwähnt sei noch kurz das für sehr feine, besonders physiologische, Messungen benutzte Saitengalvanometer, bei dem ein sehr feiner Metallfaden zwischen den Polen eines starken Magneten ausgespannt ist. Geht Strom durch ihn, so wird seine Mitte ausgebogen. Diese Bewegungen kann man entweder durch ein Mikroskop mit Okularskala direkt beobachten, oder aber, bei raschem Wechsel, auf einen Schirm projizieren und kinematographisch aufnehmen.

§ 195. **Elektrodynamik.** Da, wie gezeigt wurde, elektrische Ströme wie Magnete wirken, so ist begreiflich, daß auch zwei elektrische Ströme aufeinander anziehende oder abstoßende Wirkung ausüben. AMPÈRE stellte nun folgende elektrodynamische Gesetze auf:

1. Parallel gerichtete Ströme ziehen sich an, wenn sie gleiche Richtung haben, im entgegengesetzten Falle stoßen sie sich ab.

2. Gekreuzte Ströme ziehen sich an, wenn in beiden der Strom gleichgerichtet ist, d. h. entweder in beiden nach der Kreuzungsstelle hin oder von ihr fort geht; andernfalls stoßen sie sich ab. In jedem Falle also suchen sie sich parallel zu stellen (Fig. 169).

3. Die Kraft, mit der sich die Ströme anziehen oder abstoßen, ist proportional dem Produkte der Stromstärken und dem Produkte der aufeinanderwirkenden Strom-

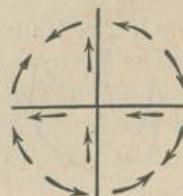


Fig. 169.

elemente, umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung.

§ 196. **Ampères Theorie des Magnetismus.** Die ähnlichen Wirkungen, welche elektrische Ströme und Magnete entfalten, veranlaßten AMPÈRE, die Theorie aufzustellen, daß jedes Eisenmolekül dauernd von einem Strom umflossen wird. Da nun diese Molekularströme verschiedene Richtungen haben, so heben sie sich gegenseitig auf. Werden sie aber durch einen Magneten oder elektrischen Strom parallel gerichtet, wirken sie also wie ein Solenoid, so wird das Eisen zum Magneten. Hiernach ist die Anziehung und Abstoßung zweier Magnete ohne weiteres auf die elektrodynamischen Gesetze zurückzuführen.

d. Induktion.

§ 197. **Begriff der Induktion.** Bei jeder Schließung und Öffnung eines elektrischen Stromes entstehen in einem benachbarten geschlossenen Leiter (der an und für sich stromlos sein kann) ebenfalls elektrische Ströme von kurzer Dauer, wie man durch ein eingeschaltetes Galvanometer leicht nachweisen kann. Man nennt den ersten Strom den primären oder induzierenden¹, den zweiten den sekundären, induzierten oder Induktionsstrom. Induktionsströme entstehen ferner beim Stärker- und Schwächerwerden, sowie beim Nähern und Entfernen des primären Stromes. Außer dieser Elektro- oder Volta-Induktion gibt es noch eine Magneto-Induktion, indem nämlich auch durch Näherung oder Entfernung eines Magneten in einem benachbarten geschlossenen Leiter Ströme entstehen. — Die erwähnten, verschiedenen Möglichkeiten kann man kurz folgendermaßen zusammenfassen: In einer sekundären Spule entsteht ein Induktionsstrom, wenn sie die Kraftlinien eines magnetischen Feldes schneidet, bzw. wenn sich die Zahl der von ihr eingeschlossenen Kraftlinien ändert.

§ 198. **Richtung der Induktionsströme.** Im sekundären Stromkreise entsteht beim Schließen, Stärkerwerden und Nähern des primären Stromes ein diesem entgegengesetzt gerichteter, beim Öffnen, Schwächerwerden und Entfernen ein gleichgerichteter Induktionsstrom. Die Verstärkung des primären Stromes ist ja offenbar ein Analogon zur Annäherung, wie auch das Schließen des Stromes als plötzliche Annäherung aus unendlicher Entfernung betrachtet werden kann. Natürlich entstehen auch Induktionsströme von entsprechender Richtung, wenn an Stelle des primären Stromkreises ein Magnet sich dem sekundären Stromkreise nähert oder von ihm entfernt bzw. umgekehrt. Durch forgesetztes

¹ *induco* hineinführen, veranlassen.

Schließen und Öffnen des primären Stromes bzw. durch Rotation eines Magneten vor einem Stromkreise (oder umgekehrt) erhält man somit Ströme von ständig wechselnder Richtung, sog. Wechselströme.

Alle speziellen Fälle faßt das LENZsche Gesetz folgendermaßen zusammen: Ein Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er die Zustandsänderung, durch welche er entstand, mittels elektromagnetischer bzw. elektrodynamischer Rückwirkung zu hemmen sucht. Nähert man z. B. dem primären Leiter *I* (Fig. 170), in dem der Strom von *A* nach *B* fließt, den sekundären Leiter *II*, so entsteht in diesem ein Induktionsstrom in der Richtung von *D* nach *C*; bei Entfernung von *II* dagegen in der Richtung von *C* nach *D*. Da nun parallele gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete sich abstoßen [§ 195], so suchen also die entstehenden Induktionsströme die weitere Annäherung bzw. Entfernung zu hemmen. Was für diesen Fall gilt, trifft auch für alle anderen Fälle zu.

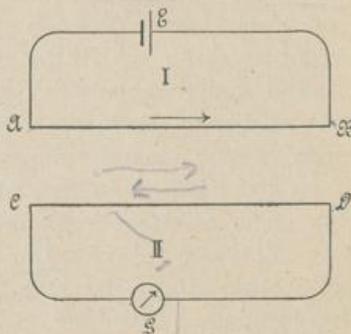


Fig. 170.

Das LENZsche Gesetz ist offenbar nur ein Spezialfall des Gesetzes von der Erhaltung der Energie und ein Ausdruck dafür, daß die Induktionsströme nicht aus nichts entstehen, sondern ein Äquivalent der mechanischen Arbeit sind, die bei der Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Felde usw. erforderlich ist.

Auf dem LENZschen Gesetze beruht es z. B., daß eine Magnetnadel, welche über Kupferplatten schwingt, gedämpft wird, d. h. bald zur Ruhe kommt. Derartig eingerichtete Galvanometer heißen aperiodisch, da die Nadel eben keine periodischen Schwingungen mehr macht.

Zuweilen sind solche in größeren Metallmassen induzierte Ströme (sog. FOUCAULTSche oder Wirbelströme) unerwünscht, da sie starke Erwärmung verursachen bzw. eine beabsichtigte Bewegung, z. B. des Ankers von Dynamomaschinen, hemmen können. Man beseitigt sie dadurch, daß man die betr. Eisenteile nicht massiv herstellt, sondern aus einzelnen Platten bzw. Drähten zusammensetzt und dadurch die Bahn der Wirbelströme gewissermaßen zerschneidet. Dies kommt z. B. auch für den Eisenkern von Induktionsapparaten in Betracht.

§ 199. **Größe der induzierten elektromotorischen Kraft.** Die elektromotorische Kraft eines Induktionsstromes ist proportional der Feldstärke des induzierenden Stromes oder Magneten, ferner der Länge des sekundären Stromkreises und drittens der Geschwindigkeit, mit der sich die Stärke oder Lage des induzierenden Stromes bzw. Magneten

ändert. Man kann auch sagen: Die in einem geschlossenen Leiter induzierte elektromotorische Kraft ist proportional der Änderung der Kraftlinienzahl, die pro Sekunde in der von ihm begrenzten Fläche erfolgt. Zur Erzielung starker Induktionsströme wird man also erstens die Feldstärke des primären Stromes bzw. Magneten möglichst groß machen; bei einem Solenoid wird man z. B. dessen Feld durch einen Eisenkern verstärken. Zweitens wird man als sekundären Stromkreis eine Spule mit möglichst zahlreichen Windungen wählen, da die elektromotorischen Kräfte der einzelnen Windungen sich wie bei hintereinander geschalteten galvanischen Elementen summieren. Drittens wird man für rasche Unterbrechung des primären Stromes bzw. schnelle Rotation im magnetischen Felde sorgen.

§ 200. **Selbstinduktion. Extrastrome.** Induktion findet nicht nur von einem primären auf einen sekundären Stromkreis statt, sondern auch innerhalb des primären Stromkreises selbst, natürlich aber nur bei Schwankungen der Stromstärke bzw. beim Schließen und Öffnen des Stromes. Diese sog. Selbstinduktion kommt zwar auch bei geraden Stromleitern vor, die man sich ja in der Längsrichtung aus einzelnen nebeneinanderliegenden und somit sich beeinflussenden Teilen zusammengesetzt denken kann; besonders tritt sie aber in Spulen auf, wo jede Windung nicht nur auf sich selbst, sondern auch auf die benachbarten wirkt. Die durch Selbstinduktion hervorgegerufenen Ströme heißen Extrastrome; am wichtigsten ist der Schließungs- und Öffnungs-Extrastrom. Nach dem LENZschen Gesetze müssen die Extrastrome, wie alle Induktionsströme, eine derartige Richtung haben, daß sie den Intensitätsschwankungen des Hauptstromes, durch die sie ja entstehen, entgegenwirken. Hierbei ist wieder Schließen als plötzliches Ansteigen der Stromstärke von Null auf einen bestimmten Wert, Öffnen als plötzliches Absinken auf Null zu betrachten. Der Schließungsextrastrom hat also entgegengesetzte Richtung wie der Hauptstrom. Erschwächt denselben und bewirkt, daß er nur allmählich seine volle Stärke erreicht. Der Öffnungsextrastrom dagegen hat dieselbe Richtung wie der Hauptstrom. Wird dieser durch die Öffnung unterbrochen, so bleibt in der Strombahn noch die gleichgerichtete elektromotorische Kraft des Öffnungsextrastroms wirksam, die so groß ist, daß sie die Unterbrechungsstelle in Form des sog. Öffnungsfunkens überbrücken kann. Die Selbstinduktion wirkt also sowohl bei Stromschluß wie bei Stromöffnung hemmend bzw. verzögernd auf den Hauptstrom; sie kann gewissermaßen als eine Art „elektrische Trägheit“ betrachtet und mit dem Schwungrad bei Maschinen in Parallele gesetzt werden. Da nun die Stromstärke des Hauptstromes bei der Schließung nur langsam zur vollen Höhe anwächst, bei der Öffnung

aber sehr rasch auf Null sinkt, muß auch nach dem im vorigen Paragraphen Gesagten der Öffnungsextrastrom eine wesentlich größere elektromotorische Kraft besitzen als der Schließungsextrastrom.

§ 201. **Elektrische Maschinen.** Die elektrischen Maschinen, die alle auf Induktionswirkung beruhen, dienen dazu, mechanische Energie in elektrische zu verwandeln (stromerzeugende Maschinen, Generatoren) oder umgekehrt elektrische Energie in mechanische (Kraftmaschinen, Elektromotoren). Bei ersteren wird ein Stromleiter in einem magnetischen Felde durch mechanische Arbeit in Bewegung versetzt, bei letzteren wird einem im magnetischen Felde befindlichen Leiter ein elektrischer Strom zugeführt. Durch Verbindung eines Generators mit einem Elektromotor kann eine Kraftübertragung, auch auf weite Entfernungen, erzielt werden. Die elektrischen Maschinen bestehen im wesentlichen 1. aus dem Feldmagneten, der das magnetische Feld liefert; es ist dies bei den magnetelektrischen Maschinen ein permanenter Stahlmagnet, bei den (jetzt fast ausschließlich üblichen) elektromagnetischen Maschinen ein Elektromagnet; 2. aus dem Induktor oder Anker; d. i. ein Leiter, der sich durch Zuführung mechanischer oder elektrischer Energie (gewöhnlich rotierend) bewegt. — Je nachdem der gelieferte Strom ständig dieselbe oder regelmäßig wechselnde Richtung hat, unterscheidet man Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen.

Fig. 171 zeigt z. B. das Prinzip einer magnetelektrischen Maschine. NS ist der Feldmagnet, ns der Induktor, um dessen Schenkel zwei miteinander verbundene Drahtspulen gewickelt sind. Während einer ganzen Umdrehung von ns müssen in dem Drahte zwei entgegengesetzt gerichtete Ströme entstehen. Denn während einer halben Umdrehung nähert sich ja die eine Spule dem Nordpol des Magneten, die andere dem Südpol. Bei geeigneter Wicklung des Drahtes entsteht aus den beiden Impulsen ein einziger Strom in bestimmter Richtung, die sich bei der nächsten halben Umdrehung natürlich ändern muß. Solche Maschinen liefern also Wechselströme, die erst durch eine geeignete Vorrichtung, den Stromwender oder Kommutator, gleichgerichtet werden.

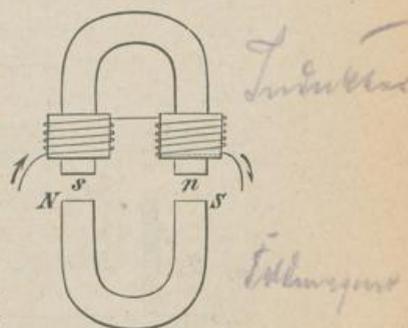


Fig. 171.

Bedeutend erhöht wurde die Wirksamkeit dieser Maschinen, als man an Stelle der gewöhnlichen Magnete starke Elektromagnete anwandte und den Induktor zwischen den ausgehöhlten Polen des Feldmagneten rotieren ließ, so daß beide einander immer möglichst genähert bleiben. Auch hierbei entstehen Wechselströme, die durch einen Kommutator in Gleichstrom verwandelt werden können; doch ist dieser pulsierend, d. h. seine Stärke nimmt periodisch ab und zu. Dagegen erhält man einen nahezu konstanten Gleich-

strom durch den von PACINOTTI und GRAMME erfundenen Ringanker.

Derselbe besteht aus einem Ringe von weichem Eisen, der zwischen den Polen N und S (Fig. 172) eines starken Magneten um seine eigene Achse rotiert.

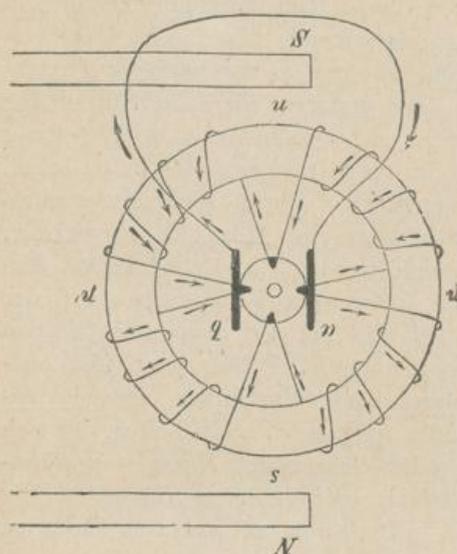


Fig. 172.

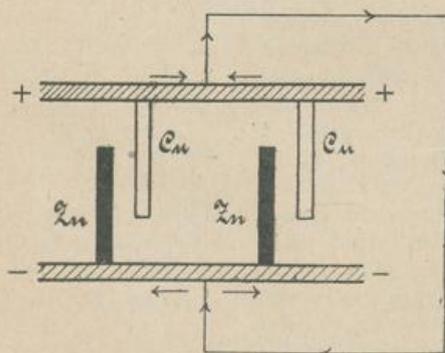


Fig. 173.

Um den Ring sind zahlreiche Gruppen von Drahtwindungen (in der Figur nur vier), alle nach derselben Richtung gewickelt; das Ende einer jeden ist in der Achse mit dem Anfange der nächsten leitend verbunden, indem sie an eine entsprechende Zahl von isolierten Metallstreifen angelötet sind. Dieser mittlere Teil des Apparates heißt Kollektor. Rotiert der Ring, so müssen in den Drahtwindungen der oberen Hälfte entgegengesetzte Ströme entstehen wie in den unteren. Diese entgegengesetzt gerichteten Ströme stoßen nun an den Stellen p und p' zusammen, welche somit analog den Polen zweier nebeneinander geschalteter galvanischer Elemente sind (vgl. Fig. 173). Ebenso wie bei solchen wird auch beim GRAMMESchen Ring die Elektrizität abgeleitet, indem in Höhe von p und p' zwei Metallstücke a und b , die sog. Bürsten, am Kollektor schleifen. Es entsteht somit ein stets gleichgerichteter Strom von b nach a .

Auf ähnlichen Prinzipien wie der GRAMMESche Ring beruht der Trommelanker von v. HEFNER-ALTENECK, bei dem der Wicklungsdraht auf einen, ebenfalls zwischen den Polen eines Elektromagneten rotierenden, Eisenzylinder („Trommel“) parallel zur Längsachse gewickelt ist.

§ 202. **Dynamoprinzip.** Neben der Verbesserung der Ankerkonstruktionen trug vor allem die von WERNER SIEMENS 1867 gemachte Entdeckung des Dynamoprinzips zur großartigen Entwicklung der elektrischen Maschinen bei. Dasselbe besteht darin, daß man den durch Drehung des Induktors in diesem entstandenen Strom um den Hufeisenmagneten (bzw. um ein hufeisenförmiges Stück von weichem

Eisen, das ja in Folge des Erdmagnetismus stets eine Spur Magnetismus enthält) herum leitet und somit dessen magnetische Wirkung verstärkt. Diese erhöht wieder die Wirksamkeit des Induktionsstroms, und so setzt sich dieser Circulus fort, bis zur magnetischen Sättigung des Eisens. Als Anker derartiger Dynamomaschinen kann jeder Gleichstrom liefernde Anker dienen, also der GRAMMESCHE Ring, der Trommelanker usw. Man unterscheidet wieder Hauptstrommaschinen (Fig. 174), wo der Strom hintereinander Feldmagnet und äußeren Stromkreis durchfließt, Nebenschlußmaschinen, wo der Feldmagnet im Nebenschluß liegt, und Verbundmaschinen, die eine Kombination der beiden ersten Typen sind.

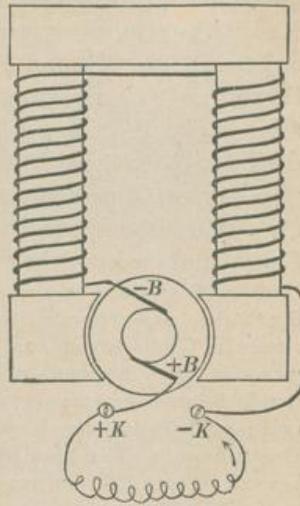


Fig. 174.

§ 203. **Transformatoren.** Unter Transformatoren im engeren (technischen) Sinne versteht man Vorrichtungen, durch welche ein Wechselstrom von bestimmter Spannung mittels Induktion einen zweiten Wechselstrom von anderer Spannung erzeugt. Wickelt man auf einen Eisenkern (der für technische Zwecke ringförmig geschlossen ist) einen primären und darüber einen sekundären Stromkreis, so treten, wie oben ausgeführt, in letzterem Induktionsströme auf, wenn im primären Stromkreise Schwankungen der Stromstärke entstehen; letzteres ist natürlich auch der Fall, wenn ein Wechselstrom hindurchgesandt wird. Es verhalten sich nun die elektromotorischen Kräfte in beiden Stromkreisen wie die Windungszahlen der primären und sekundären Spule. Auf Grund dieser Tatsache ist man in der Lage, einen Wechselstrom von gegebener Spannung in einen anderen Wechselstrom von gewünschter Spannung zu verwandeln. Man braucht in den Stromkreis des ersteren ja nur eine Spule einzuschalten, die man mit einer sekundären Spule von entsprechend größerer oder kleinerer Windungszahl umgibt. Da nun nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie bei dieser Umwandlung der Effekt in beiden Stromkreisen, also die Zahl der Volt-Ampère bzw. Watt gleich sein muß, wird natürlich einer erhöhten Spannung im sekundären Stromkreise eine geringere Stromstärke daselbst entsprechen und umgekehrt. So kann z. B. ein Strom von 10 Volt und 2 Ampère in einen Strom von 40 Volt transformiert werden, der dann aber nur 0,5 Ampère haben kann. Durch Wechselstromtransformatoren kann man also Ströme von niedriger Spannung und großer

Stromstärke in solche von hoher Spannung und geringer Stromstärke verwandeln und umgekehrt. Wegen dieser bequemen Transformierbarkeit spielen Wechselströme bei der elektrischen Kraftübertragung eine große Rolle. Denn während es darauf ankommt, an Ort und Stelle Ströme von hoher Intensität zur Verfügung zu haben, würde die Fortleitung solcher sehr unzweckmäßig sein, da ja die unproduktive JOULEsche Wärme mit dem Quadrate der Intensität wächst [§ 180]. Zum Transport der elektrischen Kraft verwendet man daher hochgespannte Wechselströme von geringer Intensität, für welche sehr dünne Drähte genügen, und transformiert sie dann am Gebrauchsorte in solche von großer Intensität, aber geringer Spannung.

Im Gegensatz zu den Transformatoren sind Umformer Vorrichtungen, durch die eine bestimmte Stromart in eine andere verwandelt wird, z. B. Gleichstrom in Wechselstrom und umgekehrt. Man erreicht dies z. B. dadurch, daß man eine Wechselstrom- mit einer Gleichstrommaschine koppelt (entweder durch Riemenübertragung oder durch Aufbau auf derselben Rotationsachse) und je nach Bedarf die eine als Motor, die andere als Generator benutzt („Motor-Generatoren“). Man kann aber die Umformung auch in einer einzigen Maschine bewerkstelligen („Umformer im engeren Sinne“). Die Ausdrücke „Transformator“ und „Umformer“ werden übrigens manchmal auch gleichbedeutend für einander gebraucht.

§ 204. **Induktionsapparate.** Auf analogen Grundlagen wie die Wechselstromtransformatoren beruhen auch die Induktionsapparate im engeren Sinne. Auch hier haben wir wieder eine in den primären Stromkreis eingeschaltete primäre Spule, die aus relativ wenigen Windungen eines dicken Drahtes besteht. Sie ist umgeben von der sekundären Spule, die mit sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes bewickelt ist. Auch hier befindet sich im Inneren der Primärspule zur Verstärkung des magnetischen Feldes ein Eisenkern, der aber hier nicht ringförmig geschlossen, sondern stabförmig ist [vgl. § 198]. Man kann zwar einen solchen Induktionsapparat auch dadurch betreiben, daß man durch die Primärspule Wechselstrom sendet. Gewöhnlich aber werden die zur induktiven Erregung der Sekundärspule erforderlichen Schwankungen der Stärke des magnetischen Feldes (bzw. der Kraftlinienzahl) dadurch erzielt, daß ein im primären Stromkreise fließender Gleichstrom durch automatische Vorrichtungen in raschem Wechsel geschlossen und geöffnet wird. Wie bereits erwähnt [§ 200], besitzt der sekundäre Öffnungsinduktionsstrom eine viel höhere Spannung und deshalb u. a. auch eine größere physiologische Wirksamkeit als der Schließungsinduktionsstrom.

Für medizinische Zwecke kommen kleine Induktionsapparate¹ in Betracht, bei denen die automatische Stromunterbrechung

¹ Der von solchen Apparaten gelieferte Strom wird nach medizinischem Sprachgebrauch auch faradischer Strom genannt (nach FARADAY, dem Entdecker der Induktion).

durch den WAGNERSchen Hammer [§ 193] bzw. Modifikationen desselben erfolgt. Bei gegebenem Apparat ist die Induktionswirkung um so kräftiger, je stärker der Primärstrom, je tiefer der Eisenkern in der Primärspule und je kleiner der Abstand beider Spulen („Rollabstand“) ist. Letzterer Faktor läßt sich bei den sog.

Schlittenapparaten (DU BOIS-REYMOND) dadurch variieren, daß die sekundäre Spule über die primäre verschoben werden

kann. Bei dem in Fig. 175 abgebildeten Apparat geschieht dies z. B. durch Drehen des Knopfes *R*.

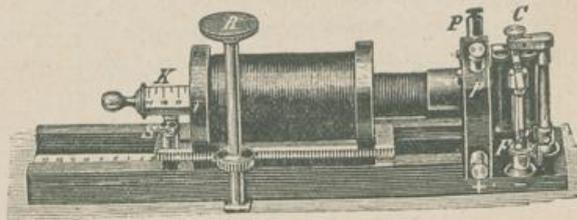


Fig. 175.

Von diesen kleinen medizinischen Apparaten unterscheiden sich die großen von RÜHMKORFF erfundenen Funkeninduktoren, die zur Erzeugung von Röntgenstrahlen usw. dienen, prinzipiell nicht. Nur wird in ihnen durch verschiedene Faktoren eine derartig hohe Spannung (10000 bis 1 Million Volt) erreicht, daß zwischen den Polen der sekundären Spule Funken von oft außerordentlicher Länge und Intensität übergehen können. So ist z. B. die Windungszahl der sekundären Spule außerordentlich groß; bei den größten Apparaten sind bis zu 160 km Draht aufgewickelt. Erhöht wird die Wirkung auch durch den FIZEAUSchen Kondensator [§ 167]. Wird ein solcher Kondensator, der eine große Kapazität besitzt, parallel zur Unterbrechungsstelle geschaltet, so wird die Spannung an dieser so verringert, daß die Öffnungsfunken (welche ja der raschen Unterbrechung entgegenwirken, somit die Spannung der sekundären Öffnungsströme verringern) nicht zustande kommen. Von besonderer Wichtigkeit für den Wirkungsgrad der Induktoren sind schließlich die Unterbrecher, da ja von der Schnelligkeit und Exaktheit der Unterbrechung die Größe der elektromotorischen Kraft im sekundären Stromkreise wesentlich abhängt.

Während der WAGNERSche Hammer nur 15–20 Unterbrechungen pro Sekunde gibt, daher nur für kleinere Induktoren verwendbar ist, erzielt man mit den modernen Unterbrechern bis zu vielen Hunderten Unterbrechungen pro Sekunde. Von den vielen Arten sei hier nur kurz der WEHNELT-Unterbrecher beschrieben. Hier taucht in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure als Kathode eine breite Bleiplatte, als Anode ein Platinstift. An diesem tritt, wegen des hier großen Widerstandes, sehr starke Erhitzung (JOULEsche Wärme) ein, so daß die benachbarten Flüssigkeitsteilchen in Dampf verwandelt werden, wodurch Stromunterbrechung erfolgt. Ist nun im primären Stromkreise eine

Spule mit beträchtlicher Selbstinduktion vorhanden, so entsteht infolge der plötzlichen Abnahme der Stromstärke ein kräftiger Öffnungsextrastrom, der unter Funkenbildung die erhitzte Gashülle durchschlägt, in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt und explosionsartig auseinandertreibt, so daß jetzt wieder Flüssigkeit den Stift berührt und der Strom geschlossen ist. Auf diese Weise erhält man bis zu 3000 Unterbrechungen pro Sekunde.

§ 205. **Telephon und Mikrophon.** Von den unendlich vielen auf Induktion beruhenden Apparaten ist einer der interessantesten das Telephon¹ von BELL. An den beiden Orten, zwischen denen gesprochen wird, befindet sich ein Stabmagnet, der von einer Drahtspule umgeben ist; die Drahtspulen beider Orte sind miteinander verbunden. Vor den Nordpolen n und n' (Fig. 176) der Magnete be-

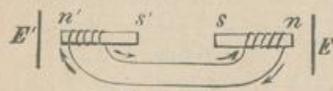


Fig. 176.

findet sich je ein dünnes Eisenplättchen E und E' , in denen durch Influenz auf der den Magneten zugekehrten Seite ein magnetischer Südpol entsteht. Nähert man das Eisenplättchen E dem Magneten

und damit auch der geschlossenen Drahtspule, so entsteht in dieser ein Induktionsstrom, der zum Nordpol des anderen Magneten fließt und diesen, da er entgegengesetzt wie ein Uhrzeiger geht [vgl. § 193] verstärkt; das Eisenplättchen E' wird also angezogen. Entfernt man dagegen E , so wird E' abgestoßen. Beide Eisenplättchen bewegen sich also stets gleichsinnig. Wird daher gegen E gesprochen, so wird es in Schwingungen versetzt, die genau dieselben Schwingungen in E' hervorrufen; letztere werden dann als Töne vernommen. Der eine Draht kann wie beim Telegraphen durch die Erdleitung ersetzt werden.

Eine wesentliche Verstärkung der Wirkung erzielt man, wenn man das eigentliche Telephon nur als Empfänger (Hörapparat) benutzt, als Geber (Sprechapparat) dagegen ein sog. Mikrophon. Hier geht ein Batteriestrom durch mehrere, auf einem Resonanzboden angebrachte, mit den Spitzen sich berührende Kohlenstäbchen und von hier aus zur Empfangsstation. Wird gegen den Resonanzboden gesprochen, so wird durch die mechanische Erschütterung hierbei der Kontakt der Kohlenstippen und somit auch der Widerstand im Stromkreise geändert; es entstehen Schwankungen im Magnetismus des Hör-Telephons, und die Eisenplatte desselben gerät in Schwingungen, die denen der Tonquelle genau entsprechen. Anstelle der Kohlenstäbchen kann man auch Kohlenkörner benutzen, die sich zwischen zwei leitenden Platten befinden. Für größere Entfernungen verbindet man den Stromkreis des Mikrophons mit der primären, den des Telephons mit der sekundären Spule eines Transformators, wodurch ein für Fernleitungen besser geeigneter Strom von höherer Spannung erzielt wird [vgl. § 203].

¹ τῆλε fern, φωνῶω sprechen.

e. Entladungen in verdünnten Gasen. Radioaktivität.

§ 206. **Lichterscheinungen in Geißler- und Hittorf-Röhren.** Unter GEISSLERSCHEN Röhren versteht man verschieden geformte Glasröhren, die Luft oder ein anderes Gas in starker Verdünnung enthalten und mit zwei eingeschmolzenen Aluminium-Elektroden versehen sind (Fig. 177). Hat man den Druck in einer solchen Röhre durch Auspumpen auf 6—8 mm Quecksilber erniedrigt und sendet dann hochgespannte Elektrizität, z. B. mittels einer Influenzmaschine oder eines Funkeninduktors hindurch, so entsteht kein gewöhnlicher elektrischer Funke, sondern zwischen beiden Elektroden verläuft ein helles violettes Lichtband, das sich bei 1—3 mm Druck verbreitert und eine Schichtung aufweist. Das von der Anode ausgehende Licht sieht mehr rötlich aus und reicht bis in die Nähe der Kathode, von der es durch einen dunklen Zwischenraum getrennt ist. Auch an der Kathode sieht man eine kleine bläuliche Lichthülle (Glimmlicht). Bei zunehmender Luftverdünnung dehnt sich das Glimmlicht immer mehr nach der Anode zu aus, während das Anodenlicht immer kleiner wird und schließlich ganz verschwindet. Beträgt der Druck im Innern der Röhre nur noch 0,01—0,001 mm Quecksilber — so stark evakuierte Röhren werden HITTORFSCHES oder CROOKESSCHE Röhren genannt —, so zeigt die Röhre, die jetzt fast gar kein Anodenlicht und nur ein ganz schwaches diffuses Glimmlicht aufweist, an der der Kathode gegenüberliegenden Stelle grünliche oder bläuliche Fluoreszenz, deren Ursache unsichtbare, von der Kathode ausgehende Strahlen sind.

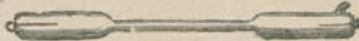


Fig. 177.

§ 207. **Kathodenstrahlen. Anodenstrahlen.** Die Haupteigenschaften der von HITTORF und CROOKES entdeckten **Kathodenstrahlen** sind folgende: 1. Sie erzeugen in nichtmetallischen Körpern, z. B. in der Wand der Glasröhre, **Fluoreszenz**. 2. Sie breiten sich senkrecht zur Kathode geradlinig aus, ganz unabhängig davon, wo die Anode ist. Ist die Kathode hohlspiegelartig, so vereinigen sie sich in einem Brennpunkt (Fig. 179). Die geradlinige Ausbreitung wird dadurch bewiesen, daß von einem undurchlässigen festen Körper auf der fluoreszierenden Stelle der gegenüberliegenden Glaswand ein ähnliches Schattenbild entsteht (Fig. 178). 3. Sie besitzen starke Wärmewirkungen. 4. Sie können in labilem Gleichgewicht befindliche leichte Körper in Bewegung setzen. 5. Sie gehen durch sehr dünne Metall-



Fig. 178.

schichten (aber nicht durch Glimmer- oder Glasplatten) hindurch. Kittet man also z. B. ein dünnes Aluminiumblättchen gegenüber der Kathode auf die daselbst durchlochte Wand, so kann man die Kathodenstrahlen auch außerhalb der Röhre untersuchen, wo sie jedoch bald diffus zerstreut werden. 6. Sie ionisieren die Luft [§ 212]. 7. Sie werden durch magnetische und elektrostatische Einwirkungen aus ihrer Richtung abgelenkt. 8. Sie erzeugen dort, wo sie auf feste Körper aufprallen, eine neue Art von Strahlen, die Röntgenstrahlen.

Wahrscheinlich sind die Kathodenstrahlen die Bahnen allerkleinster materieller Teilchen, die mit negativer Ladung von der Kathode aus mit ungeheurer Geschwindigkeit (ein bis drei Zehntel der Lichtgeschwindigkeit) fortgeschleudert werden. Man nennt derartige „Elementarquanta“ der Masse, die — etwa 2000mal kleiner als ein Wasserstoffatom — mit einem „Elementarquantum“ negativer Elektrizität verbunden sind, Elektronen. Manche Forscher nehmen sogar an, daß die Elektronen nur eine scheinbare Masse besitzen, daß es also reine Elektrizitätsteilchen sind, deren (durch Selbstinduktion bewirkte) Trägheit gegen Geschwindigkeitsänderungen eine Masse nur vortäuscht. Jedenfalls kennt man bisher nur negative Elektronen [vgl. § 212].

Die von der Anode ausgehenden Anodenstrahlen, die ebenfalls magnetisch und elektrisch ablenkbar sind, stellen die Bahnen mit positiver Elektrizität geladener Teilchen vor, welche ungefähr die Größe der gewöhnlichen Atome und dementsprechend eine viel kleinere Geschwindigkeit besitzen als die Kathodenstrahlen. Zu den Anodenstrahlen gehören wahrscheinlich auch die sog. Kanalstrahlen, das sind Strahlen, die durch eine durchlöchernte Kathode von der Anodenseite her hindurchtreten.

§ 208. Röntgenstrahlen. Als RÖNTGEN 1895 zufällig beobachtete, daß fluoreszierende Körper aufleuchteten, wenn eine in der Nähe befindliche, mit undurchlässigem Stoff bedeckte HITTORFSche Röhre in Betrieb war, war dies für ihn der Anlaß zu systematischen Untersuchungen, die ihn zur Entdeckung einer neuen Art unsichtbarer Strahlen führten. Während er sie selbst „X-Strahlen“ nannte, heißen sie jetzt allgemein ihm zu Ehren Röntgenstrahlen. Diese Röntgenstrahlen entstehen überall dort, wo Kathodenstrahlen auf feste Körper auftreffen, u. a. auch am fluoreszierenden Teile der Röhrenwand. Besonders wirksame Röntgenstrahlen erhält man, wenn Kathodenstrahlen auf Platin (oder Iridium oder Tantal) fallen. Man konstruiert daher die sog. Röntgenröhren so, daß man in den Brennpunkt einer hohlspiegelförmigen Kathode (*a* in Fig. 179) eine Platte aus Platin usw. (*b*) als sog. Antikathode¹ bringt, von der die wirksamen Röntgenstrahlen ausgehen. Durch diese Anordnung erreicht man zugleich, daß die Röntgenstrahlen möglichst nur von einem Punkte der Antikathode ausgehen, der eben im Brennpunkte der Kathodenstrahlen liegt (daher der Name Fokusröhren); hierdurch

¹ *oprt* gegenüber.

erhält man wesentlich schärfere Bilder. Erwähnt sei noch, daß man Röhren, bei denen die Luft maximal verdünnt ist, hart, weniger stark evakuierte weich nennt; erstere liefern „harte“, letztere „weiche“ Strahlen.

Die Röntgenstrahlen erregen Fluoreszenz, sind photographisch wirksam, ionisieren die Luft [§ 212] und besitzen Wärmewirkungen. Im Gegensatz zu den Kathodenstrahlen sind sie durch magnetische oder elektrische Kräfte nicht ablenkbar und entfalten ihre Wirkungen zum wesentlichen Teile auch außerhalb der Röhre. Besonders wichtig ist ihre Eigenschaft, feste (auch undurchsichtige) Körper zu durchdringen, um so besser, je härter die Strahlen sind und je kleiner die Dichte bzw. das Atomgewicht der betreffenden Körper ist.

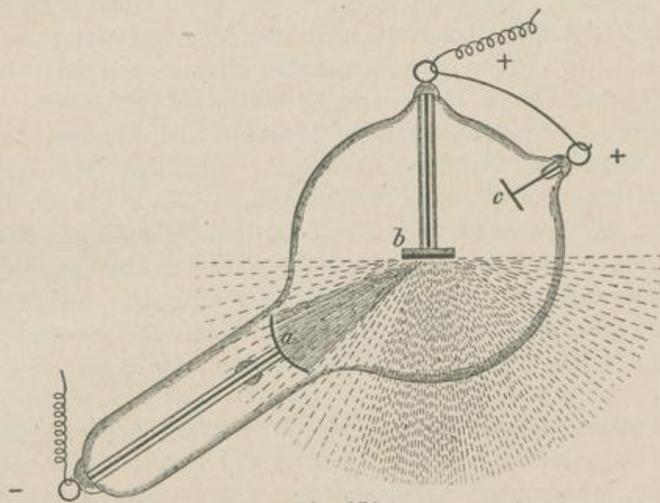


Fig. 179.

Die Schwermetalle sind z. B. in viel geringerem Grade durchlässig als das leichte Aluminium, die Knochen weniger als die Haut und Muskeln usw. Da nun die Röntgenstrahlen, wie erwähnt, auch photochemische Wirkungen besitzen und Fluoreszenz erzeugen, so kann man mit ihnen Gegenstände photographieren („röntgenographieren“) bzw. direkt sehen („röntgenoskopieren“), die sich im Innern von undurchsichtigen, aber für Röntgenstrahlen durchlässigen Körpern befinden, z. B. Geld in einem Portemonnaie, Knochen im tierischen Körper usw. Es entsteht dann nämlich ein Schattenbild der undurchlässigen Objekte, z. B. der Knochen, da hinter denselben die photographische Platte nicht zersetzt wird, resp. der (meist mit Baryumplatinzyanür beschriebene) Fluoreszenzschirm nicht aufleuchtet.

Die Röntgenstrahlen entstehen wahrscheinlich dadurch, daß die Elektronen der Kathodenstrahlen auf die Antikathode aufprallen, wodurch kurz-

dauernde Erschütterungen des Äthers ausgelöst werden. Nachdem es gelungen ist, bei ihnen Polarisations-, Beugungs- und Interferenzerscheinungen nachzuweisen (letztere mittels Kristallen, die gewissermaßen natürliche molekulare „Gitter“ vorstellen), nimmt man an, daß auch die Röntgenstrahlen auf transversalen Ätherschwingungen beruhen, die sich wellenförmig mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Und zwar sind die Wellenlängen der Röntgenstrahlen die kleinsten, die man kennt, nämlich je nach Qualität der Strahlen ca. $0,01-4 \mu\mu$ [vgl. § 135].

§ 209. **Radioaktive Stoffe und Strahlen.** Wenige Monate nach der Entdeckung RÖNTGENS fand BECQUEREL, daß metallisches Uran und seine Verbindungen ohne äußere Einwirkung dauernd Strahlen ausenden, die wie die Röntgenstrahlen photographisch wirksam sind, feste Substanzen durchdringen, Fluoreszenz erregen, und die Luft leitend machen, also in die Nähe gebrachte elektrisch geladene Körper entladen. Man nennt derartige Strahlen radioaktive Strahlen (zuweilen auch nach dem Entdecker BECQUEREL-Strahlen) und die Stoffe, von denen sie ausgehen, radioaktive Stoffe. Da die Pechblende (ein uranoxydhaltiges Mineral) viel stärker radioaktiv ist als metallisches Uran, lag der Gedanke nahe, daß die Strahlen von gewissen Beimengungen des Urans ausgehen. Nach vielen mühsamen Versuchen gelang es 1898 dem Ehepaar CURIE, als Träger der Radioaktivität aus der Pechblende zwei Elemente zu isolieren, die dem Wismut bzw. Baryum nahestehen, das Polonium und Radium. Bald fand man noch weitere primär radioaktive Elemente, nämlich das Aktinium (ebenfalls in der Pechblende), das Kalium und Rubidium.

Die stärkste Wirkung besitzt das Radium. Es gleicht chemisch sehr dem Baryum, hat aber das Atomgewicht 226. Seine (anscheinend unbegrenzt) abgegebene Energie äußert sich — abgesehen von den ausgesandten radioaktiven Strahlen (s. u.) — in Licht- und Wärmerscheinungen: Radium leuchtet ohne vorherige Bestrahlung intensiv im Dunkeln und strahlt in 1 Stunde pro Gramm 138 Grammkalorien aus.

Die von radioaktiven Substanzen ausgehende Strahlung ist nicht einheitlich, sondern enthält mindestens drei verschiedene Arten von Strahlen: Die α -Strahlen sind ein Analogon zu den Kanalstrahlen; wahrscheinlich bestehen sie aus positiv geladenen Helium-Atomen. Die β -Strahlen entsprechen im wesentlichen den Kathodenstrahlen; doch ist ihre Geschwindigkeit eine größere. Die γ -Strahlen verhalten sich ähnlich wie die Röntgenstrahlen, besitzen aber ein viel stärkeres Durchdringungsvermögen.

Zur Messung der Radioaktivität benutzt man die Eigenschaft der radioaktiven Strahlen, die Luft zu ionisieren [vgl. § 212].

§ 210. **Umwandlung der radioaktiven Stoffe.** Als Ursache für die Entstehung der erheblichen Energiemengen, die den radioaktiven Strahlungen und der dauernden Erwärmung des Radiums zugrunde liegen müssen, nimmt man jetzt allgemein einen Zerfall der Atome

der betreffenden Stoffe in einfachere Atome an, wobei auch die früher für unmöglich gehaltene Umwandlung eines Elementes in ein anderes stattfindet. Es besteht hier eine gewisse Ähnlichkeit mit den Verhältnissen bei der Explosion von Sprengstoffen, wo ebenfalls durch Sprengung der zusammengesetzten Moleküle die bis dahin potentielle Energie der Atome in stark wirkende kinetische Energie verwandelt wird; nur daß sich eben bei den radioaktiven Stoffen die Vorgänge nicht an Molekülen, sondern an Atomen abspielen.

So zerfällt z. B. ein Atom Radium in ein Atom Helium, das als α -Strahlung fortfliegt, und ein Atom Radium-Emanation. Die Emanation, ein gasförmiges Element (neuerdings Niton genannt), zerfällt wiederum einerseits in Helium (was man spektroskopisch direkt nachweisen kann), anderseits in Radium A. Aus diesem bilden sich schrittweise — jedesmal wieder durch Abspaltung von Helium (Aussendung von α -Strahlen) — neue radioaktive Stoffe, die der Reihe nach als Radium B—F bezeichnet werden. Radium F wird für identisch mit Polonium gehalten. Endprodukt des Umwandlungsprozesses soll schließlich das inaktive Blei sein. Radium selbst stammt wahrscheinlich wieder vom Uran ab. In analoger Weise zerfällt z. B. Thorium in Mesothor, Radiothor, Thor X, Thor-Emanation, Thor A, B, C, bis auch hier ein inaktives Endprodukt entsteht.

Die Umwandlungszeit ist für die verschiedenen Stoffe sehr verschieden; sie schwankt zwischen Sekunden und Tausenden, ja Millionen von Jahren. Aus praktischen Gründen gibt man gewöhnlich die sog. Halbwertszeit an, d. h. die Zeit, in der die radioaktive Wirkung des Stoffes bzw. die Zahl seiner Atome auf den halben Wert gesunken ist.

Die Halbwertszeit, die für jeden radioaktiven Stoff eine charakteristische Größe ist, beträgt z. B. für Radium 1730 Jahre, Radium-Emanation 4 Tage, Radium A 3 Minuten, Radium B 27 Minuten, Radium C 20 Minuten, Thor-Emanation 54 Sekunden, Aktinium-Emanation 4 Sekunden. Beim Uran wird sie auf ca. 5 Milliarden Jahre geschätzt.

§ 211. **Emanationen.** Bringt man einen Körper in die Nähe eines Radiumpräparates, so wird er, allerdings nur vorübergehend, ebenfalls radioaktiv. Diese Erscheinung, die man früher induzierte Radioaktivität nannte, beruht darauf, daß die vom Radium abgeschiedene gasförmige Emanation sich auf den Körper ausbreitet, wobei das aus ihr entstehende Radium A und seine Umwandlungsprodukte einen festen Überzug („aktiven Beschlag“) auf dem betr. Körper bilden. Man kann die Emanation dadurch nachweisen, daß man mit negativer Elektrizität geladene Drähte ausspannt und die sich auf ihnen entstandenen aktiven Beschläge mittels eines Lappens abwischt und sammelt, so daß ihre Wirkung auf ein Elektroskop usw. unter-

sucht werden kann. Auf diese Weise gelang es nachzuweisen, daß die Radium-Emanation fast überall vorkommt, auch in der Luft, in tiefen Schächten, in Thermalquellen usw. Wahrscheinlich stammt sie von bestimmten Bestandteilen des Erdbodens her. — Es gibt auch eine Thor- und eine Aktinium-Emanation, die analoge Eigenschaften besitzen.

§ 212. **Ionisation von Gasen.** Durch gewisse Einwirkungen (Kathoden-, Röntgen-, radioaktive Strahlen, ultraviolettes Licht, Flammengase usw.) können Gase, insbesondere auch Luft, die Fähigkeit bekommen, Elektrizität zu leiten. Zur Erklärung nimmt man an, daß die Gasmoleküle aus positiv und negativ elektrischen Teilchen zusammengesetzt sind, die sich unter gewöhnlichen Umständen neutralisieren. Durch die genannten Einwirkungen findet nun eine teilweise Zertrümmerung der Gasmoleküle statt, so daß negative Elektronen [§ 207] frei werden. Da somit das elektrische Gleichgewicht gestört ist, müssen die Restatome positiv elektrisch sein. Man nennt diese kleinsten Massenteilchen wieder (Gas-)Ionen, obwohl sie mit den Ionen der Elektrolyse [§ 185] nicht identisch sind, und unterscheidet nach dem Gesagten negative Elektron-Ionen und positive Atom-Ionen. Beide können wahrscheinlich noch weitere neutrale Moleküle an sich ziehen, so daß größere positive und negative Molekülgruppen, sog. Mol-Ionen entstehen. Zwar findet nach einiger Zeit eine spontane Wiedervereinigung der Ionen zu neutralen Molekülen statt. Bis dahin aber sind eben freie Ionen vorhanden, die wie bei der Elektrolyse unter dem Einflusse eines elektrischen Feldes „wandern“ können, wodurch ein Transport von Elektrizität, mit andern Worten Leitung der Elektrizität in dem betr. Medium stattfindet. Kommt nun z. B. ionisierte Luft in die Nähe eines geladenen Elektroskops, so werden von diesem die ungleichnamigen Ionen angezogen, welche seine Ladung neutralisieren. Das Elektroskop wird also unelektrisch; seine Ladung ist scheinbar durch die Luft fortgeleitet worden. Im Gegensatz zur Elektrolyse finden bei der Ionisation von Gasen keine chemischen Zersetzungen statt.

Die Größe der ionisierenden Kraft kann man z. B. dadurch messen, daß man ihren Einfluß auf die Entladungsgeschwindigkeit eines geladenen Elektroskops prüft, nachdem man diese vorher unter gewöhnlichen Umständen festgestellt hat. Auch kann man sich der Methode des Sättigungsstroms bedienen. Verbindet man z. B. zwei gegenüberstehende Metallplatten, zwischen denen sich Luft befindet, mit den Polen einer Batterie, so geht unter gewöhnlichen Verhältnissen zwischen ihnen kein Strom über. Ionisiert man jetzt die Luft zwischen den Platten, indem man z. B. Röntgenstrahlen hindurchgehen läßt, so entsteht zwischen ihnen ein Ionenstrom. Vergrößert man die elektromotorische Kraft der Stromquelle, z. B. durch Einschaltung neuer Elemente, so wächst die Stromstärke entsprechend dem OHMSchen Gesetz. Dies ist aber nur so lange der Fall, wie von den Röntgenstrahlen genügend Ionen erzeugt

⊕ ⊖ = Ionen

werden. Werden alle von den Röntgenstrahlen gebildeten Ionen für die Stromleitung in Anspruch genommen, so kann auch durch eine Vermehrung der elektromotorischen Kraft keine Vermehrung der Stromstärke mehr erreicht werden. Diese dann vorhandene maximale Stromstärke, die eben Sättigungsstrom heißt, ist also ein Maß für die ionisierende Kraft.

f. Elektrische Schwingungen.

§ 213. **Schwingungen im allgemeinen.** Unter Schwingungen oder Oszillationen versteht man durch einen Anstoß (Impuls) erzeugte periodisch hin- und hergehende Bewegungen, wie sie z. B. ein Pendel zeigt. Als Ergänzung zu dem in §§ 33 und 55ff. bereits Gesagten sei hier noch folgendes bemerkt: Bei jeder Schwingung eines materiellen Körpers kommen zwei Faktoren in Betracht: Die Kraft (k), welche den Anstoß zur Bewegung gibt, und die Masse (m) des Körpers, deren Trägheit oder Beharrungsvermögen der Bewegung entgegenwirkt. Diese beiden Faktoren bestimmen auch die Schnelligkeit der Schwingungen, d. h. die Schwingungszahl pro Sekunde, folglich auch ihren reziproken Wert, die Schwingungsdauer (T). Für letztere gilt die Formel $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Der mathematische Beweis dieser Formel soll hier nicht gegeben werden. Es ist aber ohne weiteres einleuchtend, daß die Schwingungsdauer mit der zu bewegenden Masse zunehmen, andererseits im umgekehrten Verhältnis zur Größe des Impulses stehen muß, was eben die Formel besagt. Erfolgen die Schwingungen dauernd mit der gleichen Amplitude [§ 57], so heißen sie ungedämpft. Wird aber die Schwingungsweite, wie in der Regel, allmählich kleiner, z. B. durch den Luftwiderstand oder infolge anderweitiger Abgabe von Energie nach außen, so spricht man von gedämpften Schwingungen.

Verbindet (oder „koppelt“) man nun zwei Pendel durch eine gespannte Schnur, wie in Fig. 180 dargestellt, und gibt dem Pendel A einen Impuls nach rechts, so wirkt er, wenn er wieder nach links schwingt, auf Pendel B ein und bringt es zum „Mitschwingen“. Eine Zeitlang bewegen sich dann beide Pendel zugleich, wobei die Schwingungen von B allmählich größer, die von A kleiner werden und schließlich aufhören. Nun bringt das allein schwingende Pendel B umgekehrt A zum Mitschwingen, und so setzt sich der Vorgang wechselseitig fort. Die gegenseitige Beeinflussung ist am stärksten, wenn beide Pendel möglichst gleiche Eigenschwingungen haben, anders ausgedrückt, wenn zwischen ihnen „Resonanz“ [§ 70] besteht. Aber auch in diesem Falle werden

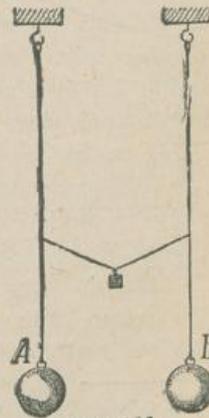


Fig. 180.

die Schwingungen jedes Pendels durch die des anderen gestört (gedämpft); es entstehen gewissermaßen „Schwebungen“ [§ 75]. Würde man dagegen, nachdem *B* durch *A* in maximale Schwingung versetzt ist, die Verbindungsschnur durchschneiden, so würde *B* mit viel geringerer Dämpfung weiter schwingen.

§ 214. **Elektrische Schwingungskreise.** Analog den mechanischen und akustischen gibt es auch elektrische Schwingungen. Als solche können z. B. alle Wechselströme gelten. Im engeren Sinne versteht man darunter aber nur die äußerst raschen Oszillationen, die in einer elektrischen Funkenstrecke entstehen [§ 168] und sich von hier aus teils in den Schwingungskreis teils in die umgebende Luft ausbreiten. Schwingungskreis nennt man jeden Leiter, der die Bahn elektrischer Schwingungen bildet; ein solcher Schwingungskreis kann wieder geschlossen (z. B. in Fig. 181) oder offen, d. h. unterbrochen¹ sein (z. B. in Fig. 183).

Auch bei den elektrischen Schwingungen kommt für die Entstehung und Dauer ein Kraftfaktor und ein Beharrungsfaktor in Betracht. Ersterer ist gegeben durch die elektromotorische Kraft bzw. die durch sie erzeugte Potentialdifferenz (*V*) an den Polen der Funkenstrecke; letzterer durch die Selbstinduktion (*L*), die ja als eine Art elektrischer Trägheit aufgefaßt werden kann [§ 200]. Es ist daher verständlich, daß für die Dauer einer elektrischen Schwingung in einem (geschlossenen) Schwingungskreis eine analoge Formel gilt, wie für die Dauer einer mechanischen Schwingung [§ 213], nämlich $T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$, wobei zu berücksichtigen ist, daß *V* bei gleicher Elektrizitätsmenge umgekehrt proportional der Kapazität *C* ist [§ 161]. Diese sog. THOMSONSche Schwingungsformel ist sehr wichtig, da man mit ihrer Hilfe durch Regulierung der Kapazität und Selbstinduktion² in einem Schwingungskreis die Dauer der Schwingungen, somit auch die davon abhängige Länge der elektrischen Wellen beliebig verändern kann.

Wie man nun die Schwingungen eines Pendels auf einen andern mit ihm mechanisch gekoppelten übertragen kann, so kann man auch durch Koppelung zweier elektrischer Schwingungskreise erreichen, daß die im ersten erzeugten Schwingungen auch im zweiten auftreten. Und zwar kann der zweite Schwingungskreis mit dem ersten durch direkte metallische Leitung verbunden werden (elektrische oder

¹ Das Dielektricum eines eingeschalteten Kondensators gilt nicht als Unterbrechung in diesem Sinne. — ² Mit „Kapazität“ und „Selbstinduktion“ bezeichnet man in der Praxis oft einen „Leiter (Kondensator) mit bestimmter Kapazität“ bzw. einen „Leiter mit bestimmter Selbstinduktion“. Als Kapazität benutzt man gewöhnlich Leidener Flaschen, als Selbstinduktion Spulen; doch besitzen auch gerade Leiter Selbstinduktion [§ 200].

galvanische Koppelung, z. B. in Fig. 184); oder aber man verbindet den ersten Schwingungskreis mit der primären, den zweiten mit der sekundären Spule eines Transformators (elektromagnetische oder induktive Koppelung, z. B. in Fig. 185). Genau wie beim Pendel tritt dann auch hier ein Mitschwingen des zweiten Kreises bei Erregung des ersten ein. Und dieses Mitschwingen ist ebenfalls am stärksten, wenn Resonanz besteht, d. h. wenn die Eigenschwingungen des zweiten Schwingungskreises den in ihn hineingesandten Schwingungen genau entsprechen. Eine solche Resonanz kann man aber durch Regulierung der Kapazität bzw. Selbstinduktion nach der THOMSONSchen Formel unschwer erreichen („Abstimmung“).

Besteht der zweite Schwingungskreis aus einer Spule oder einem geraden Draht, der mit dem primären Kreise nur einseitig verbunden ist, während er auf der anderen Seite frei endigt, so werden die elektrischen Schwingungen am freien Ende reflektiert, und es entstehen, analog den Vorgängen in Pfeifen [§ 69], stehende Schwingungen. Die Wirkung derselben wird an den Stellen des Drahtes am größten sein, wo sich ein Schwingungsbauch befindet. Will man also am freien Ende des zweiten Schwingungskreises besonders kräftige Wirkungen erzielen, so wird man durch Regulierung der Kapazität bzw. Selbstinduktion dafür sorgen, daß hier gerade ein Schwingungsbauch ist.

Um im zweiten Schwingungskreise möglichst wenig gedämpfte Schwingungen zu erhalten, ist es analog wie beim Pendelversuch [§ 213] erforderlich, den störenden Einfluß der Schwingungen des ersten Schwingungskreises auszuschalten, nachdem eine kräftige Erregung des zweiten Kreises stattgefunden hat. Man erreicht das am besten mittels der von WIEN entdeckten Löschfunken. Das sind kleinste, zwischen sehr nahe stehenden Kupferscheiben übergehende Fünkchen, die im Gegensatz zu den gewöhnlichen Funken schon nach 1—2 Oszillationen erlöschen, da infolge der guten Wärmeableitung durch die Kupferplatten die Luft zwischen diesen rasch abgekühlt wird und somit den Funkenstrom nicht mehr leitet. Da solche Funken den zweiten Schwingungskreis nur durch einen kurzen Anstoß erregen, spricht man auch von Stoßfunken bzw. Stoßerregung. Derartige Löschfunken sind aber auch noch in einer anderen Hinsicht von großer Bedeutung; man kann nämlich mit ihrer Hilfe auf diese Weise eine sehr hohe Zahl von Funkenentladungen pro Sekunde erhalten [vgl. § 215].

§ 215. Hochfrequenzströme. Läßt man die oszillierenden Funkenentladungen von Leidener Flaschen, die ihrerseits von einem Funkeninduktor gespeist werden, durch die Primärspule eines Transformators gehen, so entstehen in dieser Hochfrequenzströme, d. h. Wechselströme, deren Wechselzahl einige Hunderttausend bis eine Million pro Sekunde und darüber beträgt. (Die Wechselzahl ist doppelt so groß wie die Zahl der Funkenoszillationen.) Verbindet man mit der primären

noch eine sekundäre Spule, die mehr Windungen besitzt, so werden diese hochfrequenten Ströme infolge des enorm raschen und plötzlichen Wechsels im primären Stromkreis noch auf eine außerordentlich hohe

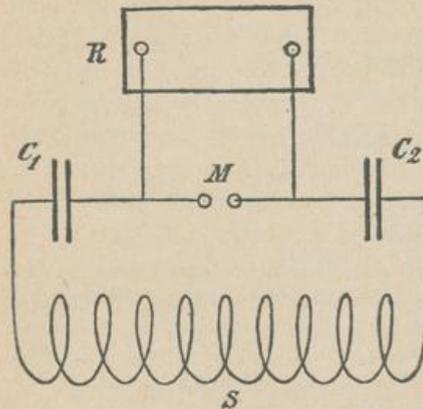


Fig. 181.

Spannung (mehrere hunderttausend Volt) gebracht [§ 199]. Man nennt solche „Ströme hoher Wechselzahl und Spannung“ auch nach den beiden Forschern, die sie unabhängig voneinander entdeckten, TESLA- oder D'ARSONVAL-Ströme. Fig. 181 zeigt schematisch die Anordnung eines zu ihrer Erzeugung dienenden Apparates. *R* bedeutet hier Induktor, *C*₁ und *C*₂ Leidener Flaschen, *M* Funkenstrecke, *S* Primärspule des Transformators. Die (hier nicht gezeichnete) Sekundärspule

kann mit der primären induktiv gekoppelt sein; sie kann aber auch an einen Pol der letzteren direkt angeschlossen werden (ODDINSCHER Resonator).

Von den merkwürdigen Wirkungen solcher Hochfrequenzströme sei hier nur kurz folgendes erwähnt: Schaltet man z. B. ohne Anwendung der Sekundärspule in den Stromkreis einen Kupferbügel, zwischen dessen Schenkel eine kleine Glühlampe an dünnem Drahte befestigt ist (Fig. 182), so leuchtet die

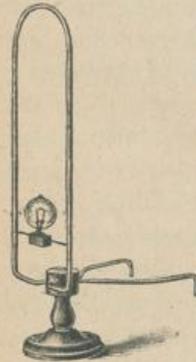


Fig. 182.

Lampe auf, was bei Anwendung von Gleichstrom nicht der Fall wäre; denn dieser würde wegen des viel kleineren Widerstandes des Kupferbügels fast ausschließlich durch diesen gehen. Hochfrequenzströme mit ihrer hohen Wechselzahl bleiben dagegen nur an der Oberfläche des Leiters, da sie in das Innere wegen der dort sehr erheblichen Selbstinduktion und dadurch bedingten starken Vermehrung des scheinbaren Widerstandes (der sog. Impedanz) nicht eindringen können. Für sie kommt daher nicht das Material eines Leiters, sondern nur sein von der Länge abhängiger Oberflächenwiderstand in Betracht; deshalb wählen sie eben den kürzeren Weg über die Glühlampe. — Schaltet man die Sekundärspule ein, so erhält man an ihrem freien Pole intensive Büschelausstrahlungen, namentlich wenn gute Resonanz besteht [§ 214]. — Merkwürdig ist auch, daß Geißleröhren schon in der Nähe eines Teslators, ohne direkte Verbindung mit ihm, aufleuchten,

namentlich wenn man sie zwischen zwei mit den Polen der Sekundärspule verbundene Metallschirme bringt (TESLA'S „Licht der Zukunft“). — Trotz ihrer hohen Spannung sind solche Teslaströme für den menschlichen Körper ganz ungefährlich, da sie wegen ihrer hohen Wechselzahl und geringen Stromstärke (einige hundert Milliampère) nur minimale elektrochemische Wirkungen

verursachen. Sie werden sogar zur Behandlung („Arsonvalisation“) gewisser Krankheiten benutzt.

Ebenfalls hochfrequente Ströme, aber von weit niedrigerer Spannung (bis zu einigen Hundert Volt), andererseits von größerer Stromstärke (2—3 Ampère) benutzt man zur Diathermiebehandlung, deren Wesen darin besteht, daß innerhalb des menschlichen Körpers selbst erhebliche Mengen JOULEScher Wärme erzeugt werden. Gleichströme und Wechselströme niedriger Wechselzahl können hierzu nicht benutzt werden, da sie viel zu starke, ev. tödliche Reizwirkungen verursachen würden. Aber auch noch gewöhnliche Hochfrequenzströme würden unangenehme Erscheinungen machen, wenn ihre Stromstärke so stark wäre, wie es zur Erzielung wirksamer Stromwärme erforderlich ist. Um solche Nebenwirkungen ganz zu vermeiden, sind Schwingungen erforderlich, die möglichst zahlreich pro Sekunde und möglichst kontinuierlich erfolgen; solche Schwingungen erhält man mittels der Löschfunken [§ 214].

Wenn oben gesagt wurde, daß die mittels gewöhnlicher Funkenstrecke erzeugten Hochfrequenzströme eine Wechselzahl von ca. 1 Million haben, so ist das insofern richtig, da jede Oszillation ca. 1 Milliontel Sekunde dauert. Es ist aber ergänzend hinzuzufügen, daß solche rasche Oszillationen keineswegs kontinuierlich vorhanden sind. Ein gewöhnlicher elektrischer Funke besteht nämlich aus ca. 15—20 gedämpften Oszillationen, die zusammen etwa $\frac{1}{50000}$ Sekunde dauern. Da man nun höchstens 100 derartige Funken pro Sekunde erzeugen kann, so entsteht nach jedem Funken eine Pause, die 500mal länger ist als die Wirkungszeit. Tatsächlich sind also hier nur etwa 100×20 , also ca. 2000 Oszillationen in der Sekunde vorhanden. Bei Anwendung von Löschfunken kann man dagegen pro Sekunde bis zu 20000 Funken erzielen, von deren jedem wieder ein Zug stark gedämpfter Schwingungen ausgeht, so daß die Pausen hier ganz erheblich kürzer sind.

§ 216. **Elektrische Wellen. Hertz'sche Versuche.** Von der Funkenstrecke bzw. vom freien Ende eines Schwingungskreises breiten sich die elektrischen Schwingungen in die umgebende Luft in Form von elektrischen Wellen aus¹. Diese elektrischen Wellen gehen nur durch Dielektrica, nicht durch Metalle hindurch und sind den Lichtwellen vollkommen analog. Wie diese sind sie also ebenfalls an den Äther als Substrat gebunden und gehorchen auch den gleichen Gesetzen der Reflexion, Brechung, Interferenz und Polarisation; auch haben sie dieselbe Geschwindigkeit, nämlich $v = 300000$ km pro Sekunde. Sie unterscheiden sich von den Lichtwellen nur quantitativ, in dem ihre Länge erheblich größer, ihre Schwingungszahl somit, entsprechend der Formel $v = n \lambda$ [§ 61], erheblich kleiner ist.

¹ Gleichzeitig mit den elektrischen Schwingungen, aber senkrecht zu ihnen, breiten sich übrigens auch magnetische Schwingungen aus.

Diese wichtigen Tatsachen wurden durch die genialen Versuche von HERTZ (1888) festgestellt, nachdem bereits vorher FARADAY und namentlich MAXWELL ihre Theorie entwickelt hatten. Da gewöhnliche elektrische Wellen für Laboratoriumsversuche viel zu groß sind (wenn von einer Funkenstrecke 1 Million Schwingungen pro Sekunde ausgehen, entstehen nach der Formel $v = n \lambda$ Wellen von 300 m Länge), so kam es darauf an, möglichst kleine elektrische Wellen zu erzeugen. Nach der eben angeführten Formel muß man also die Zahl der Schwingungen (n) in der Funkenstrecke möglichst groß oder, was ja dasselbe ist, die Dauer der einzelnen Schwingungen (T) möglichst klein machen. Nach der THOMSONSchen Schwingungsformel tritt dies aber ein, wenn Kapazität bzw. Selbstinduktion möglichst klein sind. Demgemäß benutzte HERTZ als Wellensender („Oszillator“, O , Fig. 183) einen

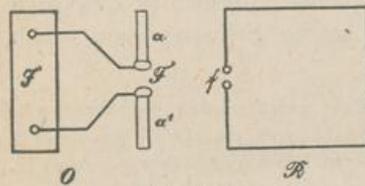


Fig. 183.

Schwingungskreis mit kleiner geradliniger Entladungsbahn und mit kleiner Kapazität (statt Kondensatoren z. B. zwei kleine Metallzylinder a und a'). Auf diese Weise konnte HERTZ Wellen bis zu 60 cm Länge erzeugen. (Heute kann man Wellen bis zu 2 mm herstellen, während die

obere Grenze bis zu mehreren Tausend Metern reicht). Wenn nun die von der Funkenstrecke F des Induktors J ausgehenden elektrischen Wellen auf den Resonator R treffen, so bewirken sie, daß in dessen Funkenstrecke f ebenfalls kleine Fünkchen übergehen, deren Stärke von der Stellung des Resonators zum Oszillator, von seiner Entfernung und von seiner Resonanz abhängt. Mit diesem einfachen Apparate konnte also HERTZ die genannten Eigenschaften der elektrischen Wellen nachweisen.

§ 217. **Funkentelegraphie.** Die praktische Verwertung der HERTZ'schen Laboratoriumsversuche ist in erster Linie den zielbewußten Arbeiten MARCONIs (seit 1895) zu verdanken, der dadurch zum Begründer der Funkentelegraphie (weniger gut auch „Telegraphie ohne Draht“ genannt) geworden ist. Einen weiteren Ausbau hat dieselbe durch die wichtigen Arbeiten von BRAUN, SLABY, Graf ARCO, WIEN u. a. erfahren. Hier können nur einige wichtige Punkte kurz skizziert werden. Schon MARCONI fand, daß die Aussendung elektrischer Wellen wesentlich dadurch gefördert wird, wenn man von der Funkenstrecke aus einen langen Draht (sog. Antenne) aufwärts in die Luft führt, während man die andere Seite erdet; heute verwendet man ganze Systeme von Drähten, die durch Masten gestützt werden. Bald erkannte man auch, daß es nicht ausschließlich auf die Länge der Antennen ankommt, wie man zuerst geglaubt hatte, sondern auf

ihr richtiges Verhältnis zu den auf ihr sich bildenden stehenden elektrischen Schwingungen [vgl. § 214]. Eine gleiche Antenne ist auch auf der Empfangsstation mit dem Schwingungskreis verbunden, der aber statt der Funkenstrecke einen Detektor besitzt (s. u.). Die Apparate der Aufgabe- und der Empfangsstation müssen gegenseitig wie auch in ihren einzelnen Teilen gut abgestimmt sein. Wirklich brauchbar konnte die Funkentelegraphie aber erst durch die Erfindung wirksamer Wellenanzeiger (Detektoren¹) werden, da der primitive HERTZsche Resonator [§ 216] für die Zwecke der Praxis ganz unzureichend war.

Der erste brauchbare Wellenanzeiger war der von BRANLY 1890 erfundene Kohärer² oder Fritter. Es ist dies eine mit Metallspänen gefüllte Glasröhre, die mittels zweier Elektroden in einen Stromkreis eingeschaltet wird, der eine eigene Stromquelle besitzt. In diesem besteht unter gewöhnlichen Verhält-

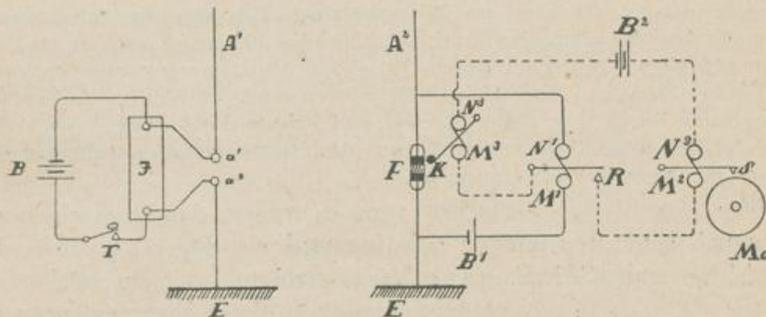


Fig. 184.

nissen kein Strom, da der Kohärer einen zu großen Widerstand bildet. Sobald jedoch elektrische Wellen auf den Kohärer treffen, verringert sich sein Leitungswiderstand, indem die Metallteilchen (vielleicht durch kleine unsichtbare Funken zusammengeschweißt) kohärenter werden. Der nun entstehende Strom zeigt sich z. B. durch Ertönen einer in den Stromkreis eingeschalteten elektrischen Klingel an und dauert so lange, bis der Zusammenhang der Metallteilchen wieder mechanisch gelockert ist, was z. B. automatisch durch einen mit einem WAGNERschen Hammer verbundenen Klöppel erfolgen kann.

Fig. 184 zeigt schematisch die erste MARCONI-Schaltung. Wird der Morsetaster *T* heruntergedrückt, so wird der von der Batterie *B* gespeiste Primärkreis des Induktors *I* geschlossen, und während dieser Zeit erfolgt in der mit dem Sekundärkreis des Induktors verbundenen Funkenstrecke a^1a^2 ein Übergang von Funken, deren Oszillationen sich auf die Antenne A^1 fortsetzen, wo sie stehende Schwingungen bilden. Von der Spitze der Antenne gehen dann, namentlich wenn hier ein Schwingungsbauch ist, kräftige elektrische Wellen in die Luft, die sich auch auf der Empfangsantenne A^2 ausbreiten und hier

¹ *detego* aufdecken. — ² *cohaereo* zusammenhängen.

den Fritter F leitend machen, so daß im Stromkreis der Batterie B^1 jetzt ein elektrischer Strom entsteht. Dadurch wird der Elektromagnet M^1N^1 wirksam und zieht seinen Anker an, der bei R einen zweiten (gestrichelt gezeichneten) Stromkreis mit besonderer Stromquelle B^2 schließt. Hierdurch wird auch der Elektromagnet M^2N^2 wirksam und betätigt den Morseschreibapparat SMo . Zugleich zieht aber auch der Elektromagnet M^2N^2 seinen Anker an, und hierdurch schlägt der Klöppel K gegen den Fritter und macht ihn wieder leitungsunfähig, so daß weiter ankommende elektrische Wellen von neuem auf den Morseschreiber wirken können.

Heute ist der Fritter in der Praxis durch andere Detektoren vollkommen verdrängt worden. Am wichtigsten sind die Kontaktdetektoren, bei denen eine Metall- oder Graphitspitze ein Mineralplättchen (z. B. Bleiglanz) berührt. Sie lassen die elektrischen Schwingungen im wesentlichen nur in einer Richtung durch, formen also den hochfrequenten Wechselstrom in unterbrochenen Gleichstrom um, der in einem eingeschalteten Telephon ein Geräusch bzw. einen Ton hervorbringt. Diese Detektoren unterscheiden sich vom Fritter dadurch, daß sie keiner Hilfsbatterie bedürfen und auch die Wirkung der auf sie treffenden Wellen summieren. Erzeugt man also auf der Geberstation n Funken pro Sekunde, so hört man im Telephon einen Ton von der Schwingungszahl n (System der „tönenden Funken“). Man hat hier somit auch in der Höhe der im Telephon erzeugten Töne ein Mittel zur Abstimmung zweier Stationen. Die Übermittlung von Buchstaben und Worten erfolgt wieder so, daß auf der Geberstation durch den Taster kürzere und längere Funkenreihen nach dem Morsealphabet ausgelöst werden, die auf der Empfangsstation entsprechende kürzere und längere Töne erzeugen.

Ein wesentlicher Fortschritt war es ferner, daß BRAUN den ursprünglich benutzten offenen Schwingungskreis (Fig. 184) durch den geschlossenen Schwingungskreis ersetzte, weil ein solcher die

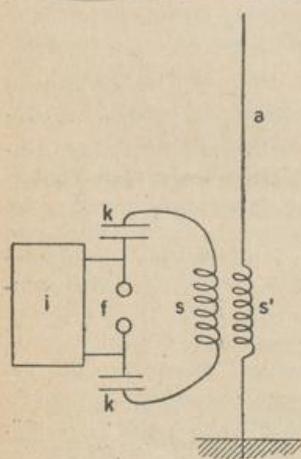


Fig. 185.

Aufspeicherung größerer Energiemengen gestattet und gegen störende Einwirkungen seitens der Antenne besser geschützt ist. Mit diesem geschlossenen Schwingungskreis ist dann die Antenne galvanisch oder aber induktiv (Fig. 185) gekoppelt. Die Aufgabe-station besteht hier also aus dem geschlossenen Erregerkreis und dem damit gekoppelten Senderkreis; die Empfangsstation analog aus dem Empfängerkreis und dem damit gekoppelten Detektorkreis. Schließlich sei noch die Anwendung der Löschfunken bei der Funkentelegraphie erwähnt. Sie bewirken einmal durch Stoßerregung [§ 214], daß auf der Antenne nur ganz schwach gedämpfte Schwingungen entstehen; ferner

ist es der bei ihnen möglichen raschen Funkenfolge [§ 215] zu verdanken, daß im Telephon der Empfangsstation musikalische Töne, nicht nur Geräusche, entstehen. — Durch diese und noch andere

sinnreiche Verbesserungen, auf die nicht näher eingegangen werden kann, lassen sich jetzt durch Funkentelegraphie Nachrichten auf 8000 km und darüber hinaus übermitteln.

§ 218. **Licht und Elektrizität.** Zwischen Licht und Elektrizität bestehen eine Reihe interessanter Beziehungen. So wird z. B. die Ebene polarisierten Lichtes in durchsichtigen Dielektrica, die sich in einem magnetischen Felde befinden (FARADAY), sowie bei Reflexion an polierten Endflächen von Magneten (KERR) gedreht. Auch erleiden die Spektrallinien durch Einwirkung eines starken magnetischen Feldes eine Veränderung, die in Zwei- oder Dreiteilung usw. besteht (ZEMMANN'Sches Phänomen). Ferner werden stark elektrisierte Dielektrica doppelbrechend (KERR). Umgekehrt gibt es auch Wirkungen des Lichts auf Elektrizität. So wird z. B. der Leitungswiderstand des Selens durch Belichtung verringert, und ultraviolette Strahlen besitzen die Fähigkeit, die Luft zu ionisieren [§ 212], wodurch z. B. eine größere Schlagweite elektrischer Funken erzielt werden kann. Sehr bemerkenswert ist ferner, daß der Quotient aus der elektromagnetischen und der elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge der Lichtgeschwindigkeit entspricht [vgl. § 219]. Vor allem ist aber durch die HERTZschen Versuche der direkte Nachweis elektrischer Wellen erbracht und gezeigt worden, daß diese sich genau analog den Lichtwellen verhalten [§ 216].

Auf Grund dieser und noch anderer Tatsachen und Erwägungen ist die von MAXWELL 1865 (also bereits vor den HERTZschen Versuchen) aufgestellte und später von anderen erweiterte elektromagnetische Lichttheorie jetzt ziemlich allgemein angenommen. Hiernach beruht die Fortpflanzung des Lichtes auf Ausbreitung elektrischer bzw. magnetischer Wellen im Äther, die ihrerseits nach den neuesten Anschauungen durch Schwingungen von Elektronen [§ 212] in den leuchtenden Körpern erzeugt werden. Diese Elektronenschwingungen, die durch die hohe Temperatur oder elektrische Einflüsse zustande kommen sollen, wären demnach die eigentliche Ursache der Lichtausstrahlung.

§ 219. **Zusammenstellung der wichtigsten elektrischen Maße.** Man unterscheidet zwei absolute elektrische Maßsysteme [§ 5]. Je nachdem man nämlich die Elektrizität im Zustande der Ruhe betrachtet oder aber von ihren magnetischen Wirkungen ausgeht, erhält man die elektrostatischen oder aber die elektromagnetischen Maße, von denen hauptsächlich die letzteren in Gebrauch sind.

Die elektrostatischen Maße kann man alle ableiten von der elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge, deren Definition und Dimension

in § 158 angegeben ist. Hieraus erhält man ohne weiteres die Dimension von Potentialen und Potentialdifferenzen (somit auch der elektromotorischen Kraft) nach der Formel $V = \frac{e}{r}$ [§ 160]; die der Kapazität nach der Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ [§ 161]; die der Stromstärke nach der Formel $I = \frac{e}{t}$ [§ 174]; die des Widerstandes nach der Formel $W = \frac{E}{I}$ [§ 176]. Die Resultate der einfachen Rechnungen sind in der zweiten Spalte der unten folgenden Tabelle angeführt.

Die elektromagnetischen Maße lassen sich von der elektromagnetischen Einheit der Stromstärke ableiten, deren Definition und Dimension in § 191 angegeben sind. Hieraus erhält man durch einfache Rechnung die Dimension der Elektrizitätsmenge aus der Formel $I = \frac{e}{t}$ [§ 174], woraus $e = I \cdot t$ folgt; die der elektromotorischen Kraft (bzw. von Potentialen und Potentialdifferenzen) aus der Formel $E = \frac{\text{Effekt}}{\text{Intensität}}$ [§ 179]; die des Widerstandes aus der Formel $W = \frac{E}{I}$ [§ 176], die der Kapazität aus der Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ [§ 161]. Die betreffenden Dimensionen sind in der dritten Spalte der unten stehenden Tabelle angegeben.

Da die absoluten Einheiten für die Praxis teils zu klein, teils zu groß sind, hat man noch ein praktisches Maßsystem eingeführt, dessen Einheiten Vielfache bzw. Bruchteile der betreffenden absoluten Einheiten bilden [vgl. auch Seite 2, Anm. 3]. Es sind dies 1 Coulomb für die Elektrizitätsmenge [§ 158], 1 Volt für elektromotorische Kräfte (Potentiale, Potentialdifferenzen) [§§ 160, 173], 1 Ampère für die Stromstärke [§ 174], 1 Ohm für den Widerstand [§ 175], 1 Farad für die Kapazität [§ 161]. Diese praktischen Einheiten, von denen das Ampère und Ohm auch direkt festgelegt sind [§§ 174, 175], sind so beschaffen, daß zwischen ihnen folgende Beziehungen bestehen: 1 Ampère = $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$ [§ 176]. Folglich auch 1 Volt = 1 Ampère \times 1 Ohm, und 1 Ohm = $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampère}}$. Ferner 1 Ampère = $\frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Sekunde}}$ [§ 174], und 1 Coulomb = 1 Ampèresekunde. 1 Farad = $\frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}$ [§ 161]. 1 Volt-Coulomb = 1 Joule [§ 179]. 1 Volt-Ampère = 1 Watt [§ 179].

In der folgenden Tabelle sind die in Betracht kommenden Größen nochmals übersichtlich zusammengestellt.

Größenart	Elektro- statische Dimension	Elektro- magnetische Dimension	Quotient beider	Praktische Einheiten und ihr Wert in absoluten elektromagnetischen Einheiten
Elektrizitätsmenge	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$	$m^{1/2} l^{1/2}$	$\frac{l}{t} = v$	1 Coulomb = 10^{-1} e.-m. E.
Potential(differenz) u. elektromot. Kraft	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-2}$	$\frac{t}{l} = \frac{1}{v}$	1 Volt = 10^8
Stromstärke	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$	$m^{1/2} l^{1/2} t^{-1}$	$\frac{l}{t} = v$	1 Ampère = 10^{-1}
Kapazität	l	$t^{-1} l^2$	$\left(\frac{l}{t}\right)^2 = v^2$	1 Farad = 10^{-9}
Widerstand	$t^{-1} l$	$l t^{-1}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 = \frac{1}{v^2}$	1 Ohm = 10^9

Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, unterscheiden sich die beiden absoluten elektrischen Maßsysteme durch eine Größe, die einer Geschwindigkeit bzw. einer Potenz derselben entspricht. Diese sog. kritische Geschwindigkeit ist nun, wie viele Messungen ergaben, nahezu gleich der Lichtgeschwindigkeit [vgl. § 218]. Es ist also $v = 300.000 \text{ km pro Sekunde} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm sec}^{-1}$.

Man kann mit Hilfe obiger Tabelle sofort elektrostatische Maße durch elektromagnetische ausdrücken und umgekehrt, wenn man berücksichtigt, daß sich ja die Einheiten einer Größenart in beiden Maßsystemen umgekehrt wie die betreffenden Dimensionen verhalten müssen. So ist z. B. die Dimension der Elektrizitätsmenge im elektrostatischen Maßsystem um $v = 3 \cdot 10^{10}$ mal größer als im elektromagnetischen, folglich die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge um ebensoviel kleiner als die elektromagnetische. D. h. also, die elektromagnetische Einheit der Elektrizitätsmenge entspricht $3 \cdot 10^{10}$ oder 30 Milliarden, und 1 Coulomb $3 \cdot 10^9$ oder 3 Milliarden elektrostatischen Einheiten. In analoger Weise findet man mittels der Tabelle auch den Wert der praktischen Einheiten in elektrostatischen Einheiten. So ist z. B. 1 Volt = $\frac{10^8}{3 \cdot 10^{10}} = \frac{1}{300}$ elektrostatischen Einheiten, oder, anders ausgedrückt, die elektrostatische Einheit des Potentials ist = 300 Volt.

Anhang: Die wichtigsten Definitionen, Gesetze und Formeln.

- Atome? Die denkbar kleinsten Stoffteilchen, unsichtbar, nicht allein existierend.
- Moleküle? Komplexe gleichartiger (bei Elementen) oder verschiedenartiger Atome.
- Aggregatzustände? Fester, flüssiger, gasförmiger Zustand.
- Volumen? Rauminhalt; Raum, den ein Körper einnimmt.
- Dichte? Masse pro Volumen. $D = M : V$.
- Masseneinheit? Massengramm, d. h. Masse eines Kubikzentimeters Wasser von 4°.
- Absolute Maße? Maße, welche eine Größe durch die Einheiten der Länge, Masse, Zeit ausdrücken.
- Bewegungsgesetze? 1. Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern. (Trägheitsgesetz.) 2. Die Änderung der Bewegung ist proportional der einwirkenden Kraft und erfolgt geradlinig zu dieser. (Unabhängigkeitsprinzip.) 3. Wirkung und Gegenwirkung sind gleich. (Wechselwirkungsprinzip.)
- Geschwindigkeit? Weg bezogen auf Zeit, $v = s : t$.
- Beschleunigung? Geschwindigkeitszunahme in der Zeiteinheit. $a = v : t$.
- Bewegungsgröße? Masse mal Geschwindigkeit, $m \cdot v$.
- Kraft? Masse mal Beschleunigung. $F = m \cdot v : t$.
- Krafteinheit? 1 Kilogramm oder Gramm(-gewicht), bzw. 1 Dyne.
- Gewicht? Masse mal Beschleunigung durch Erdanziehung. $P = m \cdot g$.
- Gravitationsgesetz? $F = k \cdot M \cdot m : r^2$.
- Arbeit? Kraft mal Weg. $A = F \cdot s$.
- Arbeitseinheit? 1 Meterkilogramm, bzw. 1 Erg und 1 Joule.
- Effekt? Arbeit in der Zeiteinheit.
- Effekteinheit? 1 Pferdekraft (= 75 Meterkilogramm pro Sekunde), bzw. 1 Sekundenerg und 1 Watt.
- Energie? Fähigkeit, Arbeit zu leisten.
- Kinetische Energie? Arbeitsfähigkeit eines bewegten Körpers. $\frac{1}{2}mv^2$. (Syn. Wucht, lebendige Kraft.)

- Potentielle Energie?** Die in einem ruhenden Körper aufgespeicherte Energie. mgh . Syn. Energie der Lage, Spannkraft.
- Gesetz von der Erhaltung der Energie?** In einem abgeschlossenen System ist die Summe der kinetischen und potentiellen Energie konstant.
- Parallelogramm der Kräfte?** Resultante zweier Kräfte = Diagonale des Parallelogramms, zu dem sich die Komponenten ergänzen lassen.
- Kräftepaar?** 2 gleich große parallele, entgegengesetzt gerichtete Kräfte.
- Beschleunigung durch die Schwerkraft?** $g = 981 \text{ cm sec.}^{-2}$.
- Schwerpunkt?** Angriffspunkt aller parallelen anziehenden Kräfte der Erde in einem Körper.
- Gleichgewicht?** 1) Indifferentes oder neutrales: Schwerpunkt im Unterstützungspunkt oder stets senkrecht darüber. Bei Verschiebung bleibt der Körper in der neuen Lage. 2) Stabiles: Schwerpunkt unter dem Unterstützungspunkte. Bei Verschiebung kehrt der Körper in die alte Lage zurück. 3) Labiles: Schwerpunkt über dem Unterstützungspunkt. Bei Verschiebung geht der Körper in ein stabiles Gleichgewicht über.
- Maschinensatz?** Kraft: Last = Weg der Last: Weg der Kraft. Ohne Energiezufuhr von außen kann eine Maschine nie selbsttätig Arbeit erzeugen. (Perpetuum mobile unmöglich).
- Rolle?** Feste: Ändert nur Richtung der Kraft, vermindert Reibung. Kraft = Last.
Bewegliche: Kraft = halbe Last.
- Faschenzug?** Gewöhnlicher Fl.: Kraft = sovielter Teil der Last, wie (feste und bewegliche) Rollen vorhanden. Potenz-Fl.: Kraft = Last dividiert durch die sovielte Potenz von 2, wie bewegliche Rollen vorhanden.
- Wellrad?** Kraft: Last = Radius der Welle: Radius des Rades.
- Schiefe Ebene?** Kraft: Last = Höhe der schiefen Ebene: Länge (bzw. Basis) derselben.
- Schraube?** Kraft: Last = Ganghöhe: Umfang der Schraube.
- Hebel?** Mathematischer: Linie, die sich um einen Punkt dreht. Physischer: Um feste Achse drehbare Stange, an der Kräfte angreifen.
- Hebelgleichgewicht?** Wenn Kraft und Last sich umgekehrt wie ihre Hebelarme verhalten. Oder: Wenn die Momente der angreifenden Kräfte gleich sind. (Moment = Produkt aus Kraft mit ihrem Kraftarm.)
- Wage?** Muß stabil, richtig, empfindlich sein. (Empfindlichkeit = Ausschlag bei Mehrbelastung durch 1 mg.)
- Brückenwage?** Wagschale für die Last (Brücke) verschiebt sich stets parallel mit sich selbst.
- Fallgesetze?** 1) $v = gt$. 2) $v = \sqrt{2gh}$. 3) $h = \frac{1}{2}gt^2$.
- Fall über die schiefe Ebene?** Endgeschwindigkeit unabhängig von der Neigung der schiefen Ebene.
- Wurfbewegung?** Beim Wurf senkrecht aufwärts ist die Steigzeit $t = c : g$, die Wurfhöhe $h = c^2 : 2g$. Fallzeit = Steigzeit.
- Winkelgeschwindigkeit?** Winkel, der in gegebener Zeit vom Radius beschrieben wird. $v = \omega r$.
 $\omega = v : r$.
- Trägheitsmoment?** Σmr^2 . *Sehr wichtig! Herleitung von Drehkraftverhältnissen!*
- Zentripetalkraft:** $K = mv^2 : r$. Gleichgroß ist die Zentrifugalkraft.
- Keplers Gesetze?** 1) Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. 2) Die Radii vectores beschreiben in gleichen Zeiten gleiche Flächen. 3) Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Kuben der großen Bahnachsen.
- Pendel?** Körper, der um eine horizontale Achse schwingen kann. 1) Die Intensität der Pendelschwingung ist direkt proportional der Schwingungsweite. 2) Die Schwingungszeit ist unabhängig von der Schwingungsweite (unter 5°), sowie vom Gewicht und der Substanz des Pendels, dagegen proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge, umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Beschleunigung durch die Erdanziehung. $T = 2\pi\sqrt{l : g}$.
- Reduzierte Pendellänge?** Länge desjenigen mathematischen Pendels, das genau so schwingt wie das betreffende physische.
- Schwingungspunkt?** Punkt, der um die reduzierte Pendellänge von der Drehachse entfernt ist.
- Elastizität?** Eigenschaft, nach Formveränderung die ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen. Auch: Widerstand gegen Form- bzw. Volumsveränderung.
- Elastizitätsmodul?** Gewicht, das nötig ist, um einen Stab von 1 qmm Durchmesser um die eigene Länge zu dehnen. Mißt die Größe der Elastizität.
- Elastizitätskoeffizient?** Gibt an, um wieviel ein Stab von 1 m Länge und 1 qmm Durchmesser durch 1 kg gedehnt wird. Mißt die Dehnbarkeit.
- Hydrostatischer Druck?** Druck einer Flüssigkeit auf die Flächeneinheit.
- Hydrostatisches Paradoxon?** Der hydrostatische Druck hängt für dieselbe Flüssigkeit nur von der Größe der Grundfläche und der Höhe der Flüssigkeitssäule, nicht von der Form des Gefäßes ab.

Kommunizierende Röhren? Dieselbe Flüssigkeit steht in beiden Röhren unabhängig von deren Form gleich hoch.

Torricellis Theorem? Ausflußgeschwindigkeit einer Flüssigkeit $v = \sqrt{2gh}$.

Archimedisches Prinzip? Jeder Körper erfährt in einer Flüssigkeit scheinbar einen Gewichtsverlust, in Wirklichkeit einen Auftrieb, der dem Gewichte der vom Körper verdrängten Flüssigkeit entspricht.

Spezifisches Gewicht? Verhältnis des Gewichtes eines Körpers zum Gewicht des gleichen Volums Wasser von 4°. Oder: Verhältnis zwischen Gewicht und Volumen eines Körpers.

Kohäsion? Die anziehenden Kräfte zwischen den Molekülen desselben Körpers.

Adhäsion? Die anziehenden Kräfte zwischen den Molekülen verschiedener Körper.

Kapillarattraktion? Die Flüssigkeit steht in einem engen Röhrechen (bei geringerer Oberflächenspannung) höher als in der Umgebung. (Konkaver Meniskus!) Gegenteil: Kapillardepression.

Diffusion? Gegenseitige Durchdringung zweier übereinandergeschichteter Gase oder Flüssigkeiten.

Osmose? Diffusion durch poröse Scheidewände (tierische Membranen usw.) hindurch.

Osmotisches Äquivalent? Die Menge Wasser, die gegen 1 g einer Flüssigkeit auf osmotischem Wege ausgetauscht wird.

van't Hoff'sche Gesetze? 1) Der osmotische Druck hängt von der chemischen Beschaffenheit der Lösung ab und ist ferner direkt proportional mit deren Konzentration und Temperatur. 2) Er ist gleich dem Druck eines Gases von gleicher Temperatur, das in gleichen Raumteilen ebensoviele Moleküle enthält, wie die Lösung Moleküle gelösten Stoffes.

Avogadros Gesetz? Gleiche Volumina Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleichviele Moleküle.

Kinetische Gastheorie? Die Gasmoleküle besitzen eine geradlinige fortschreitende Bewegung, bis sie aneinander oder an die Wand des Behälters anprallen. Die Gesamtheit ihrer die Wand treffenden Stöße bedingt den Druck des Gases gegen die Wand.

Torricellis Vakuum? Luftleerer Raum über einer 76 cm hohen Quecksilbersäule.

Luftdruck? Ungefähr 1 kg auf 1 qcm. (1 Atmosphäre).

Barometrische Höhenformel? $h = 18400 (\log b_0 - \log b_h)$.

Boyle-Mariottesches Gesetz? Die Spannung eines Gases ist bei gleicher Temperatur der Dichte direkt, dem Volumen umgekehrt proportional. $p : p_1 = v_1 : v$.

Ausflußgeschwindigkeit zweier Gase? Umgekehrt proportional den Quadratwurzeln aus ihren spezifischen Gewichten.

Absorption? Aufnahme von Gasen durch feste und flüssige Körper. Bei festen Körpern erfolgt A. entweder nur an der Oberfläche (Adsorption), oder auch im Innern (Okklusion).

Henry'sches Gesetz? Eine bestimmte Menge Flüssigkeit absorbiert bei verschiedenen Drucken gleiche Volumina eines Gases. Die unter sonst gleichen Umständen absorbierten Gasmengen sind daher den Drucken proportional.

Dalton'sches Gesetz? In Gasgemischen ist der Gesamtdruck gleich der Summe der Partialdrücke.

Wellenbewegung? Fortpflanzung einer Gleichgewichtsstörung durch pendelartige Schwingungen kleinster Teilchen, wobei immer die Bewegung der folgenden durch die der vorhergehenden hervorgerufen wird.

Elongation? Entfernung eines schwingenden Teilchens aus der Ruhelage. Die größte E. heißt **Amplitude**.

Schwingungszeit? Zeit einer ganzen Schwingung eines Teilchens, bzw. Zeit, in der die Wellenbewegung um eine Wellenlänge fortschreitet.

Phase? Bewegungszustand eines Teilchens, charakterisiert durch Elongation und Bewegungsrichtung.

Transversalwellen? Kleinste Teilchen schwingen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle. (Wellenberge und -täler).

Longitudinalwellen? Kleinste Teilchen schwingen in der Fortpflanzungsrichtung der Welle. (Verdichtungen und Verdünnungen).

Wellengeschwindigkeit? $v = \lambda / T$. $v = \sqrt{e : d}$.

Huygen'sches Prinzip? Jeder Punkt einer Welle ist ebenso als Zentrum einer neuen Wellenbewegung zu betrachten wie der ursprüngliche Störungsmittelpunkt.

Beugung? Ausbreitung einer Wellenbewegung um die Ränder von Spalten.

Interferenz? Zusammentreffen von zwei oder mehr Wellenzügen.

Gesetz der Superposition? Werden bei Interferenz einem Punkte mehrere Schwingungsimpulse erteilt, so führt er die ihrer algebraischen Summe entsprechende Bewegung aus.

Fourier'scher Satz? Alle komplizierten Wellenformen lassen sich in einfache pendelartige Schwingungen zerlegen.

Stehende Wellen? Wellen, bei denen alle Punkte (der Schwingungsbäuche) dieselbe Schwingungsrichtung bzw. Phase haben, während an den Knotenpunkten gar keine Bewegung herrscht.

Töne? Vom Gehörorgan wahrgenommene regelmäßige und gleiche Schwingungen von Körpern. Charakterisiert durch Höhe (Schwingungszahl), Stärke, Klangfarbe.

Tonquellen? Feste und luftförmige Körper, die leicht in stehende (transversale oder longitudinale) Schwingungen versetzt werden können.

Pfeifen? Instrumente, bei denen Luftsäulen in stehende longitudinale Schwingungen versetzt werden. (Lippen- und Zungenpfeifen).

Fortpflanzung des Schalles? Durch longitudinale Wellen. $v = \sqrt{\kappa \cdot c \cdot d} = 333$ m in Luft.

Kundtsche Staubfiguren? Dienen zur direkten Messung der Länge von Schallwellen.

spindelt in der Luft ein großes Bild
Mittönen, Resonanz? Mittönen (oder auswählende Resonanz) besteht darin, daß ein Körper beim Ertönen seines Eigentons mit klingt. (Allgemeine) Resonanz ist Verstärkung jedes beliebigen Tones durch „Resonanzböden“.

Schwebungen? Das Schwächer- und Stärkerwerden beim Zusammenklingen zweier Töne. Ihre Anzahl entspricht der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne. Ursache von Dissonanzen.

Dopplers Prinzip? Wird die Entfernung zwischen Tonquelle und Beobachter rasch kleiner, so wird der Ton der ersteren höher; umgekehrt tiefer.

Mechanische Wärmetheorie? 1) 1 (große) Kalorie ist äquivalent 427 Meterkilogrammen. 2) Wärme kann nur dann in Arbeit übergeführt werden, wenn sie dabei von einem wärmeren auf einen kälteren Körper übergeht, und auch dann nur teilweise. Infolgedessen wächst die Summe der entwerteten Energie („Entropie“) beständig.

Maßstab
Gay-Lussacs Gesetz? Bei gleichbleibendem Drucke sind die Gasvolumina, bei gleichbleibendem Volumen sind die Gasdrucke der Temperaturzunahme proportional. Es ist also $pV = p_0V_0 (1 + \alpha t)$ bzw. $pV = RT$.

Temperaturmessung? Für tiefere Temperaturen Thermometer mit Weingeist, Petroläther, Pentan; für höhere Thermometer aus Quarz; für höchste Pyrometer; für alle Metall- und Gas-Thermometer, Thermoelemente; für feinste Messungen Thermoelemente und Bolometer.

Absoluter Nullpunkt? Punkt, bei dem keine Molekularbewegung mehr besteht. -273° .

Latente Wärme? Wärme, die zur Überführung in einen höheren Aggregatzustand zugeführt werden muß und keine Temperaturerhöhung bewirkt. Besser: „Schmelzwärme“, „Verdampfungswärme“ usw.

Kondensationspunkt
Druck und Aggregatzustand? Im allgemeinen erschwert Druck den Übergang in einen höheren Aggregatzustand, so daß mehr Wärmezufuhr nötig ist. Ausnahmen: Wasser, Wismut, Antimon.

Reduzierte Gefrierpunkterniedrigung? Gefrierpunkterniedrigung, die 1 gr Substanz in 100 gr Lösungsmittel bewirkt.

norm
Raoult'sches Gesetz? Die reduzierten Gefrierpunkterniedrigungen, die zwei Substanzen in demselben Lösungsmittel unter sonst gleichen Verhältnissen bedingen, sind umgekehrt proportional ihren Molekulargewichten.

Sieden? Die bei bestimmter Temperatur erfolgende schnelle Verdampfung einer Flüssigkeit, wobei die Dampfbildung auch im Innern erfolgt.

Verdunsten? Spontanes Verdampfen einer Flüssigkeit an der Oberfläche, das nicht an bestimmte Temperatur gebunden ist.

Gesättigter Dampf? Dampf, der mit der Mutterflüssigkeit noch in Berührung steht und aus ihr nichts mehr aufnehmen kann. Seine Spannung (Sättigungsdruck) ist vom Volumen unabhängig und zugleich für die betreffende Temperatur ein Maximum; sie kann nur durch Erhitzen (nicht durch Kompression) erhöht werden.

Ungesättigter oder überhitzter Dampf? Dampf, der nicht mehr mit seiner Mutterflüssigkeit in Berührung steht. Verhält sich wie ein vollkommenes Gas.

Dampfichte? Verhältnis zwischen dem Gewicht eines Volumens Dampf und dem Gewicht eines gleichgroßen Volumens Luft bei gleichem Druck und gleicher Temperatur.

norm
Dampfichtebestimmung? Durch die Methoden von Gay-Lussac und Hofmann, Dumas, Victor Meyer.

Kritische Temperatur? Temperatur, oberhalb welcher ein Gas (durch Druck allein) nicht kondensiert werden kann.

Absolute Feuchtigkeit? Die wirklich vorhandene Menge Wasserdampf in einem Kubikmeter Luft.

Relative Feuchtigkeit? Verhältnis der wirklich vorhandenen Wasserdampfmenge zu derjenigen, die bei vollkommener Sättigung vorhanden wäre.

Spezifische Wärme? Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg (oder 1 g) einer Substanz um 1° zu erwärmen.

Kalorie? Wärmemenge, die 1 kg (oder 1 g) Wasser von $14,5^\circ$ auf $15,5^\circ$ erwärmt.

Gay-Lussac - Boyle Mariotte

in der Luft verhalten sich die Volumina, bei gleichbleibendem Volumen, die Spannungen des Gases sind proportional der abg. Temperatur.

Wärmekapazität? Produkt aus spezifischer Wärme und Gewicht eines Körpers.

Richmannsche Regel? Mischungstemperatur $T = (m_1 t_1 + m_2 t_2) : (m_1 + m_2)$.

Kalorimeter? Apparate zur Bestimmung der spezifischen Wärme. (Wasser- und Eis-K.)

Dulong-Petitsches Gesetz? Die Atomwärme (= Produkt aus Atomgewicht und spezifischer Wärme) ist eine konstante Größe; ca. 6,4.

Nömann-Koppsches Gesetz? Die Molekulärwärmen (= Produkte aus Molekulargewichten und spezifischer Wärme) der festen chemischen Verbindungen sind annähernd gleich der Summe der Atomwärmen der im Molekül enthaltenen Atome.

Spezifische Wärme der Gase? $c_p : c_v = k = 1,41$. (\sqrt{k} sogenannter Laplacescher Faktor.)

Wärmefortpflanzung? Durch Leitung, Strömung (Konvektion), Strahlung.

Diatherman, atherman? Wärmedurchlässig bzw. -undurchlässig.

Emanationstheorie? Licht ist ein äußerst feiner Stoff, der von den leuchtenden Körpern ausgesandt wird (Newton).

Undulationstheorie? Licht entsteht durch äußerst schnelle Schwingungen der Körpermoleküle, die durch transversale Ätherschwingungen fortgepflanzt werden (Huygens).

Lumineszenz? Leuchten bei gewöhnlicher oder nicht sehr erhöhter Temperatur.

Phosphoreszenz? Das durch Oxydationsprozesse bedingte Leuchten mancher Tiere und Pflanzen. Auch das Nachleuchten gewisser Körper nach starker Belichtung.

Photometer? Apparate zur Messung der Lichtstärke (die umgekehrt proportional der Entfernung ist). Fh. von Rumford, Bunsen.

Hefnerkerze? Einheit der Lichtstärke. Licht einer Amylazetatlampe bei 40 mm Flammenhöhe.

Melerkerze? Einheit der Beleuchtungsstärke. Lichtmenge, die von einer Hefnerkerze auf die im senkrechten Abstand von 1 m befindliche Flächeneinheit fällt.

Lichtgeschwindigkeit? 300.000 km in 1 Sekunde. Methoden von Römer, Bradley, Fizeau.

Reflexionsgesetze? 1) Einfallender Strahl, Einfallslot, reflektierter Strahl liegen in einer Ebene. 2) Reflexionswinkel = Einfallswinkel.

Reelle Bilder? Sind objektiv nachzuweisen, z. B. auf einem Schirm aufzufangen. Stets umgekehrt.

Virtuelle Bilder? Entstehen durch Strahlen, die nur scheinbar von einem Punkte ausgehen. Stets aufrecht.

Allgemeine Spiegel und Linsenregeln? 1) $1:g + 1:b = 1:f$. 2) Bildgröße: Gegenstandsgröße = Bildweite: Gegenstandsweite.

Konkavspiegel? 1) Gegenstand unendlich fern - Bild im Brennpunkt. 2) Gegenstand zwischen Unendlichkeit und geometrischem Mittelpunkt - Bild zwischen geometrischem Mittelpunkt und Brennpunkt. 3) Gegenstand im geometrischen Mittelpunkt - Bild ebenfalls dort. 4) Gegenstand zwischen geometrischem Mittelpunkt und Brennpunkt - Bild zwischen geometrischem Mittelpunkt und Unendlichkeit. 5) Gegenstand im Brennpunkt - Bild in der Unendlichkeit. 6) Gegenstand innerhalb der Brennweite - Bild auf der anderen Seite des Spiegels. In Fall 1)-5) Bilder reell, umgekehrt, verkleinert oder vergrößert. Im Fall 6) Bild virtuell, aufrecht, vergrößert.

Konvexspiegel? Erzeugen stets virtuelle, aufrechte, verkleinerte Bilder. (Formel: $1:b - 1:g = 1:f$.)

Brechungsgesetze? 1) Einfallender Strahl, Einfallslot, gebrochener Strahl liegen in einer Ebene. 2) Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels für je zwei Medien in einem konstanten Verhältnis (Snellius), das dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in beiden Medien entspricht u. Brechungsexponent usw. heißt

Absoluter Brechungsexponent? Brechungsexponent beim Übergang des Lichtes aus dem luftleeren Raum (in *praxi* Luft) in den betr. Körper.

Grenzwinkel? Winkel, von dem ab totale Reflexion stattfindet.

Prisma? Zwei brechende Flächen, die in einer Kante (der „brechenden Kante“) zusammenstoßen.

Prismawirkung? Die Gegenstände erscheinen nach der brechenden Kante hin verschoben. Der Ablenkungswinkel ist am kleinsten, wenn der Lichtstrahl symmetrisch durch das Prisma geht.

Bestimmung des Brechungsexponenten durch Prismen? $n = \sin \frac{\alpha + \varphi}{2} : \sin \frac{\alpha}{2}$. Hierbei ist

α der brechende Winkel, φ der kleinste Ablenkungswinkel.

Konvexlinsen? Es gelten dieselben Gesetze wie für Konkavspiegel. Nur sind diejenigen Bilder reell, die auf der anderen Seite der Linse liegen wie der Gegenstand.

Konkavlinsen? Es gelten analoge Regeln wie für Konvexspiegel.

Sphärische Aberration? Stärkere Brechung der Randstrahlen, so daß eine Brennlinie bzw. Brennfläche bzw. Brennraum entsteht.

Kardinalpunkte? Bei zentrierten Systemen 2 Brennpunkte, 2 Hauptpunkte, 2 Knotenpunkte.

Mikroskop? Durch das Objektiv entsteht ein umgekehrtes, vergrößertes, reelles Bild des

Gegenstandes, von dem das Okular (welches als Lupe wirkt) ein vergrößertes virtuelles Bild erzeugt.

- Fernrohre?* Katoptrische F. (Spiegelteleskope, Reflektoren) und dioptrische F. (Refraktoren). Zu letzteren gehören das Galileische (oder holländische) und das Keplersche (oder astronomische) Fernrohr. Prismenfernrohre.
- Stereoskop?* Die Bilder von zwei Abbildungen desselben Gegenstandes, die dem Eindruck des rechten und linken Auges entsprechen, werden übereinander gelagert, wodurch ein körperliches Bild entsteht.
- Spektrum?* Farbenbild, das entsteht, wenn weißes (zusammengesetztes) Licht zerstreut (dispargiert), d. h. in seine (homogenen) Bestandteile, geordnet nach ihren Schwingungszahlen, zerlegt wird.
- Spektralfarben?* Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. — Violett, das die kleinste Wellenlänge und größte Schwingungszahl hat, wird am stärksten gebrochen.
- Geradsichtige Prismen?* Prismen mit Dispersionsvermögen, aber mit keiner oder nur geringer Brechkraft.
- Achromatische Prismen?* Prismen mit Brechungsvermögen ohne Farbenzerstreuung.
- Chromatische Aberration?* Farbenzerstreuung bei Linsen.
- Emissionsspektren?* Spektren von Körpern, die in glühendem Zustande Strahlen aussenden.
- Absorptionsspektren?* Spektren von weißem Lichte, das durch flüssige oder gasförmige Körper hindurch gegangen ist.
- Kirchhoffsches Gesetz?* Jeder leuchtende Körper absorbiert diejenigen Strahlengattungen am stärksten, die er selbst auszusenden vermag. Allgemein: Für jeden Körper ist das Verhältnis zwischen Emissions- und Absorptionsvermögen konstant, nämlich gleich der Strahlung des absolut schwarzen Körpers von derselben Temperatur und derselben Wellenlänge.
- Fraunhofersche Linien?* Die äußerst zahlreichen dunklen Linien im Sonnenspektrum. (Absorptionsspektrum, Chromosphäre.)
- Ultrarote Strahlen?* Dunkle Wärmestrahlen, von größerer Wellenlänge und kleinerer Schwingungszahl als die roten Strahlen.
- Aktinische Strahlen?* Die chemisch wirksamen (vioioletten und ultravioletten) Strahlen.
- Fluoreszenz?* Eigenschaft gewisser Körper, unter Einfluß intensiver Bestrahlung selbstleuchtend zu werden und dann Strahlen auszusenden, deren Farbe von der Farbe der Lichtquelle und der gewöhnlichen Farbe des betr. Körpers abweicht.
- Interferenzfarben?* Farben, die bei Interferenz weißen Lichtes dadurch entstehen, daß an bestimmten Stellen gewisse Strahlen ausgelöscht werden, so daß daselbst durch Mischung der übrigbleibenden die Komplementärfarben dazu entstehen.
- Gitterspektren?* Spektren, die durch Interferenz bei Beugung des Lichtes, das durch Gitter gegangen ist, entstehen. (Gitter = mehrere dicht nebeneinanderliegende Spalten, z. B. die Stellen zwischen in Glas eingeritzten Strichen.) Gitterspektren sind Normalspektren, weil hier die Ablenkung der einzelnen Lichtstrahlengattungen genau proportional der Wellenlänge erfolgt. (Blau wird z. B. am schwächsten abgelenkt.)
- Polarisiertes Licht?* Licht, dadurch charakterisiert, daß die Äthertheilchen alle in einer Ebene senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung (geradlinig p. L.), oder in Kreisen bzw. Ellipsen (kreisförmig bzw. elliptisch p. L.) schwingen. Entsteht durch Doppelbrechung, Spiegelung, einfache Brechung.
- Polarisationsapparat?* Besteht aus Polarisator, der gewöhnliches Licht in polarisiertes verwandelt, und Analysator, der zum Nachweis des polarisierten Lichtes dient (2 Turmalinplatten, 2 Nicols, 2 Spiegel usw.).
- Doppelbrechung?* Beim Durchgang durch gewisse Kristalle wird ein Lichtstrahl in zwei zueinander senkrecht polarisierte Strahlen zerlegt, von denen der ordentliche Strahl dem Snelliusschen Gesetze folgt, der außerordentliche nicht.
- Optische Achse?* Jede Richtung in einem doppelbrechenden Kristall, längs der keine Doppelbrechung erfolgt.
- Brewstersches Gesetz?* Bei der Reflexion ist das reflektierte Licht vollkommen polarisiert, wenn der reflektierte Strahl mit dem gebrochenen einen rechten Winkel bildet. Der dazu erforderliche Einfallswinkel heißt „Polarisationswinkel“.
- Interferenz polarisierten Lichts?* Tritt ein, wenn zwei in einer Ebene schwingende polarisierte Strahlen, die einen Gangunterschied bekommen haben (z. B. durch ein Gipsblättchen), zur Vereinigung kommen.
- Drehung der Polarisationsebene?* In optisch aktiven Stoffen (z. B. Quarz und Zuckerslösungen) wird polarisiertes Licht in zwei entgegengesetzt gerichtete kreisförmig polarisierte Strahlen zerlegt, die verschiedene Geschwindigkeit haben und sich nach ihrem Austritt wieder zu einem geradlinig polarisierten Strahl vereinigen, dessen Schwingungsebene nach rechts oder links von der ursprünglichen abweicht.

- Saccharimeter?** Polarisationsapparate zur Bestimmung des Zuckergehalts von Lösungen. Der Winkel, um den die Polarisationssebene des Lichts durch eine Zuckerlösung gedreht wird, ist proportional dem Zuckergehalt.
- Magnetische Anziehung?** Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.
- Coulombsches Gesetz?** Für Magnetismus: $F = m \cdot m' : r^2$. Für Elektrizität: $F = e \cdot e' : r^2$.
- Kraftlinien?** Gedachte Linien, welche die Richtung und (durch ihre Zahl pro qcm) auch die Stärke der magnetischen Kraft in einem magnetischen Felde anzeigen.
- Magnetische Influenz?** Übertragung magnetischer Eigenschaften durch bloße Annäherung eines Magneten.
- Hysteresis?** Eigenschaft, daß die Änderung des magnetischen Zustandes beim Magnetisieren und Entmagnetisieren hinter der einwirkenden Kraft zurückbleibt. Beruht auf der Koerzitivkraft, welche die Moleküle in ihrer jeweiligen Lage zu halten sucht.
- Paramagnetismus?** Eigenschaft, von Magneten angezogen zu werden. (Eisen).
- Diamagnetismus?** Eigenschaft, von Magneten abgestoßen zu werden. (Wismut, Antimon).
- Deklination?** Seitliche Abweichung der Magnetnadel von der Nord-Südrichtung.
- Inklination?** Winkel der Magnetnadel zur Horizontalen.
- Horizontalintensität des Erdmagnetismus?** Horizontale Komponente der Intensität des Erdmagnetismus. Ist umgekehrt proportional den Quadraten der Schwingungszeiten einer in Bewegung versetzten Magnetnadel.
- Elektrische Anziehung?** Gleichnamig elektrische Körper stoßen sich ab, ungleichnamig ziehen sich an.
- Elektrisches Potential (in einem Punkte)?** Arbeit, die elektrische Kräfte leisten, um die Einheit der (gleichnamigen) Elektrizitätsmenge von dem betreffenden Punkte aus bis zur Unendlichkeit fortzubewegen. (Synonym: Spannung.)
- Potentialdifferenz?** Arbeit, die zur Überführung der Einheit der Elektrizitätsmenge von einer Stelle zu einer anderen nötig ist.
- Elektrische Kapazität?** Verhältnis zwischen Elektrizitätsmenge und Potential. $\kappa = e : V$.
- Elektrometer?** Apparate zur Messung von Elektrizitätsmengen und Potentialen.
- Elektrische Dichte?** Elektrizitätsmenge pro Flächeneinheit.
- Elektrische Influenz?** Entstehung von Elektrizität in einem Körper durch bloße Annäherung eines elektrischen Körpers. (Gebundene und freie Elektrizität.)
- Kondensatoren?** Ansammlungsapparate für Elektrizität. Bestehen aus Kollektor und Kondensator (im engeren Sinne). Hierzu gehören Franklinsche Tafel, Leidener Flasche, Fizeaus Kondensator.
- Dielektrizitätskonstante?** Die Zahl, welche angibt, wieviel mal mehr Elektrizität der Kollektor eines Kondensators aufnehmen kann, wenn an Stelle von Luft eine gleichdicke Schicht eines bestimmten anderen „Dielektrikums“ (= Nichtleiter) vorhanden ist.
- Leiter erster und zweiter Klasse?** Leiter erster Klasse: Metalle und Kohle. Leiter zweiter Klasse: Flüssigkeiten (Säuren und Salzlösungen).
- Voltasche Spannungsreihe?** Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Kohle. — Die Spannungsdifferenz ist um so größer, je weiter zwei Körper in dieser Reihe auseinander stehen; sie ist unabhängig von Form und Größe der Körper, wird auch nicht geändert, wenn noch andere Metalle dazwischen geschaltet werden. (Nur für Leiter 1. Kl. gültig.)
- Elektromotorische Kraft?** Die Kraft, welche Elektrizitätsmengen in Bewegung setzt und Potentialdifferenzen erzeugt. Gemessen durch Volts.
- Stromstärke?** Die Elektrizitätsmenge, die in einer Sekunde durch irgendeinen Querschnitt des Stromkreises geht. Gemessen durch Ampères. $I = \frac{Q}{t}$
- Stromdichte?** Verhältnis zwischen Stromstärke und Querschnitt des Leiters.
- Elektrischer Widerstand?** Alles was die Stromstärke vermindert. $W = k \cdot l : q$. (k spezifischer Widerstand, l Länge, q Querschnitt des Leiters). Gesamt-widerstand = W . in der Stromquelle (innerer, wesentlicher W .) + W . im Schließungskreise (äußerer, außerwesentlicher W .) Gemessen durch Ohms.
- Galvanisches Element?** Verbindung zweier Metalle mit einer Flüssigkeit.
- Pole oder Elektroden?** Die freien Enden der Metalle eines Elements bzw. die Enden der damit verbundenen Drähte.
- Anode? Kathode?** Der äußere positive bzw. äußere negative Pol.
- Ohmsches Gesetz?** Die Stromstärke ist proportional der elektromotorischen Kraft, umgekehrt proportional dem Widerstande. $I = E : W$ oder 1 Ampère = 1 Volt : 1 Ohm.
- Hinterinanderschaltung?** Abwechselnde Verbindung von positiven und negativen Polen mehrerer Stromquellen. (Syn. Reihen-, Serienschaltung.)
- Nebeneinanderschaltung?** Verbindung aller positiven Pole mehrerer Stromquellen untereinander und ebenso aller negativen Pole. (Syn. Parallelschaltung.)
- Zweckmäßigste Schaltung von Elementen?** Bei großem inneren Widerstande Parallelschaltung, bei großem äußeren Widerstande Hinterinanderschaltung.

- Kirchhoffsche Gesetze?** 1) Bei Stromverzweigungen sind die Zweigströme zusammen so stark wie der Hauptstrom. 2) In jedem abgeschlossenen Teile eines Stromnetzes ist die Summe aller elektromotorischen Kräfte gleich der Summe aller Spannungsverluste.
- Wheatstonesche Brücke?** In der „Brücke“ herrscht kein Strom, wenn $w_1 : w_2 = w_3 : w_4$.
- Elektrische Einheiten?** Elektrizitätsmenge: Coulomb — Kapazität: Farad — Intensität: Ampère — Elektromotorische Kraft und Potential: Volt — Widerstand: Ohm — Stromarbeit: Volt-Coulomb oder Joule — Stromeffekt: Volt-Ampère oder Watt.
- Joulesches Gesetz?** Die durch den elektrischen Strom erzeugte Wärme ist proportional dem Widerstande, dem Quadrate der Stromstärke, sowie der Zeit. $Q = I^2 W t$.
- Peltiersches Phänomen?** Erwärmung oder Abkühlung, wenn der elektrische Strom durch Lötstellen zweier verschiedener Metalle geht, die einen Stromkreis bilden.
- Thermoströme?** Elektrische Ströme, die durch Erwärmung der Lötstellen zweier zu einem Stromkreis verbundener Metalle entstehen.
- Elektrolyse?** Zersetzung von Flüssigkeiten (Leiter 2. Klasse, „Elektrolyte“) durch den elektrischen Strom, bzw. Wanderung der bereits dissoziierten Atomgruppen („Ionen“) an die Elektroden.
- Kationen?** Die elektropositiven Wasserstoff- bzw. Metallatome, die bei der Elektrolyse zur (negativen) Kathode wandern.
- Anionen?** Die elektronegativen Atomgruppen (Molekülreste ohne Wasserstoff- bzw. Metallatome,) die bei der Elektrolyse zur (positiven) Anode wandern.
- Faradaysche Gesetze?** 1) Die Menge der Zersetzungsprodukte ist bei der Elektrolyse in gleichen Zeiten der Stromstärke proportional. 2) Von demselben Strom werden bei Zersetzung verschiedener Flüssigkeiten stets chemisch äquivalente Mengen abgeschieden. Äquivalentgewicht = Quotient aus Atomgewicht und Wertigkeit.
- Polarisationsstrom?** Strom, der durch Zersetzungsprozesse innerhalb eines galvanischen Elementes entsteht und dem primären Strom entgegengesetzt gerichtet ist, so daß er ihn schwächt.
- Konstante Elemente?** Galvanische Elemente, bei denen die galvanische Polarisation beseitigt ist. Diese Depolarisation erfolgt hauptsächlich durch Oxydation des entstehenden Wasserstoffs. — Beispiele: Daniell-, Chromsäure-, Leclanché-Element.
- Konstanter Strom?** Elektrischer Strom, der durch Berührung bzw. chemische Einwirkung von Leitern erster und zweiter Klasse entsteht. (Synonym: Galvanischer Strom.) Auch inkonstante Elemente liefern demnach „konstanten“ Strom.
- Akkumulatoren?** „Sekundäre“ Elemente, bei denen durch „Laden“ die Elektroden so verändert werden, daß sie nachher, wenn man sie durch einen Schließungsdraht verbindet einen kräftigen Polarisationsstrom liefern, der zur Arbeitsleistung dient.
- Oerstedtsches Phänomen?** Ein Strom, der eine Magnetnadel umfließt, lenkt dieselbe ab und sucht sie senkrecht zu seiner Ebene zu stellen.
- Ampèresche Schwimmregel?** Denkt man sich in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, das Gesicht der Nadel zugekehrt, so wird ihr Nordpol nach links abgelenkt.
- Astatisches Nadelpaar?** Zwei mit entgegengesetzten Polen übereinander an einem Stäbchen angebrachte Magnetnadeln (eine innerhalb, die andere außerhalb des Stromkreises), die dadurch vom Einfluß des Erdmagnetismus unabhängig und somit leicht beweglich sind.
- Biot-Savartsches Gesetz?** Ein Stromelement l wirkt bei der Stromstärke i auf einen Magnetpol m im Abstände r , wenn φ der Winkel zw. r und l , mit der Kraft $F = \frac{m \cdot i \cdot l}{r^2} \cdot \sin \varphi$.
- Galvanometer?** Meßapparate, bei denen der Strom die Magnetnadel in mehreren Windungen umkreist.
- Ampèremeter?** Galvanometer, die so geeicht sind, daß ihre Skala für jeden Nadelausschlag die Zahl der Ampères direkt angibt. Kommen an eine beliebige Stelle des Hauptstromkreises.
- Voltmeter?** Galvanometer, die so geeicht sind, daß ihre Skala für jeden Nadelausschlag die Zahl der Volts direkt angibt. Sie liegen im Nebenschluß zu den beiden Punkten, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll.
- Voltmeter?** Apparate zur Messung der Stromstärke aus der Menge der durch Elektrolyse entstehenden Zersetzungsprodukte.
- Elektromagnete?** Magnete, die entstehen, wenn und solange Eisen von einem elektrischen Strome umflossen wird.
- Solenoid?** Eine von einem elektrischen Strome durchflossene Drahtspirale. Wirkt wie ein Magnet.
- Drehspulengalvanometer?** Galvanometer, bei denen eine drehbare Spule zwischen den Polen eines starken Hufeisenmagneten durch eine Feder in einer bestimmten Lage er-

halten wird. Geht Strom durch sie, so dreht sie sich um einen der Stromstärke proportionalen Winkel, der durch einen mit ihr verbundenen Zeiger auf einer nach Volt oder Ampères geeichten Skala angezeigt wird.

Ampères elektrodynamische Gesetze? 1) Parallel gerichtete Ströme ziehen sich an, wenn sie gleiche Richtung haben; andernfalls stoßen sie sich ab. 2) Gekreuzte Ströme ziehen sich an, wenn in beiden der Strom gleichgerichtet ist; andernfalls stoßen sie sich ab. 3) Die anziehende oder abstoßende Kraft ist proportional dem Produkte der Stromstärken und dem Produkte der aufeinander wirkenden Stromlängen, umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung.

Induktion? Entstehung von kurzdauernden elektrischen Strömen in einem geschlossenen stromlosen Leiter, wenn in der Nähe ein elektrischer Strom geschlossen oder geöffnet bzw. verstärkt oder geschwächt bzw. genähert oder entfernt wird. Die induzierten (oder sekundären oder Induktions-) Ströme sind beim Schließen, Nähern und Stärkerwerden des induzierenden (oder primären) Stroms diesem entgegengesetzt, in den anderen Fällen ihm gleich gerichtet.

Paradische Ströme? Medizinische Bezeichnung für Induktionsströme.

Extrastrome? Die durch Selbstinduktion, d. h. durch Induktion innerhalb des primären (gewöhnlich aus vielen Windungen bestehenden) Stromkreises selbst entstehenden Ströme. (Schließungs- und Öffnungs-Extrastrom).

Magnetoinduktion? Induktion, die durch Annäherung oder Entfernung eines Magneten hervorgerufen wird.

Lenz'sche Regel? Die Richtung der Induktionsströme ist immer derartig, daß sie durch ihre elektromagnetische bzw. elektrodynamische Rückwirkung der strömerzeugenden Bewegung entgegenwirken.

Induzierte elektromotorische Kraft? Ist proportional der Änderung der Kraftlinienzahl, die pro Sekunde in der vom sekundären Leiter begrenzten Fläche erfolgt.

Elektrische Maschinen? Auf Induktionswirkung beruhende Maschinen, die mechanische Energie in elektrische verwandeln (Generatoren) oder umgekehrt (Elektromotoren). Bestehen aus Feldmagnet und Anker (Induktor), Wechselstrom- und Gleichstrommaschinen. Letztere besitzen meist einen Ringanker (Pacinotti, Gramme) oder Trommelanker.

Siemens' Dynamoprinzip? Leitet man den durch Drehung eines Induktors in diesem entstandenen Strom um den Feldmagneten, so wird dessen magnetische Wirkung gesteigert; dadurch werden wieder die im Induktor entstehenden Induktionsströme verstärkt, und so setzt sich dieser Circulus fort bis zur magnetischen Sättigung des Eisens. Die betr. Maschinen heißen Dynamomaschinen.

Transformatoren? Auf Induktion beruhende Apparate, durch welche Wechselströme von niedriger Spannung und großer Stromstärke in solche von hoher Spannung und geringer Stromstärke verwandelt werden und umgekehrt.

Induktionsapparate im engeren Sinne? Auf Induktion beruhende Apparate, bei denen ein im primären Stromkreis fließender Gleichstrom durch automatische Unterbrecher (Wagnerscher Hammer, Wehnelt-Unterbrecher usw.) in raschem Wechsel geöffnet und geschlossen wird. Die großen heißen Funkeninduktoren (Rühmkorffs).

Geißler-, Hittorf-Röhren? Glasröhren, die Luft oder ein anderes Gas in starker Verdünnung enthalten und mit zwei eingeschmolzenen Aluminiumelektroden versehen sind.

Kathodenstrahlen? Unsichtbare Strahlen, die von der Kathode Geißlerscher und Hittorfscher Röhren ausgehen, wenn durch dieselben hochgespannte Ströme geleitet werden. Bestehen aus Elektronen.

Elektronen? Elementarquantum der Masse (etwa 2000mal kleiner als ein Wasserstoffatom), die mit einem Elementarquantum negativer Elektrizität verbunden sind.

Röntgenstrahlen? Unsichtbare Strahlen, die von Kathodenstrahlen beim Auftreffen auf die Röhrenwand bzw. andere feste Körper im Inneren der Röhren erzeugt werden. Beruhen auf transversalen Ätherschwingungen und haben eine Wellenlänge von $0,01 - 4 \mu$.

Radioaktive Stoffe? Stoffe, die ohne äußere Einwirkung dauernd Strahlen aussenden, welche sich wie Kanal- bzw. Kathoden- bzw. Röntgenstrahlen verhalten (α β γ -Strahlen).

Halbwertszeit? Zeit, in der die radioaktive Wirkung eines Stoffes bzw. die Zahl seiner Atome auf den halben Wert gesunken ist.

Emanationen? Gasförmige Umwandlungsprodukte des Radiums, Thoriums, Aktiniums. Grundlage der sog. induzierten Radioaktivität.

Ionisation von Gasen? Durch Kathoden-, Röntgen-, radioaktive, ultraviolette Strahlen usw. erfolgende Umwandlung neutraler Gasmoleküle in negative Elektronen-Ionen und positive Atom-Ionen. Hierdurch werden die Gase leitend für Elektrizität.

- Thomsons Schwingungsformel?* $T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$. (T Zeit, L Selbstinduktion, C Kapazität).
- Hochfrequenzströme?* Wechselströme, deren Wechselzahl bis zu 1 Million pro Sekunde und darüber beträgt. Werden sie noch hochgespannt, so entstehen die Tesla- oder d'Arsonvalströme.
- Elektrische Wellen?* Von oszillierenden Funkenentladungen ausgehende Wellen, die gleichen Gesetzen wie die Lichtwellen folgen und auch dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit (300000 km pro Sekunde), aber größere Wellenlänge besitzen.
- Elektromagnetische Lichttheorie?* Die Fortpflanzung des Lichtes beruht auf Ausbreitung elektrischer bzw. magnetischer Wellen im Äther, die ihrerseits durch Schwingungen von Elektronen in den leuchtenden Körpern erzeugt werden.

Register.

- α -Strahlen 188, 189.
 Abbe 111, 112, 124.
 Abbildungsvermögen 110.
 Aberration 98, 109, 116.
 Ablenkungswinkel 106.
 Abplattung der Erde 12, 26.
 Absolut schwarzer Körper 119.
 Absolute Feuchtigkeit 87.
 Absolute Maße 3, 6, 8, 70, 135, 141, 154, 171, 199.
 Absolutes Brechungsverhältnis 103.
 Absoluter Nullpunkt 74.
 Absorption 48, 94, 96, 116ff.
 Absorptionskoeffizient 50.
 Absorptionsspektren 118.
 Abstimmung 193.
 Abstoßung 7, 130, 134, 135.
 Achromatismus 116.
 Additionsfarben 117.
 Adhäsion 7, 37.
 Adiabatische Prozesse 92.
 Adsorption 49.
 Äquimolekulare Lösungen 39, 80, 81, 83.
 Äquipotentialfläche 143.
 Äquivalentgewichte 166.
 Äther 2, 93, 94, 95, 147, 188, 199.
 Affinität 7.
 Aggregatzustände 2, 78ff.
 Akkommodation 110.
 Akkumulatoren 169.
 Aktinische Strahlen 120.
 Aktinium 188.
 Aktinium-Emanation 189, 190.
 Aktuelle Energie 8.
 Akustik 60ff.
 Alkoholometer 37.
 Ampère 154, 156, 171, 200.
 Ampèremeter 172.
 Ampères Gesetze 175.
 — Gestell 174.
 — Schwimmregel 170.
 — Theorie des Magnetismus 176.
 Amplitude 27, 53.
 Amylacetatlampe 97.
 Analysator 128.
 Aneroidbarometer 44.
 Anionen 165.
 Anisotrop 126.
 Anker 138, 179.
 Anode 152.
 Anodenstrahlen 186.
 Anomale Dispersion 116.
 Ansammlungsapparate 146.
 Antennen 196.
 Antikathode 186.
 Anziehung 7, 135, 140.
 Aperiodisches Galvanometer 177.
 Apertur 111, 112.
 Aphel 10.
 Aplanatisches System 109.
 Aräometer 36, 37.
 Arbeit 7, 160.
 Archimedisches Prinzip 34, 48.
 Arco 196.
 Arm einer Kraft 18.
 Arrhenius 165.
 d'Arsonval 175.
 Arsonvalisation 195.
 d'Arsonvalsche Ströme 194.
 Astatiche Nadel 171.
 Astronomisches Fernrohr 113.
 Atherman 94.
 Atmosphäre 42, 43, 50.
 Atom-Ionen 190.
 Atomtheorie 1.
 Atomwärme 91.
 Atomzerfall 188.
 Auflösen 79.
 Auflösungsvermögen 110, 124.
 Auftrieb 34, 48.
 Augenglas 111.
 August 88.
 Ausdehnung fester Körper 72, 73.
 — flüssiger Körper 73.
 — der Gase 73.
 — des Wassers 74, 79.
 Ausdehnungskoeffizient 72.
 Ausfließgeschwindigkeit 33.
 — von Gasen 48.
 Außerordentlicher Strahl 127.
 Außerwesentlicher Widerstand 157.

- Autoklav 81.
 Avogadros Hypothese 42, 86.
 β -Strahlen 188.
 Bäuche 59.
 Bahngeschwindigkeit 23.
 Ballistisches Galvanometer 172.
 Bandenspektrum 118.
 Barometer 43, 44.
 Barometerprobe 47.
 Batterie 148, 153.
 Becquerelstrahlen 188.
 Begrenzungsvermögen 110.
 Beharrungsvermögen 4, 24.
 Beleuchtungsapparat 111.
 Beleuchtungsstärke 97.
 Bell 184.
 Berliner 61.
 Berührungselektrizität 151.
 Beschleunigung 5, 6.
 Beugung 56, 123.
 Beugungsspektren 124.
 Bewegungsgesetze 4.
 Bewegungsgröße 6.
 Bewegungshindernisse 30.
 Bilder 99.
 Bildgröße 101.
 Biot-Savartsches Gesetz 171.
 Blättchen, Farben dünner 122.
 Blei 189.
 Blenden 109, 111.
 Blitz 150.
 Blitzableiter 150.
 Bogenlicht 162.
 Bolometer 160.
 Boyle-Mariottesches Gesetz 44, 73, 74.
 Bradley 98.
 Bramahsche Presse 32.
 Branly 197.
 Braun 196, 198.
 Brechende Kante 105.
 Brechung 56ff., 96, 103ff. 130.
 Brechungsexponent, -quotient, -verhältnis 103, 106, 107.
 Brechungswinkel 57, 58.
 Bremerlampen 163.
 Brennlinie 109.
 Brennpunkt 101, 107, 109.
 Brennspiegel 101.
 Brennweite 101, 107.
 Brewsters Gesetz 130.
 Brewsters Stereoskop 115.
 Briefwaage 21.
 Browns Molekularbewegung 126.
 Brückenmethode 160.
 Brückenwaage 20.
 Bürsten 180.
 Büschellicht 150, 194.
 Bunsen 48, 91, 97, 117.
 Bunsenbrenner 49.
 Cagniard de la Tour 60.
 Camera obscura 110.
 Campanis Okular 111.
 Celsius 75.
 C. G. S.-System 3.
 Chemische Harmonika 65.
 Chladnis Klangfiguren 64.
 Chlorophyll 72.
 Chromatische Aberration 116.
 — Polarisation 132.
 — Tonleiter 62.
 Chromosphäre 119.
 Chromsäure-Element 168.
 Clausius 71, 165.
 Contractio venae 33.
 Coulomb 141, 200, 201.
 Coulombsches Gesetz 135, 140.
 Crookesche Röhren 185.
 Curie 188.
 Dämpfe 41, 83, 86.
 Dämpfung der Magnetonadel 177.
 — von Schwingungen 191, 193.
 Daguerreotypien 120.
 Dalton 1.
 Daltons Gesetz 84.
 Dampfdichte 67, 84.
 Dampfdruck 83.
 Dampfkochtopf 81.
 Dampfmaschinen 89.
 Dampfspannung 83.
 Dampfturbinen 89.
 Daniell 88.
 Daniell-Element 165.
 Davys Lampe 93.
 — Lichtbogen 162.
 — Versuch 70.
 Degradation der Energie 71.
 Dehnbarkeit 30.
 Deklination 139.
 Demokrit 1.
 Depolarisation 167.
 Deprez 175.
 Detektoren 197, 198.
 Dewarsche Flaschen 93.
 Dezimalwaage 20.
 Dialyse 40.
 Diamagnetismus 139.
 Diathermanität 94.
 Diathermiebehandlung 195.
 Diatonische Tonleiter 62.
 Dichte 35. Vgl. Stromdichte.
 Dielektrica 146, 199.
 Dielektrizitätskonstante 147.
 Differentillampe 162.
 Differenzfarben 117.
 Differenztöne 69.
 Diffraktion s. Beugung.
 Diffusion 39, 48.
 Dimension 3.
 Dioptrik 103ff.
 Dioptrische Fernrohre 113.
 Dispersion 115, 116.
 Disruptive Entladung 150.
 Dissipation d. Energie 71.
 Dissonanz 68.
 Dissoziation 165.
 Doebereiners Feuerzeug 49.
 Doppelbrechung 126ff.
 Doppelquarzplatte 134.

- Doppelspat 127, 128.
 Doppelwägung 20.
 Dopplers Prinzip 69.
 Drehspulengalvanometer 175.
 Drehung der Polarisations-
 ebene 133, 134, 199.
 Drehungsachse 17.
 Drehungsmoment 18, 24.
 Druck- u. Schmelzpunkt 78.
 — u. Siedepunkt 81.
 Druckpumpen 46.
 Du Bois-Reymond 183.
 Dulong-Petitsches Gesetz 91.
 Dumasse Methode 85.
 Dunkelfeldbeleuchtung 125.
 Dunkle Wärme 119.
 Dynamisches Gleichgewicht 13.
 Dynamoprinzip 180.
 Dyne 6.

 Ebene Spiegel 99.
 Echappement 29.
 Echo 67.
 Edison 61, 162.
 Effekt 8, 161.
 Effektive Leistung 8.
 Einarmiger Hebel 17, 19.
 Einatmen 45.
 Einfallsebene 99.
 Einfallswinkel 57, 58.
 Eisenkern 177, 181ff.
 Eiskalorimeter 90.
 Eismaschinen 82.
 Elastizität 29, 53ff.
 Elektrische Anziehung u.
 Abstoßung 140.
 Elektrische Dichte 145.
 Elektrische Heizapparate 161.
 Elektrische Influenz 145.
 Elektrische Kapazität 143, 147, 192, 200.
 Elektrische Klingel 174.
 Elektrische Kraftübertragung 179, 182.

 Elektrische Leiter 141, 151, 152.
 Elektrische Maschinen 179ff.
 Elektrische Maße 199ff.
 Elektrische Spannung 142, 151ff.
 Elektrische Schwingungen 192ff.
 Elektrische Trägheit 178, 186, 192.
 Elektrische Wellen 195ff.
 Elektrischer Funken 150, 192, 193, 195, 196.
 Vgl. Öffnungs-, Löschfunken.
 Elektrischer Strom 140, 149, 151ff.
 Elektrischer Widerstand 154ff., 194, 200.
 Elektrischer Wind 145.
 Elektrisches Bogenlicht 162.
 Elektrisches Feld 142.
 Elektrisches Glühlicht 162.
 Elektrisches Pendel 140.
 Elektrisches Potential 141ff., 151ff., 158, 200.
 Elektrisiermaschine 146.
 Elektrizität 140ff.
 Elektrizitätsmenge 140, 172, 200.
 Elektrochemische Äquivalente 166.
 Elektroden 152.
 Elektrodynamik 175.
 Elektroinduktion 176.
 Elektrolyse 164ff.
 Elektrolyte 164, 165.
 Elektrolytische Dissoziation 165.
 Elektromagnete 173.
 Elektromagnetische Maschinen 179.
 Elektromagnetische Maße 171, 200.
 Elektromagnetische Theorie des Lichts 199.
 Elektrometer 144.
 Elektromotoren 179.

 Elektromotorische Kraft 151, 153, 158, 177, 200.
 Elektronen 2, 186, 190, 199.
 Elektron-Ionen 190.
 Elektroskop 141.
 Elektrostatik 140ff.
 Elektrostatische Maße 141, 154, 199.
 Elemente 152, 167ff., 189.
 Elliptische Polarisation 133.
 Flammfeuer 150.
 Elongation 53.
 Emanationen 189, 190.
 Emanationstheorie 95, 104.
 Emissionsspektren 117.
 Emissionstheorie 95.
 Emissionsvermögen 94, 119.
 Empfindlichkeit 20, 75.
 Empirisch 21.
 Endothermische Prozesse 72.
 Energie 1, 8ff.
 Entladung 141, 149.
 Entropie 71.
 Erdanziehung 7, 12.
 Erddichte 7.
 Erden 147.
 Erdmagnetismus 139.
 Erdmasse 7.
 Erg 8.
 Erhaltung der Energie 1, 10.
 Erstarren 78.
 Exothermische Prozesse 72.
 Extraordinär s. außerordentlich.
 Extrastrome 178.

 Fadenkreuz 113.
 Fadentelephon 61.
 Fahrenheit 75.
 Fallgesetze 21.
 Farad 144, 200.
 Faraday 49, 144, 145, 182, 196, 199.
 Faradaysche Gesetze 165.

- Faradischer Strom 182.
 Farben 115, 116, 122ff., 132.
 Farbenkreisel 115.
 Fata morgana 104.
 Faure 169.
 Federwage 19.
 Feldmagnet 179.
 Feldstärke 136, 142.
 Feldstecher 113, 114.
 Fernphotographie 155.
 Fernrohr 112.
 Festigkeit 30.
 Feuchtigkeit 87.
 Fieberthermometer 76.
 Fixpunkte 75.
 Fizeaus Kondensator 148, 183.
 Fizeaus Methode 98.
 Flammenbogenlampen 163.
 Flaschenelement 168.
 Flaschenzug 15.
 Fliehkraft 26.
 Flüssigkeiten 31.
 Fluoreszenz 120.
 Fokaldistanz s. Brennweite.
 Fokus s. Brennpunkt.
 Fokusröhren 186.
 Fortin 43.
 Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Wellen 55, 66, 92, 97.
 Foucault 104.
 Foucaultsche Ströme 177.
 Foucaultscher Pendelversuch 29.
 Fourierscher Satz 58.
 Franklin 150.
 Franklinisation 140.
 Franklinsche Tafel 147.
 Fraunhofersche Linien 118, 119.
 Freie Elektrizität 145.
 Fresnels Versuch 121.
 Fritter 197.
 Frontlinse 112.
 Fundamentalpunkte 75.
 Funkenentladungen s. elektrischer Funken.
 Funkeninduktor 183.
 Funkentelegraphie 196ff.
 g 12, 21, 26.
 γ -Strahlen 188.
 Galilei 4, 27.
 Galileis Fernrohr 113.
 Galvani 151.
 Galvanische Batterie 153.
 Galvanische Elemente 152, 167ff.,
 Galvanische Kette 152.
 Galvanische Polarisation 167.
 Galvanische Versilberung usw. 166.
 Galvanischer Strom 151, 152.
 Galvanokaustik 162.
 Galvanometer 171ff.
 Galvanoplastik 166.
 Galvanoskope 170.
 Galvanostegie 166.
 Gasdichte 67, 84.
 Gase 41.
 — Ausdehnung 73.
 — spezif. Wärme 91.
 Gas-Ionen 190.
 Gasmotoren 88.
 Gasthermometer 76.
 Gauß 109.
 Gay-Lussacs Gesetz 73, 74.
 Gay-Lussacs Methode 85.
 Gebundene Elektrizität 145.
 Gedämpfte Schwingungen 177, 191.
 Gefäßbarometer 43.
 Gefrierpunkt 78, 79.
 Gefrierpunktserniedrigung 79.
 Gegenstromapparat 86.
 Geißlersche Luftpumpe 47.
 Geißlersche Röhren 118, 185, 194.
 Generatoren 179.
 Geometrischer Mittelpunkt 101.
 Geradsichtige Prismen 116.
 Geräusche 60.
 Gerichtete Größen 7.
 Gesättigte Lösungen 39.
 Gesättigter Dampf 83.
 Geschwindigkeit 5, 23.
 Gestaltelastizität 30.
 Gewicht 6, 12, 19, 35.
 Gipsblättchen 131.
 Gitter 124.
 Glaselektrizität 140.
 Gleichgewicht 13.
 Gleichstrommaschinen 179.
 Gletscher 79.
 Glimmerblättchen 133.
 Glühlicht 150, 185.
 Glühlicht 162.
 Goethe 115.
 Goldene Regel 14.
 Graham 40, 48.
 Gramm 3, 6, 12.
 Gramm-Molekül 41.
 Grammescher Ring 180.
 Grammgewicht 3, 6, 12.
 Grammophon 61.
 Gravitation 7, 12.
 Grenzwinkel 105.
 Grundeis 75.
 Grundton 62, 63.
 v. Guericke 46, 47.
 Haarhygrometer 87.
 Halbdurchlässige Membranen 40.
 Halbwertszeit 189.
 Harmonische Obertöne 62.
 Harzelektrizität 140.
 Hauptachse von Kristallen 127.
 — von Spiegeln 101.
 Hauptpunkte 109.
 Hauptstrommaschinen 181.
 Hauptschnitt 105, 127.
 Hauptstrahlen 101, 106.
 Hebel 17.
 Heberbarometer 43.
 v. Hefner-Alteneck 97, 162, 180.

- Hefnerkerze 97.
 Heißluftmaschinen 88.
 Helium 77, 81, 86, 188, 189.
 Helmholtz 10, 61, 66, 68, 69, 124, 165.
 Henrysches Gesetz 50.
 Heraklit 5.
 Heronsball 46.
 Hertzsche Versuche 196.
 Hintereinanderschaltung 157.
 Hittorfsche Röhren 185.
 Hochdruckmaschinen 89.
 Hochfrequenzströme 193ff.
 Höhenmessung, barometrische 44.
 Hofmannsche Methode 85.
 Hohlspiegel 101.
 Holländisches Fernrohr 113.
 Holtzsche Maschine 148.
 Homogene Immersion 111.
 Homogenes Licht 115.
 Hookes Gesetz 29.
 Horizontalintensität 139.
 Horror vacui 42.
 Huygens 28, 95.
 Huygens' Okular 111.
 Huygens' Prinzip 56.
 Hydraulik 32.
 Hydraulische Presse 32.
 Hydromechanik 32.
 Hydrostatische Wage 36.
 Hydrostatischer Druck 32.
 Hydrostatisches Paradoxon 32.
 Hygrometer 87, 88.
 Hygroskopische Substanzen 49, 88.
 Hypermetropie 108.
 Hypertonische Lösungen 41.
 Hypomochlion 17.
 Hypotonische Lösungen 41.
 Hysteresis 137.
 Imaginäre Bilder 99.
 Immersionssysteme 111, 125.
 Impedanz 194.
 Indifferentes Gleichgewicht 13.
 Indifferenzzone 135, 137.
 Indizierte Helligkeit 97.
 Indizierte Leistung 8.
 Induktion 176ff.
 Induktor 179, 183.
 Induktionsapparate 182.
 Induzierte Radioaktivität 189.
 Influenz 137, 145.
 Influenzmaschinen 148.
 Inhalationsapparate 49.
 Inklination 139.
 Interferenz 58, 68, 121ff., 131.
 Interferenzfarben 122, 124, 131.
 Intervall 62.
 Jollys Gasthermometer 77.
 Ionen 165, 190.
 Ionisierende Kraft 185.
 Ionisierung von Gasen 190.
 Iontophorese 166.
 Joule 8, 70, 91, 161, 200.
 Joulesche Wärme 161.
 Joulesches Gesetz 161.
 Iris 109.
 Irisblende 111.
 Isobaren 44.
 Isodynamen 139.
 Isogonen 139.
 Isoklinen 139.
 Isolatoren 141, 146.
 Isomolekulare Lösungen 39.
 Isothermie 92.
 Isotonische Lösungen 40.
 Kältemischungen 79.
 Kalkspat 127, 128.
 Kalorie 70, 89.
 Kalorimeter 90.
 Kalorische Maschinen 88.
 Kalorische Strahlen 119.
 Kammerton 65.
 Kanalstrahlen 186, 188.
 Kanalwage 33.
 Kant-Laplacesche Theorie 72.
 Kapazität s. elektrische K.
 Kapillarität 38.
 Kardinalpunkte 109.
 Kardioidkondensator 125.
 Kathode 153, 167.
 Kathodenstrahlen 185, 188, 190.
 Kationen 165.
 Katoptrik 99ff.
 Katoptrische Fernrohre 112.
 Kelvin 144.
 Keplers Fernrohr 113.
 Keplers Gesetze 10, 26.
 Kerr 199.
 Kerze 97.
 Kilogramm 3, 6.
 Kilogrammometer 8.
 Kilowattstunden 8.
 Kinetische Energie 8.
 Kinetische Gastheorie 42, 74.
 Kirchhoff 117.
 Kirchoffsche Gesetze 94, 118, 119, 158.
 Klangfarbe 61.
 Klemmenspannung 158.
 Knallgasvoltmeter 166.
 Knotenpunkte 59, 109.
 Kochen 80.
 Körperfarben 116.
 Koerzitivkraft 137.
 Kohärer 197, 198.
 Kohäsion 7, 37.
 Kohlensäureschnee 82.
 Kollektor 147, 180.
 Kollektivglas 111.
 Kollimatorrohr 117.
 Kolloide Körper 40.
 Kommunizierende Röhren 32, 37.
 Kommutator 179.
 Kompaß 139.
 Kompensationspendel 28, 73.

- Kompensator 134.
 Komplementärfarben 115.
 Komponenten 11.
 Kompressionspumpen 47.
 Kondensation 86.
 Kondensationshygrometer 88.
 Kondensationskerne 87.
 Kondensator 89, 146ff., 183.
 Kondensator 111.
 Konduktor 146.
 Konjugierte Punkte 101.
 Konkavlinse 108.
 Konkavspiegel 101.
 Konsonanz 68.
 Konstante Elemente 167.
 Konstanter Strom 167.
 Kontaktdetektoren 198.
 Kontakttheorie 151.
 Konvektion 93, 161.
 Konvexlinsen 107.
 Konvexspiegel 102.
 Konzentration 39.
 —, molekulare 80.
 Koppelung 191, 192, 193.
 Kopp 91.
 Korrespondierende Pendellänge 28.
 Kräfte, Zusammensetzung und Zerlegung 11.
 Kräftepaar 12.
 Kraft 6.
 Kraftarm 18.
 Kraftlinien 136, 142, 170.
 Kraftmoment 18.
 Kraftübertragung, elektrische 179, 182.
 Kreisförmige Polarisation 133.
 Kristalloide Körper 40.
 Kritische Geschwindigkeit 201.
 Kritischer Druck 86.
 Kritische Temperatur 86.
 Krümmungsmittelpunkt 101, 106.
 Kryoskopie 80.
 Kundtsche Staubfiguren 67.
 Kurbelheostat 155.
 Kurzschluß 161.
 Kurzsichtigkeit 108.
 Labiles Gleichgewicht 13.
 Laden 141.
 Längeneinheit 2.
 Laplacescher Faktor 66, 92.
 Last 7.
 Latente Wärme 78, 81.
 Lavoisier 1.
 Lebende Kraft 9.
 Leclanché-Element 168.
 Legierungen 39, 78.
 Leidener Flasche 147.
 Leidenfrosts Phänomen 82.
 Leistung 8.
 Leiter 141.
 — 1. Klasse 151.
 — 2. Klasse 152.
 Leitfähigkeit 93, 155.
 Lenzsches Gesetz 177.
 Lesliescher Würfel 94.
 Libelle 36.
 Licht, einfaches u. zusammengesetztes 116.
 —, Natur 95, 199.
 Licht der Zukunft 194.
 Lichteinheit 97.
 Lichtgeschwindigkeit 97.
 Lichtstärke 97.
 Lindes Maschine 86.
 Linienspektrum 118.
 Linsen 106ff.
 Lippenpfeifen 64.
 Lissajoussche Klangfiguren 69.
 Liter 3.
 Lochkamera 96.
 Löschfunken 193, 195, 198.
 Lösungen 39, 79, 81.
 Lösungswärme 79.
 Longitudinalwellen 54.
 Luft als Isolator 141.
 — als Leiter 141, 190.
 Luftballon 48.
 Luftdruck 42.
 Luftelektrizität 150.
 Luftförmige Körper 41ff.
 Luftpumpe 46ff.
 Luftströmungen 77.
 Luftthermometer 76.
 Luftverdrängungsmethode 85.
 Luftverflüssigung 86.
 Lumineszenz 96.
 Lupe 108, 110.
 Lux 97.
 „ „ 2.
 Magnete 134ff.
 —, Herstellung 138.
 —, Konstitution 137.
 —, Tragkraft 138.
 Magnetelektrische Maschinen 179.
 Magnetische Anziehung u. Abstößung 135.
 Magnetische Fluida 137.
 Magnetische Influenz 136.
 Magnetische Menge 135.
 Magnetische Sättigung 138.
 Magnetisches Feld 135.
 Magnetisches Magazin 138.
 Magnetisches Moment 135.
 Magnetismus 134ff., 176.
 Magnetnadel 139.
 — Ablenkung 170, 171.
 Magnetoinduktion 176.
 Magnetpole 135.
 Malus 130.
 Manometer 46.
 Marconi 196.
 Marconi-Schaltung 197.
 Maschinen 14ff. Vgl. Dampf-, Dynamo- usw. Maschinen.
 Masseneinheit 3.
 Massengramm 3, 6, 12.
 Massenmoment 24.
 Maßeinheiten 2. Vgl. absolute Maße u. die einzelnen Größen.
 Materie 1.
 Maximumthermometer 76.

- Maxwell 196, 199.
 Mayer 1, 10, 70, 92.
 Mechanik 4ff.
 Mechanische Wärmethorie 70.
 Mechanischer Wirkungsgrad 8.
 Mega- 3.
 Meniskus 38, 39.
 Mesothor 189.
 Metallbarometer 44.
 Metallfadenlampen 162.
 Metallmanometer 46.
 Metallspiegel 129.
 Metallthermometer 73.
 Metazentrum 35.
 Meter 2.
 Meterkerze 97.
 Meterkilogramm 8, 70.
 Meyersche Methode 85.
 Mikro- 3.
 Mikrometerschraube 17.
 Mikron 2.
 Mikrophon 184.
 Mikroskop 110, 124, 125.
 Milli- 2.
 Milliampère 156.
 Mischfarben 115.
 Mischungsmethode 90.
 Mitschwingen 191, 193.
 Mittönen 65.
 Mol 41.
 Moleküle 1.
 Molekularbewegung 126.
 Molekulare Konzentration 80.
 Molekulargewichte 67, 80, 86.
 Molekulartheorie d. Magnetismus 137.
 Molekularwärme 91.
 Mol-Ionen 190.
 Moment 18, 135.
 Monochord 63.
 Montgolfier 48.
 Morse 173.
 Motor s. Elektromotor.
 Motorgeneratoren 182.
 Multiplikatoren 171.
 Myopie 108.
 Nadelgalvanometer 171.
 Nebelbildung 87.
 Nebeneinanderschaltung 157.
 Nebenschlußmaschinen 180.
 Negative Elektrizität 140.
 Negative Kristalle 127.
 Nernstlampen 155, 162.
 Neumann 91.
 Newton 27, 55, 66, 95, 104, 115, 116.
 Newtons Bewegungs-gesetze 4.
 Newtons Fernrohr 113.
 Newtons Gravitations-gesetz 7.
 Newtons Ringe 122.
 Nicholson 36.
 Nichtleiter 141, 146.
 Nicol 128.
 Niederdruckmaschinen 89.
 Niton 189.
 Nobilis Thermosäule 164.
 Nonius 3.
 Normalspektren 124.
 Nullpunkt 74, 75.
 Numerische Apertur 112.
 Nuñez 3.
 Nutzeffekt 8.
 Oberflächendichte 145.
 Oberflächenfarben 115.
 Oberflächenspannung 38.
 Obertöne 61, 62.
 Objektiv 110.
 Öffnung 111.
 Öffnungsextrastrom 178.
 Öffnungsfunken 178, 183.
 Öffnungsstrom 178, 182.
 Öffnungswinkel 111.
 Ölimmension 112.
 Oerstedt 170.
 Ohm 155, 156, 200.
 Ohmsches Gesetz 156, 159.
 Okklusion 49.
 Oktave 62.
 Okular 110, 111.
 Okularmikrometer 113.
 Operngucker 113, 114.
 Optisch aktiv 132.
 — dicht 104.
 — positiv u. negativ 127.
 Optische Achse 106, 127, 132.
 Optische Kammer 96.
 Optischer Mittelpunkt 101, 106.
 Ordentlicher Strahl 127.
 Osmose 40, 48.
 Osmotischer Druck 40, 41, 80, 165.
 Oszillationen s. Schwingungen.
 Oszillator 196.
 Oudins Resonator 194.
 Pacinottischer Ring 180.
 Papinscher Topf 81.
 Parallaktischer Fehler 44.
 Parallelogramm d. Kräfte 11.
 Parallelschaltung 157.
 Paramagnetismus 139.
 Partiärdruck 50, 84.
 Passate 77.
 Pechblende 188.
 Peltiers Phänomen 163.
 Pendel 10, 26, 132.
 Pendeluhren 29.
 Perihel 10.
 Periskope 114.
 Permanente Magnete 137.
 Perpetuum mobile 10, 14.
 Pfeifen 64.
 Pferdekraft 8, 9.
 Phase 53.
 Phonograph 61.
 Phosphoreszenz 96, 121.
 Photochemische Wirkungen 120.
 Photographie 120.
 Photometer 97.
 Pigment 117.
 Pipette 45.
 Planetenbewegung 10, 26.
 Planparallele Platten 105.
 Planspiegel 99.
 Planté 169.
 Plastizität des Eises 79.
 Plateau 37.

- Platinschwamm 49.
 Polarimeter 134.
 Polarisation 126ff., 167.
 Polarisationsebene 126,
 129, 130.
 —, Drehung 133, 199.
 Polarisationsmikroskop
 132.
 Polarisationsstrom 167,
 169.
 Polarisationswinkel 130.
 Polarisator 128.
 Polaristrobometer 134.
 Polarität 126.
 Pole 135, 152.
 Polonium 188, 189.
 Polstärke 135.
 Positive Elektrizität 140.
 Positive Kristalle 127.
 Potentialabfall 153.
 Potential (differenz) 141ff.
 151, 153, 157, 158,
 172, 200.
 Potentialflächen 143.
 Potentielle Energie 9.
 Potenzflaschenzug 15.
 Primäre Spule 181, 182.
 Primärer Strom 176, 181,
 182.
 Prismen 105, 114.
 Prismenfernrohre 114.
 Psychrometer 88.
 Pulsierender Gleichstrom
 179.
 Pumpen s. Wasser-, Luft-
 Pumpen.
 Pyknometer 37.
 Pyrometer 76.

 Quadrantelektrometer
 144.
 Quarzlampen 163.
 Quecksilberbogenlampen
 163.
 Quecksilberluftpumpen
 47, 48.
 Quecksilberthermometer
 75.
 Quincke 68.

 Radioaktive Stoffe 188ff.
 Radiothor 189.
 Radium 188.
 Radiumemanation 189.
 Radiusvektor 10, 23.
 Ramsdens Okular 111.
 Randstrahlen 109.
 Randwinkel 38.
 Raoult'sches Gesetz 80.
 Reaktionswirkung 33.
 Réaumur 75.
 Rechte-Hand-Regel 170.
 Reduzierte Pendellänge
 28.
 Reduzierte Wägungen 48.
 Reduzierter Barometer-
 stand 44.
 Reelle Bilder 99.
 Reflektoren 112.
 Reflexion 56, 67, 94, 96,
 99ff., 129.
 Reflexionsprisma 105.
 Reflexionswinkel 57, 58,
 99.
 Refraktion 56ff., 96,
 103ff.
 Refraktoren 113.
 Regeneration 79.
 Reibung 30, 50.
 Reibungselektroskopierma-
 schine 146.
 Reibungselektrizität
 140ff.
 Reihenschaltung 157.
 Relais 173.
 Relative Feuchtigkeit 87.
 Remanenter Magnetis-
 mus 138.
 Resonanz 65, 191, 193.
 Resonanzpendel 191.
 Resonator 65, 194, 196.
 Resultante 11.
 Reversionspendel 28.
 Rheostat 155.
 Richmannsche Regel 90.
 Ringanker 180.
 Römer 97.
 Röntgenstrahlen 186, 190.
 Rolle 14.
 Rollenabstand 183.
 Ruhe 5.
 Rückschlag 150.

 Rückstoß 33.
 Rühmkorffs Induktor 183.
 Rumford 70, 97.

 Saccharimeter 134.
 Sättigung s. gesättigt.
 —, magnetische 138.
 Sättigungsdruck 81, 83, 87.
 Sättigungsmenge 83.
 Sättigungsstrom 190.
 Saiten 63.
 Saitengalvanometer 175.
 Sammellinsen 106.
 Saugen 45.
 Saugpumpen 45.
 Saussure 87.
 Schädlicher Raum 47.
 Schalenwaage 19.
 Schall 60ff.
 Schallgeschwindigkeit
 66, 92.
 Schatten 96.
 Scheinbare Ausdehnung
 73.
 Scheinbare Masse 186.
 Scheinbarer Widerstand
 194.
 Scheitel eines Spiegels 101.
 Schenkelheber 45.
 Scherenfernrohr 114.
 Schiefe Ebene 16, 22.
 Schirmwirkung des
 Eisens 136.
 Schließungsbogen, -draht
 152, 157.
 Schließungsextrastrom
 178.
 Schließungsstrom 178, 182.
 Schlitteninduktorium
 183.
 Schmelzpunkt 78.
 Schmelzwärme 78.
 Schnellwaage 21.
 Schopenhauer 115.
 Schraube 17.
 Schwarzer Körper 119.
 Schwebungen 69.
 Schweiß 82.
 Schwerkraft 6, 7, 12, 26.
 Schwerpunkt 13.
 Schwimmen 34, 36.

- Schwimmregel 170.
 Schwingungen 27, 52, 191ff.
 Schwingungsbäuche 59.
 Schwingungsdauer 27, 55, 186.
 Schwingungsebene 126.
 Schwingungsformel 27, 191, 192.
 Schwingungskreise 192, 198.
 Schwingungspunkt 28.
 Schwingungsweite 27, 53.
 Schwingungszahl 55, 116.
 Schwingungszeit 27, 53, 55.
 Schwungkraft 26.
 Schwungräder 24.
 Segners Wasserrad 33.
 Sehhöhre 114.
 Seifenblasen 122.
 Seilwellen 54.
 Seitendruck 32.
 Sekundäre Elemente 169.
 Sekundäre Prozesse 159.
 Sekundäre Spule 181ff.
 Sekundärer Strom 176, 181, 182.
 Sekunde 3.
 Sekundenerg 8.
 Sekundenpendel 28.
 Selbstinduktion 178, 192.
 Selen 155, 199.
 Sensible Flammen 65.
 Serienschaltung 157.
 Sicherungen 161.
 Sieden 80.
 Siedentopf 125.
 Siedepunkt 80, 81.
 Siedeverzug 82.
 Siemens 180.
 Silbervoltmeter 166.
 Singende Flammen 65.
 Sirene 60.
 Skala 21.
 Skalenaeräometer 37.
 Slaby 196.
 Snelliussches Gesetz 103.
 Soleil 134.
 Solenoid 174.
 Sonnenstäubchen 125.
 Sonnenwärme 72.
 Spannkraft 9, 83.
 Spannung eines Dampfes 83.
 —, elektrische 142.
 Spannungsenergie 9.
 Spannungsreihe 151, 165.
 Spannungsunterschied s. Potentialdifferenz.
 Spannungsverlust 153.
 Spektralanalyse 117.
 Spektralfarben 115, 117.
 Spektrallinien, Teilung 199.
 Spektroskop 117.
 Spektrum 115ff., 124.
 Spezifische Wärme 89ff.
 Spezifischer Widerstand 155.
 Spezifisches Gewicht 35ff., 84.
 Sphärische Aberration 109.
 Sphärische Spiegel 101ff.
 Sphäroidaler Zustand 82.
 Spiegel 99ff., 130.
 Spiegelablesung 100.
 Spiegelkondensoren 125.
 Spiegelsextant 100.
 Spiegelteleskop 112.
 Spiegelversuch 121.
 Spitzenlicht 150.
 Spitzenwirkung 145, 146.
 Sprengel 48.
 Sprengwirkung 9.
 Springbrunnen 33.
 Spulengalvanometer 175.
 Stabiles Gleichgewicht 13.
 Stabilität 34.
 Statische Elektrizität 140ff.
 Statische Energie 9.
 Statisches Moment 18.
 Stechheber 45.
 Stehende Wellen 59, 193.
 Steinhilf 174.
 Steinkohlen 72.
 Stereoskop 114.
 Stimmgabel 64.
 Stöpselrheostat 155.
 Stöße 69.
 Stoßerregung 193, 195, 198.
 Stoßfunken 193, 195, 198.
 Strahlungsgesetz 119.
 Strich 138.
 Stromarbeit 143, 160.
 Stromdichte 154.
 Stromeffekt 161.
 Stromelement 171.
 Stromintensität, -stärke 153, 158f., 171, 200.
 Stromverzweigungen 158ff.
 Stromwender 179.
 Stufenverfahren 86.
 Subtraktionsfarben 117.
 Summationsfarben 117.
 Summationsteine 69.
 Superposition 58.
 Tangentenbussole 171.
 Tarieren 20.
 Tartinische Töne 69.
 Tauchelement 168.
 Taupunkt 87, 88.
 Telegraphie 173.
 — ohne Draht 196.
 Telephon 184.
 Temperatur 74ff., 89.
 — der Tonleiter 62.
 Temporäre Magnete 137.
 Terrestrisches Fernrohr 113.
 Teslialicht 194.
 Teslaströme 194.
 Thermochrose 94.
 Thermoelektrische Spannungsreihe 163.
 Thermoelektrizität 163.
 Thermometer 73, 75ff.
 Thermophore 162.
 Thermomultiplikator 164.
 Thermosäule 164.
 Thermosflaschen 93.
 Thermostrome 164.
 Thomson 144.
 Thomsons Schwingungsformel 192.
 Thor-Emanation 189, 190.
 Thorium 189.
 Tierische Elektrizität 146.
 Töne 60ff.

- Tönende Funken 198.
 Töplers Maschine 148.
 Tonleiter 62.
 Torricellis Theorem 33.
 — Vakuum 42.
 Totale Reflexion 104.
 Tote Punkte 24.
 Trägheitsgesetz 4.
 Trägheitsmoment 24.
 Transformatoren 181.
 Transversalwellen 54.
 Trockenelemente 169.
 Trockensysteme 111.
 Trommelanker 180.
 Turbinen 33, 89.
 Turmalin 128.

Überhitzen 82.
 Überhitzter Dampf 84.
 Übersättigte Lösungen 39.
 Ultramikroskopie 125.
 Ultrarote Strahlen 119.
 Ultraviolette Strahlen 119, 190, 199.
 Umformer 182.
 Unabhängigkeitsprinzip 4.
 Undulationstheorie 95.
 Ungedämpfte Schwingungen 191, 193.
 Ungesättigter Dampf 84.
 Unterbrecher 174, 183.
 Unterkühlen 78.
 Unterstützungspunkt 17.
 Uran 188, 189.
 Urometer 37.

Vakuummantelgefäße 93.
 Van't Hoff'sche Gesetze 41.
 Ventilation 77.
 Verbrennung 71.
 Verbundmaschinen 180.
 Verdampfung 80.
 Verdampfungswärme 81.
 Verdichtungen 54.
 Verdünnungen 54.
 Verdunsten 82.
 Verflüssigung 86.
 Vernier 3.
 Vibrograph 61.
 Viertelwellenblättchen 133.

Virtuelle Bilder 99, 102, 106.
 Viskosität 50.
 Volt 143, 153, 156, 168, 200, 201.
 Volta 143, 151.
 Voltainduktion 176.
 Voltameter 166.
 Voltas Säule 153.
 — Spannungsreihe 151.
 Volt-Ampère 161, 200.
 Volt-Coulomb 160, 200.
 Voltmeter 172.
 Volumen 35.
 Volumselastizität 30, 31.

Wärmefärbung 94.
 Wärmekapazität 90.
 Wärmekonvektion 93.
 Wärmekraftmaschinen 88.
 Wärmeleitung 92.
 Wärmestrahlung 93.
 Wärmethorie, mechanische 70.
 Wärmezerstreuung 71.
 Wage 19ff.
 Wagnerscher Hammer 174, 183.
 Wasser, absorbierte Luft 50.
 —, Ausdehnung 74, 79.
 Wasserkalorimeter 90.
 Wasserluftpumpen 48.
 Wasserpumpen 45.
 Wasserrad 33.
 Wasserstandgläser 33.
 Wasserturbinen 33.
 Wasserwaage 33.
 Wasserwellen 51.
 Wasserzersetzung 164.
 Watt 8, 161, 200.
 Wattstunden 8, 161.
 Weber 52.
 Wechselströme 177, 179.
 Wechselstrommaschinen 179.
 Wechselwirkung 4.
 Wehnelt-Unterbrecher 183.
 Weitsichtigkeit 108.
 Wellenanzeiger 197.

 Wellenlänge 53, 116, 119, 122, 124, 188, 196.
 Wellenlehre 51ff.
 Wellrad 16.
 Werner 3.
 Wesentlicher Widerstand 157.
 Weston 175.
 Wetterbestimmung 44.
 Wheatstonesche Brücke 159.
 Widerstand 7, 31, 154ff., 194, 200.
 Widerstandseinheit 155.
 Widerstandskästen 155.
 Wien 193, 196.
 Wilmhurst-Maschine 148.
 Winde 77.
 Winkelgeschwindigkeit u. -beschleunigung 23, 24.
 Winkelhebel 17.
 Wirbelströme 177.
 Wucht 9, 24.
 Wurfbewegung 22.

X-Strahlen 186, 190.

Zambonische Säule 153.
 Zeemannsches Phänomen 199.
 Zeichnungsvermögen 110.
 Zeigerwaage 21.
 Zeiteinheit 3.
 Zentimeterdyn 8.
 Zentimeter-Gramm-Sekunden-System 3.
 Zentralbewegung 25.
 Zentralheizung 93.
 Zentriertes System 109.
 Zentrifugalkraft 26.
 Zentrifugen 26.
 Zentripetalkraft 25.
 Zerstreuungslinsen 106.
 Zerstreuungsweite 108.
 Zirkulare Polarisation 132.
 Zsigmondy 125.
 Zungenpfeifen 65.
 Zusammenziehung bei Erwärmung 74, 75.
 Zustandsgleichung der Gase 74.

Verzeichnis der anderen Werken entnommenen Abbildungen.

Es stammen aus:

- Auerbach, Die Physik im Kriege (Jena, Fischer): Fig. 180.
Berliner, Lehrbuch der Experimentalphysik in elementarer Darstellung (Jena, Fischer): Fig. 70.
Dressel, Lehrbuch der Physik (Freiburg, Herder): Fig. 38, 48, 49, 72.
Grimsehl, Lehrbuch der Physik (Leipzig, Teubner): Fig. 35, 159.
Jochmann-Spies, Grundriß der Experimentalphysik (Berlin, Winckelmann u. Söhne): Fig. 104, 131, 175.
Höfler, Physik (Braunschweig, Vieweg u. Sohn): Fig. 34.
Holzt, Die Schule des Elektrotechnikers (Leipzig, Moritz Schäfer): Fig. 126, 153, 169.
Kayser, Lehrbuch der Physik (Stuttgart, Enke): Fig. 101.
Kittler, Handbuch der Elektrotechnik (Stuttgart, Enke): Fig. 141.
Lecher, Lehrbuch der Physik (Leipzig, Teubner): Fig. 16, 71, 103, 113.
Lommel-König, Lehrbuch der Experimentalphysik (Leipzig, Barth): Fig. 154.
Müller Pouillet, Lehrbuch der Physik (Braunschweig, Vieweg u. Sohn): Fig. 73, 83, 114, 115, 116, 145.
Reis, Lehrbuch der Physik (Leipzig, Barth): Fig. 24.
Ruhmer, Funkeninduktoren (Leipzig, Hachmeister u. Thal): Fig. 133.
Zehnder, Grundriß der Physik (Tübingen, Laupp): Fig. 155.

Ferner aus den Katalogen der Firmen:

- Ernecke (Berlin SW 11): Fig. 128, 146, 173, 177.
Leppin u. Masche (Berlin SO 16): Fig. 134, 137, 149, 172.
Reiniger, Gebbert u. Schall (Erlangen): Fig. 148, 163.
Windler (Berlin N 24): Fig. 20.
Zeiß (Jena): Fig. 114.

Verlag von Urban & Schwarzenberg in Berlin und Wien.

Von demselben Verfasser erschien bei Urban & Schwarzenberg
in Berlin und Wien in 10. und 11. Auflage:

Medizinische Terminologie.

Ableitung und Erklärung
der
gebräuchlichsten Fachausdrücke aller Zweige
der Medizin und ihrer Hilfswissenschaften.

Mit 309 Abbildungen.

1308 Spalten in Lex.-Oktav. Preis geb. M. 33.—

dazu der Verlagsteuerzuschlag von 20% und der jeweils geltende Sortimentsteuerzuschlag.

Einige Urteile von Fachzeitschriften:

„Das vorliegende Werk sollte jeder Studierende und Arzt besitzen. Es stellt ein kurzes Konversationslexikon für Mediziner dar, denn fast alle wichtigen Namen und Operationsmethoden, Instrumente und Verfahren finden sich in diesem reichhaltigen und einzig dastehenden Werke.“

(Zentralblatt für innere Medizin.)

„Ein Lexikon, das nach so neuen und praktischen Gesichtspunkten abgefaßt ist und das sich in der Tat unentbehrlich zu machen weiß, hat nicht mehr den Charakter einer Kompilationsarbeit: es wird vielmehr zu einem Kunstwerk.“

(II Policlinico.)

„Das Buch ist einzig in seiner Art. Es hat eine wirkliche Lücke ausgefüllt und kann nur auf das angelegentlichste empfohlen werden.“

(II Morgagni.)

„Dieses heute unentbehrlich gewordene Werk.“

(Berliner klinische Wochenschrift.)

„Erstaunlich ist die Fülle der Stichworte und des Wissens, das in den kurzen, klaren Erläuterungen steckt. G. wünscht Ärzte, Studierende und Laien zu seinen Lesern. Allen kann das Buch empfohlen werden. Es weiß alles und gibt jedem Fragenden gern eine gute Antwort.“

(Schmidts Jahrbücher.)

Anatomie, pathologische, Leitfaden. Für Zahnheilkunde-Studierende und Zahnärzte. Von Prof. Dr. R. Oestreich. Geb. M. 5.—.

Der Leitfaden wird dem Studierenden eine ganz vorzügliche Hilfe sein, weil er mit scharfen, klaren und übersichtlichen Strichen das Gebiet der Pathologie und pathologischen Anatomie umgrenzt, in dem sich der Studierende vertraut fühlen muß. (Deutsche zahnärztl. Wochenschrift.)

Chemie, Grundriß. Von Prof. Dr. phil. et med. Carl Oppenheimer.
Anorganische Chemie. 10. Auflage. Geb. M. 5.60.

Der kleine Grundriß kann demjenigen, der auf engstem Raum eine erste Orientierung auf dem Gebiete der anorganischen Chemie wünscht, auch in seiner neuen Gestalt wiederum sehr empfohlen werden. (Deutsche med. Wochenschrift.)

Organische Chemie. 10. Auflage. Geb. M. 4.—.

Das schnelle Erscheinen der Auflage von Oppenheimers Leitfaden zeugt wieder von den Vorzügen und der günstigen Aufnahme des Büchleins. Dem Charakter in erster Linie als Repetitorium entsprechend, ist der prägnante Inhalt bis auf die neueste Zeit sorgfältig ergänzt; das wird dazu beitragen, dem Leitfaden namentlich in den Kreisen der Medizinstudierenden neue Freunde zu erwerben. (Deutsche med. Wochenschrift.)

Elektrokardiographie, klinische, Leitfaden. Von Prof. Dr. Boruttan und Geh. San.-Rat Prof. Dr. Stadelmann. Mit 24 Textabbildungen. M. 2.—.

Das Heft gibt in kürzester Form einen sehr klaren Überblick über Grundsätzliches und Technik des Elektrokardiogramms, schildert die Entstehung des normalen Elektrokardiogramms und bringt eine präzise Zusammenfassung seiner Form bei Lage- und Größenänderungen des Herzens, bei Störungen der Erregungsleitung und bei Arrhythmien. Zahlreiche schematische Abbildungen erläutern den Text zweckmäßig. Es ist ein vortrefflicher Leitfaden für Anfänger, die sich einarbeiten wollen. (Deutsche med. Wochenschrift.)

Elektromechanik und Elektrotechnik. Von Dr. F. Grünbaum, Elektroingenieur. Mit 203 Abbildungen. M. 7.—, geb. M. 8.40.

Dem Röntgenologen und Elektrobiologen von Fach wird das Werk sehr nützlich sein, die darin eine Fülle Belehrung in faßlicher Form finden werden. (Deutsche med. Wochenschrift.)

Entwicklungsgeschichte des Menschen, Kompendium. Mit Berücksichtigung der Wirbeltiere. Von Prof. Dr. L. Michaelis. Mit 50 Abbildungen und 2 Tafeln. **7. Auflage.** Geb. M. 4.40.

Das Kompendium enthält in nuce alles Wissenswerte aus dieser täglich mehr in den Vordergrund tretenden Disziplin und steht, was man bekanntlich den Kompendien oft nicht nachsagen kann, auf ganz modernem wissenschaftlichen Standpunkt... (Deutsche med. Wochenschrift.)

Geburtshilflicher Operationskurs, Leitfaden. Von Geh. Rat Prof. Dr. A. Döderlein. Mit 172 zum Teil farbigen Abbildungen. **11. Auflage.** Geb. M. 4.—.

... So ist in der Tat dieses Buch ein unentbehrliches Hilfsmittel des Unterrichts und ein trefflicher Ratgeber für den praktischen Arzt geworden... (Zentralblatt für Gynäkologie.)

Geburtshilf.-gynäkologische Untersuchung, Leitfaden. Von Prof. Dr. Karl Baisch. Mit 97 teils farbigen Abbildungen. **3. Auflage.** Geb. M. 7.20.

Dieses Lehrbuch ist aller Beachtung wert, nicht nur von seiten Studierender, sondern und vielleicht vor allem von seiten älterer Praktiker, die gern eine Auffrischung der veralteten Untersuchungsmethoden erleben möchten. (Medizinische Klinik.)

Gynäkologischer Operationskurs, Leitfaden. Von Dr. E. G. Orthmann. Mit 95 teils farbigen Abbildungen. **2. Auflage.** Geb. M. 4.50.

... Es ist gewiß nicht leicht, den Gang einer Operation klar und kurz darzustellen. Die sehr geschickte Schreibweise des Verfassers, verbunden mit einfachen, aber auf den ersten Blick verständlichen und dabei nicht zu schematischen Zeichnungen wird auch dem Anfänger sehr schnell das Verstehen selbst komplizierter Operationen ermöglichen... Das kleine Werk wird sicherlich seitens der Ärzte und Studierenden die Beachtung finden, die es in vollem Maße verdient. (Zentralblatt für Gynäkologie.)

==== Auf vorstehende Werke 30% Teuerungszuschlag. ====

Hämatologie, klinische, Taschenbuch. Von Dr. A. von Domarus.
2. verbesserte Auflage. Mit 8 Textabbildungen, einer farbigen Doppeltafel
 und einem Anhang: Röntgenbehandlung bei Erkrankungen des Blutes und der
 blutbereitenden Organe von Prof. Dr. H. Rieder. Geb. M. 5.80.

In diesem Büchlein wird in Kürze die gesamte Hämatologie abgehandelt. Der Verfasser
 hat vollauf den beabsichtigten Zweck erreicht, Studierenden und Arzt in elemen-
 tarer und doch für die hauptsächlichsten klinischen Untersuchungen in hinreichender
 Weise in die Grundbegriffe der Hämatologie einzuführen. (Klinisch-therapeut. Wochenschrift.)

Kinderheilkunde, Kompendium. Von San.-Rat Dr. Paul Berwald. Geb. M. 6.—.

Der in knapper Form zusammengedrückte reiche Inhalt gibt ein klares Bild von dem heu-
 tigen Stande der Kinderheilkunde. Das Buch sei allen Kollegen aufs wärmste empfohlen.
 (Mecklenburgisches Korrespondenzblatt.)

Lichtbehandlung, Kompendium. Von Dr. H. E. Schmidt. **2. umgear-
 beitete und erweiterte Auflage.** Mit 38 Abbildungen. Geb. M. 3.—.

In einem handlichen Bändchen gibt der langjährige Leiter der Lichtabteilung der Lesser-
 schen Klinik eine vor allem die praktischen Bedürfnisse berücksichtigende Darstellung der Licht-
 behandlung. . . Die Darstellung ist klar und präzise. Die guten Abbildungen erläutern den
 Gebrauch der verschiedenen Apparate und geben auch therapeutische Resultate wieder. Wer
 lichttherapeutisch arbeiten will, dem ist das Büchlein bestens empfohlen.
 (Deutsche med. Wochenschrift.)

Medizinalstatistik, Einführung. Von Prof. Dr. Karl Kißkalt. Mit 4 Ab-
 bildungen. M. 6.60, geb. M. 8.—.

Es ist eine leicht faßliche Anleitung zum selbständigen Arbeiten für denjenigen, der sich
 mit dem schwierigen Gegenstand vertraut machen will. Auch als Praktikum eignet es sich vor-
 züglich zur Benutzung in den betreffenden Kursen.

Neurologie, Einführung. Von Dr. Th. Becker. M. 4.—.

Das Büchlein hält, was es verspricht, und führt in klarer, übersichtlicher Weise in das
 schwierige Spezialgebiet ein. Sehr wertvoll für den Praktiker ist z. B. die geschickte Zusammen-
 stellung sämtlicher Reflexe und ihrer symptomatischen Bedeutung.
 (Medizinische Klinik.)

Physikalische Chemie, Grundriß. Von Dr. Max Roloff. Mit 13 Abbildungen.
 M. 5.—, geb. M. 6.—.

Das klar geschriebene gründliche Werk verdient weiteste Verbreitung. (Med. Klinik.)
 Ich wüßte nicht, welches Buch ich für den angegebenen Zweck mehr empfehlen sollte als
 dieses. (Zeitschr. f. Elektrochemie.)

Physikalisches Praktikum des Nichtphysikers. Theorie und
 Praxis der vorkommenden Aufgaben für alle, denen Physik Hilfswissenschaft ist.
 Von Dr. F. Grünbaum und Dr. R. Lindt. Mit 131 Abbildungen. **2. erwei-
 terte und verbesserte Auflage.** Geb. M. 6.—.

Für Nichtphysiker, Techniker, Mathematiker, Chemiker und nicht zuletzt Mediziner
 erscheint das klar geschriebene Werk sehr geeignet, sowohl zum Gebrauche bei praktischen
 Kursen, als auch später, wenn sich wirklich im Berufe eine physikalische Untersuchung nötig
 macht. Das Buch enthält einen reichen Schatz von Aufgaben aus allen Teilen der Physik, deren
 Lösung durch klare Darlegung des Grundgedankens der Aufgabe jedem physikalisch elementar
 Vorgebildeten ermöglicht wird. Durch zahlreiche Abbildungen und Tabellen wird die Brauch-
 barkeit des Werkes erhöht.
 (Schmidts Jahrbücher d. ges. Medizin.)

Physikalische Therapie, Kompendium. Von Dr. B. Buxbaum. Mit
 73 Abbildungen. M. 8.—, geb. M. 9.—.

Dieses Werk des rühmlichst bekannten Verfassers bietet dem ärztlichen Publikum ein Lehr-
 buch der physikalischen Heilmethoden, in dem Technik, allgemeine Wirkungsweise und spezielle
 Medikation in scharf umschriebener Form klar abgehandelt worden sind. . . Auch dieses
 Buch wird bald große Verbreitung finden und dazu beitragen, die physikalischen Heilmethoden
 zum Allgemeingut der Ärzte zu machen.
 (Monatsschrift für orthopäd. Chirurgie.)

Physiologie, Grundriß. Von Prof. Dr. Carl Oppenheimer und Prof. Dr. R.
 Weiß. Erster Teil: Biochemie. Von Prof. Dr. Carl Oppenheimer. **2. Auf-
 lage.** Geb. M. 16.—.

Wer eine kurzgefasste, den Bedürfnissen des Praktikers Rechnung tragende Orientierung
 dieses Gebietes wünscht, dem kann dieses neue Werk Oppenheimers nicht warm genug zur
 Anschaffung empfohlen werden.
 (Münchener med. Wochenschrift.)

Zweiter Teil: Biophysik. Von Prof. Dr. O. Weiß. (Erscheint im Sommer 1919.)

==== Auf vorstehende Werke 30% Teuerungszuschlag. ====

Psychiatrie, Einführung. Mit besonderer Berücksichtigung der Differentialdiagnose der einzelnen Geisteskrankheiten. Von Dr. Th. Becker. Geb. M. 4.—

Das treffliche Büchlein, auf das wir bei seinem ersten Erscheinen empfehlend hinweisen konnten, hat sich das Bürgerrecht in der didaktischen Literatur erworben. Für den Anfänger gibt es kaum etwas Besseres, es ist kurz und doch gehaltvoll, es bereitet auf das wissenschaftliche Erfassen der Psychiatrie vor und macht mit der praktischen Handhabung derselben vertraut. (Deutsche Medizinal-Zeitung.)

Röntgendiagnostik innerer Krankheiten, Grundriß. Für Ärzte und Studierende von Dr. Fritz Munk. Mit 155 Abbildungen. Geb. M. 7.50.

Der Autor ist in vorzüglicher und mustergültiger Weise seiner Aufgabe gerecht geworden und hat dem vielbeschäftigten und dem angehenden Praktiker ein Werk in die Hand gegeben, das ihn befähigt, die Ergebnisse der Röntgendiagnostik kennen zu lernen und sich dieser diagnostischen Methode zum eigenen und der Kranken Nutzen bedienen zu können. (Klinisch-therapeut. Wochenschrift.)

Bakteriologie, Einführung in das Studium. Von Geh. Med.-Rat Prof. Dr. Carl Günther. Mit 93 Photogrammen. **6. vermehrte und verbesserte Auflage.** M. 13.—, geb. M. 15.80.

Seit dem ersten Erscheinen des Güntherschen Lehrbuches sind nur acht Jahre verflossen, und schon erscheint es in sechster Auflage, ein redender Beweis dafür, daß es in vollem Maße den Ansprüchen gerecht geworden ist, die an ein Lehrbuch der Bakteriologie und der bakteriologischen Technik für Ärzte und Studierende zu stellen sind. (Deutsche med. Wochenschrift.)

Cystoskopie, Handbuch. Von Geh. Med.-Rat Prof. Dr. Leopold Casper, Dozent der Universität Berlin. **3. umgearbeitete Auflage.** Mit 172 Abbildungen und 22 Tafeln in Dreifarbendruck. Geb. M. 25.—

Das Caspersche Lehrbuch wird in der neuen Form zu den alten neue Freunde erwerben. Kein Arzt, der sich mit cystoskopischen Studien beschäftigt, wird ohne dasselbe auskommen können. (Klinisch-therapeut. Wochenschrift.)

Diagnostik, medizinische, zur bakteriologischen, chemischen und mikroskopischen Untersuchung menschlicher Sekrete und Exkrete. Ein Leitfaden für Studierende und Ärzte. Von Dr. C. S. Engel. Mit 156 Textfiguren. Geb. M. 8.—

Das Buch gibt eine sehr gute, elegant geschriebene Darstellung der bakteriologischen, serologischen, mikroskopischen und chemischen Untersuchungsmethoden. Die Schilderung der Technik verrät überall den erfahrenen Laboratoriumspraktiker, der die Fehlerquellen kennt und alle Kunstgriffe anzuwenden versteht. . . . (Deutsche med. Wochenschrift.)

Entwicklungsgeschichte, Lehrbuch. Von Prof. Dr. H. Trierpel. Mit 168 Abbildungen. Geb. M. 7.50.

„Kurz und bündig“ gibt der Verfasser auf nicht ganz 14 Bogen eine erschöpfende Einführung in das gewaltige Forschungsgebiet der tierischen und menschlichen Entwicklungsgeschichte und gibt sie in so übersichtlicher Darstellung, daß man kein Kapitel ohne Belehrung durcharbeiten wird. (Berl. klin. Wochenschrift.)

Geschlechtskrankheiten, Lehrbuch. Für Ärzte und Studierende von Prof. Dr. M. Joseph. Mit 66 Textabbildungen, 1 schwarzen, 3 farbigen Tafeln, nebst einem Anhang von 103 Rezepten. **7. erweiterte und vermehrte Auflage.** M. 7.20, geb. M. 8.20.

. . . Das Josephsche Lehrbuch stellt alles in allem ein Werk dar, welches dem praktischen Arzte und speziell dem Studierenden eine knappgefaßte, doch außerordentlich klar geschriebene und alle neueren Errungenschaften der Gebiete kritisch beleuchtende Darstellung gibt. Trotz der zahlreichen Neuerscheinungen von Lehrbüchern der Dermato-Syphilodologie darf dem Werke, das speziell die Interessen des Praktikers und Studenten berücksichtigt, eine günstige Prognose bezüglich weiterer Auflagen gestellt werden. Es verdient unsere vollste Empfehlung. (Reichs-Medizinal-Anzeiger.)

Gonorrhoe, chronische, der männlichen Harnröhre und ihre Komplikationen. Von Prof. F. M. Oberländer und Prof. A. Kollmann. **2. Auflage.** Mit 175 Abbildungen und 7 Tafeln. M. 20.—, geb. M. 21.50.

. . . Es wäre nur auf das lebhafteste zu begrüßen, wenn dieses ausgezeichnete Werk, dessen therapeutischer Teil soeben erschienen ist, möglichst viel Verbreitung finden und weiteren Kreisen die Kenntnis der endoskopischen Behandlungsmethode vermitteln würde. (Wiener klin. Rundschau.)

==== Auf vorstehende Werke 30% Teuerungszuschlag. ====

Methodik, Chemische für Ärzte. Von Prof. Dr. Carl Oppenheimer.
2. Auflage, bearbeitet von Dr. W. Glikin. Geb. M. 2.40.

Eine empfehlenswerte Anleitung zum praktischen Arbeiten für den Arzt, der ohne spezial-chemische Ausbildung doch auch Interesse an klinisch-chemischen Untersuchungen hat, die den Rahmen einer Eiweiß- und Zuckerprobe überschreiten. (Archiv f. physikal. Medizin.)

Methodik, Therapeutische, in der inneren Medizin, Grundlinien. Für Ärzte und Studierende. Von Prof. Dr. J. Boas. M. 2.80.

... Wenn ein Rezensent über eine 100 Seiten umfassende Broschüre ausführlich berichtet, so tut er es nur, wenn ihm dessen Lektüre Eindruck gemacht und den Wunsch geweckt hat, sie möglichst vielen zu verschaffen. Darum sei diese Schrift jeden an seiner Vervollkommnung arbeitenden Arzt bestens empfohlen. Er wird, vielleicht unter Protest, Anregung empfangen. (Medizinische Klinik.)

Nervenpunktlehre. Eine neue Erklärung der nervösen Leiden und ein Mittel, ihnen erfolgreich entgegenzutreten. Von Dr. A. Cornelius. Band I. M. 3.60, Bd. II. M. 7.—.

Man kann nur wünschen, daß Cornelius' Bücher und Lehren allseitig die gebührende Beachtung finden. (Klinisch-therapeut. Wochenschrift.)

Selbstmordverdacht und Selbstmordverhütung. Eine Anleitung zur Prophylaxe für Ärzte, Geistliche, Lehrer und Verwaltungsbeamte. Von Dr. med. Placzek. M. 6.—.

Die Ausführungen des Verfassers sind im hohen Grade beachtenswert und können allen Beteiligten, besonders den beamteten Ärzten, als wertvolle Anregung und Grundlage für die Tätigkeit und Weiterforschung auf diesem wichtigen Gebiete dienen. (Zeitschr. f. Med.-Beamte.)

Studium, Medizinisches. Neuordnung. Von Geh. San.-Rat Prof. Dr. J. Schwalbe. M. 4.80.

Der Niederschlag der gesammelten Erfahrungen und literarischen Studien des Verfassers über die Ausbildung des Mediziners ist in der vorliegenden Broschüre zusammengefaßt und wird in hohem Maße das Interesse der Universitätslehrer, der Praktiker und vor allem der Studierenden erregen.

Überempfindlichkeit, krankhafte, und ihre Behandlung. Von Geh. Med.-Rat Prof. Dr. A. Goldscheider. M. 3.60.

Die große Zahl der Erkrankungen, die in einer krankhaften Überempfindlichkeit ihren Ursprung haben, veranlassen den berühmten Kliniker, seine Erfahrungen niederzulegen und neue Wege zur Behandlung anzugeben.

Zeugung beim Menschen, Monographien. Von Dr. H. Rohleder.

Band I: Die normale, pathologische und künstliche Zeugung beim Menschen.
2. verbesserte Auflage. M. 10.50, geb. M. 12.—.

Band II: Die Zeugung unter Blutsverwandten. M. 4.20, geb. M. 5.—.

Band III: Die Funktionsstörungen beim Manne. M. 5.80, geb. M. 6.80.

Band IV: Die Funktionsstörungen beim Weibe. M. 2.80, geb. M. 3.60.

Band V: In Vorbereitung.

Band VI: Künstliche Zeugung und Anthropogenie. M. 8.—, geb. M. 9.80.

Rohleder hat mit dem vorliegenden Werke geradezu erschöpfend ein Gebiet behandelt, das für die Ärzte ebenso wichtig ist, wie es ihnen unbekannt zu sein pflegt. (Klinisch-therapeut. Wochenschrift.)

v. Ziemßen's Rezeptfaschenbuch für Klinik und Praxis. **11. neu bearbeitete Auflage**. Von Dr. H. Rieder und Dr. M. Zeller. Taschenformat. Geb. M. 5.60.

Das Büchlein will den oft mangelhaften Kenntnissen der jungen Ärzte in der Arzneiverordnungslehre, Drogenlehre und Arzneimittellehre zu Hilfe kommen und ihnen eine Anleitung zur Ordination geben. Durch Angabe der Preise bei den Drogen und eine Pharmacopoea oeconomica ist den Sparsamkeitsrücksichten Rechnung getragen, dabei aber die Pharmacopoea elegans nicht vergessen. ... Die hohe Auflage beweist, daß das Büchlein ein Bedürfnis in vortrefflicher Weise erfüllt. (Sächsisches Korrespondenzblatt.)

==== Auf vorstehende Werke 30% Teuerungszuschlag. ====

GEORG THIEME / VERLAG / LEIPZIG

Krankheiten und Ehe.

Darstellung der Beziehungen
zwischen Gesundheitsstörungen und Ehegemeinschaft.

Herausgegeben von

Geh. Med.-Rat Prof. Dr. C. von Noorden und Dr. Kaminer.

Zweite, neu bearbeitete und vermehrte Auflage.

M. 27.—, geb. M. 28.40.

Jetzt, wo es gilt, die schweren Verluste, die der Krieg gerade dem gesunden und kräftigsten Teile der Bevölkerung geschlagen hat, zu ersetzen und einen gesunden, kräftigen und widerstandsfähigen Nachwuchs zu erzielen, ist es Pflicht, bei dem Eingehen der Ehe auf die psychische Konstitution und den Gesundheitszustand, auf Abstammung und erbliche Belastung Rücksicht zu nehmen. Um dieses zu erzielen, ist es notwendig, daß die Ärzte sich mit allen einschlägigen Verhältnissen vertraut machen und ferner, daß sie bei der beabsichtigten Verheiratung vor der Eheschließung als Ratgeber (Soziale Hygiene für praktische Medizin.) zugezogen werden.

Therapeutische Technik für die ärztliche Praxis.

Ein Handbuch für Ärzte und Studierende.

Herausgegeben von

Prof. Dr. Julius Schwalbe, Geh. San.-Rat in Berlin.

Vierte, verbesserte und vermehrte Auflage.

Mit 626 Abbildungen.

M. 24.—, geb. M. 26.50.

Wenn ein Werk von dem Umfange des vorliegenden, ein Werk, das scheinbar einen engumschriebenen Teil des ärztlichen Handelns im Titel zum Ausdruck bringt, seit kaum sieben Jahren drei Auflagen erlebt, so ist damit allein schon erwiesen, wech einem tatsächlichen Bedürfnis des praktischen Arztes der Herausgeber gerecht geworden ist. Es wird wohl kein zweites Werk gleichen Inhaltes geben, das dem Schwalbeschen Buche ebenbürtig an die Seite gestellt werden könnte. (Wiener klinische Wochenschrift.)

Behandlung akut bedrohlicher Erkrankungen.

Ein Lehrbuch für die Praxis.

Herausgegeben von

Prof. Dr. Julius Schwalbe, Geh. San.-Rat in Berlin.

Band I. Mit 26 Abbildungen.

M. 12.—, geb. M. 13.20.

„Ein Lehrbuch für die Praxis“ nennt der Herausgeber sein Werk, und diesen Namen führt das Buch mit vollem Recht. Die bekannten Verfasser, die — ein jeder auf seinem Spezialgebiete — mit dem ganzen Rüstzeug der neuesten Errungenschaften der Wissenschaft an ihre Aufgabe herangetreten sind, haben in allen Aufsätzen, die uns im ersten Band vorliegen, ganze Arbeit gemacht und uns etwas außerordentlich Wichtiges geboten. . . . Wir können das Studium des ganzen Werkes nur dringend empfehlen. Die Ausstattung ist vortrefflich. (Schlesische Ärztekorrespondenz.)

==== Auf vorstehende Werke 30% Teuerungszuschlag. ====

Buchdruckerei Richard Hahn (H. Otto) in Leipzig.

Hautkrankheiten, Lehrbuch. Für Ärzte und Studierende von Prof. Dr. M. Joseph. Mit 83 Abbildungen, 2 schwarzen und 3 farbigen Tafeln, nebst Anhang von 242 Rezepten. **S. vermehrte und verbesserte Auflage.** M. 7.—, geb. M. 8.—.

Die ganze Anlage dieses Werkes befähigt den Studierenden, sich über den betreffenden Gegenstand vollständig zu informieren . . . Das Josephsche Lehrbuch gehört unbedingt zum Studium jedes Arztes. (Dermatolog. Wochenschrift.)

Hydrotherapie, Lehrbuch. Von Dr. B. Buxbaum. **2. vermehrte Auflage.** Mit 34 Abbildungen und 24 Tabellen. M. 8.—, geb. M. 9.—.

Innerhalb zweier Jahre hat sich die Notwendigkeit einer Neuauflage des Buxbaumschen Lehrbuchs ergeben, und in textlich wie illustrativ vervollkommener Form liegt das Werk vor uns . . . Unter den modernen Lehrbüchern der Hydrotherapie darf es als eins der ersten und besten genannt werden. (Deutsche Ärzte-Zeitung.)

Immunodiagnostik und Immunotherapie, Methoden, und ihre praktische Verwertung. Von Prof. Dr. Julius Citron, Assistent an der II. med. Univ.-Klinik, Berlin. **Dritte, erweiterte und verbesserte Auflage.** Mit 35 Textabbildungen, 2 farbigen Tafeln und 12 Kurven. Geb. M. 17.—.

Zweifellos wird sich das zur Einführung in die Methodik der Immunoforschungen und die Technik bei ihrer praktischen Verwertung vorzüglich geeignete Buch auch in seiner neuen Gestalt unter den Klinikern viele Freunde erwerben. (Deutsche med. Wochenschrift.)

Leberkrankheiten, Lehrbuch. Für Studierende und Ärzte von Prof. Dr. C. A. Ewald. Mit 37 Textabbildungen und 7 Tafeln in Vierfarbendruck. M. 10.—, geb. M. 11.—.

Dieses Buch nimmt eine besondere Stellung ein; es ist ein lebendiges Buch, aus eigener großer Erfahrung heraus geschrieben. Ich kann seine Lektüre allen Ärzten dringend empfehlen. (Berliner klin. Wochenschrift.)

Lungenkrankheiten, Lehrbuch. Von Prof. Dr. A. Bacmeister. Mit 87 Textabbildungen und 4 farbigen Tafeln. M. 11.—, geb. M. 12.50.

Ein für den Praktiker sehr brauchbares Buch, da es alles für die Erkenntnis und Behandlung der Lungenkrankheiten Nötige enthält . . . Jedenfalls empfehle ich das Werk wärmstens gerade für den Gebrauch des Praktikers. (Korrespondenzbl. für Sachsen.)

Operationslehre, urologische. Von Prof. Dr. Voelcker und Prof. Dr. Wossido. Erste Abteilung. Mit 225 teils farbigen Abbildungen und 3 farbigen Tafeln. M. 19.—. (Zweite Abteilung erscheint voraussichtlich im Herbst 1919.)

Der vorliegende 1. Teil des Werkes, für das die Herausgeber hervorragende Mitarbeiter gefunden haben, beschreibt eingehend die Einführung von Instrumenten in Harnröhre und Blase, die Operationen an Harnröhre, Prostata und Samenblase, sowie die intravesikale Operationen an der Blase. Jedes der Kapitel bringt zunächst eine kurze chirurgisch-anatomische Übersicht über das betreffende Gebiet und behandelt dann alle neueren Operationsmethoden. Die Darstellung ist kurz und knapp; die vielen Abbildungen, z. T. im Zweifarbendruck, ermöglichen eine schnelle, leichte Orientierung. Das Werk wird nicht nur dem Urologen, sondern jedem Chirurgen ein brauchbares Handbuch zum Nachschlagen über die einzelnen urologischen Operationen sein. (Deutsche militär-ärztliche Zeitschrift.)

Organotherapie, Lehrbuch. Mit Berücksichtigung ihrer anatomischen und physiologischen Grundlagen. Herausgegeben von Hofrat Prof. Dr. J. Wagner von Jauregg, Wien, und Privatdozent Dr. Gustav Bayer, Innsbruck. Mit 82 Textabbildungen. M. 13.—, geb. M. 14.—.

Das sehr gediegene Buch bringt eine Fülle von Belehrung und Anregung. Es ist vor allem für den Praktiker höchst wertvoll. Neben Biedls klassischem Werk über die innere Sekretion wird es seinen Platz behaupten, denn es berücksichtigt mehr die Bedürfnisse des Arztes, ist knapper und bringt doch von der Theorie genug, um in das Verständnis der schwierigen Probleme einzuführen. (Münchener med. Wochenschrift.)

==== Auf vorstehende Werke 30% Teuerungszuschlag. ====

Pathologie, allgemeine, und allgemeine pathologische Anatomie. Von Prof. Dr. R. Oestreich. Mit 44 Abbildungen und 11 Tafeln in Dreifarbendruck. M. 13.—, geb. M. 14.20.

... Alles in allem ist das Oestreichsche Lehrbuch nicht nur dem Studierenden, der in die pathologische Anatomie eingeführt werden soll, sondern auch dem Praktiker, der sich über die modernen Anschauungen auf diesem ihm in der Praxis gewöhnlich wieder sich entfernenden Gebiete zuverlässig orientieren will, aufs wärmste zu empfehlen. — Die äußere Ausstattung des Buches ist mustergültig. (Allgem. mediz. Zentral-Zeitung.)

Pathologie des Blutes, klinische. Von E. Grawitz †. 4. Auflage. Mit 45 Abbildungen und 7 farbigen Tafeln. M. 30.—, geb. M. 32.50.

Die neue Auflage des Grawitzschen Buches bietet nicht nur dem Lernenden eine ausgezeichnete, erschöpfende und originelle Darstellung der gesamten Lehre von der Pathologie des Blutes, sondern auch dem Forscher eine Fülle von fruchtbringenden Anregungen. (Wiener klin.-therap. Wochenschrift.)

Physiologie, allgemeine, Lehrbuch. Eine Einführung in das Studium der Naturwissenschaft und der Medizin. Von Geh. Rat Prof. Dr. J. Rosenthal. Mit 137 Abbildungen. M. 14.50, geb. M. 16.50.

Als Ganzes betrachtet ist das Buch eine bedeutsame und originelle Leistung, die gewiß nicht nur dem angehenden Naturforscher eine sichere Grundlage für seine weitere Ausbildung, sondern auch dem fertigen Forscher mannigfache Anregung bieten wird. Die Ausstattung des Werkes ist eine sehr sorgfältige. (Zentralblatt für Physiologie.)

Säugling, Krankheiten des, Lehrbuch. Von Dr. A. Lesage. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Prof. Dr. Rud. Fischl. Mit 73 Abbildungen. M. 12.—, geb. M. 13.—.

Das Werk des berühmten französischen Kinderarztes, welches der bekannte Prager Kliniker durch eine gleichzeitige Umarbeitung den deutschen Verhältnissen angepaßt hat, wird daher nicht nur von allen Kinderärzten, sondern auch von allen Praktikern, die ja täglich mit den eigentümlichen Lebensbedingungen des Säuglings sich beschäftigen müssen, freudig begrüßt werden. Es ist ein Genuß, das Buch zu lesen, welches Kapitel man auch aufschlägt. (Zentralblatt für Kinderheilkunde.)

Stoffwechselanalyse, Methodik. Ein Handbuch zum Laboratoriumsgebrauch. Von Dr. W. Glikin. Mit 44 Abbildungen. M. 10.—, geb. M. 11.20.

... Als Hilfsbuch bei chemisch-physiologischen Arbeiten wird sich das G.sche Werk als kaum entbehrlich erweisen, zumal es auch dem weniger Geübten durch die übersichtliche, präzise Darstellungsweise zu Hilfe kommt. (Zentralblatt f. innere Medizin.)

Arzneipflanzen, deutsche. Vorlesungen über Wirkung und Anwendung.

Für Ärzte und Studierende von Geh. Med.-Rat Prof. Dr. Hugo Schulz. M. 15.—, geb. M. 16.80.

Außer über die officinellen Pflanzen will der Verfasser auch über diejenigen unterrichten, die von anderen therapeutischen Anschauungen angewandt werden, sowie auch über die gebräuchlichsten Volksmittel aus unserer heimischen Flora. Ärzten und Studierenden wird somit Gelegenheit gegeben, sich in aller Kürze über den wirklichen Nutzen der Volksmittel, die im Bereiche ihrer Tätigkeit von ihren Patienten benutzt werden, zu unterrichten.

Blutungen, Okkulte, Lehre von den. Von Prof. Dr. J. Boas, Berlin. Mit 5 Abbildungen und 1 farbigen Tafel. M. 5.—, geb. M. 5.80.

Verfasser, der bekanntlich als erster die okkulten Blutungen in der Symptomatologie eingeführt hat, gibt in der vorliegenden Monographie wieder, was er in der eigenen Praxis erfahren und was andere auf diesem wichtigen Gebiete publiziert haben. Die glänzende und kritische Darstellung sichert dem Autor einen dankbaren Leserkreis unter den Ärzten. (Ärztl. Rundschau.)

Fehlgeburt, künstliche, und künstl. Unfruchtbarkeit, ihre Indikationen, Technik und Rechtslage. Ein Handbuch für Ärzte und Bevölkerungspolitiker. Herausgegeben von Dr. med. Placzek. M. 15.—.

Es birgt eine Fülle von Material; umfangreiche Kasuistik ist eingehend berücksichtigt. Noch niemals ist eine derartige zusammenfassende Darstellung des Gegenstandes gegeben worden. — Dem Herausgeber und den Mitarbeitern gebührt der aufrichtige Dank für ersprießliche Arbeit. Möge das Buch weite Verbreitung finden! Es sei angelegentlich empfohlen. (Deutsche med. Wochenschrift.)

==== Auf vorstehende Werke 30% Teuerungszuschlag. ====

GEORG THIEME / VERLAG / LEIPZIG

DEUTSCHE MEDIZINISCHE WOCHENSCHRIFT

Begründet von Dr. Paul Börner

Herausgeber: Geh. San.-Rat Prof. Dr. Julius Schwalbe

Literaturberichte: Prof. Dr. W. Hoffmann.

Vereinsberichte: Stabsarzt Dr. O. Strauß.

Vierteljährlich M. 20.—

(für Studenten und Medizinalpraktikanten M. 10.—)

Die Deutsche Medizinische Wochenschrift hat sich während ihres 44 jährigen Bestehens zu einem der angesehensten und verbreitetsten Fachblätter des In- und Auslandes entwickelt. Ihren Ruf verdankt sie in erster Linie ihren gediegenen Originalaufsätze. In bedeutungsvollen Fragen hat sie durch ihre bahnbrechenden Arbeiten die Führung innegehabt. Zu ihren Mitarbeitern zählt die D. M. W. die hervorragendsten Ärzte des In- und Auslandes.

Die in der D. M. W. stets besonders gepflegte Fortbildung des praktischen Arztes erfährt eine wertvolle Erweiterung durch zwei neue Aufsatzreihen:

1. In fortlaufender Folge soll der jetzige Stand einer Reihe wissenschaftliche und praktischer Probleme von berufenen Autoren kurz und übersichtlich geschildert werden, zur Belehrung über das Gegebene und zur Anregung von weiterer Erforschung noch strittiger Fragen.

2. Insbesondere für die praktischen Ärzte sollen von erfahrenen Fachmännern aus den gesamten Spezial-Disziplinen in knapper Form Ratschläge für Diagnose, Prognose, Therapie und Prophylaxe erteilt werden.

Die „Ratschläge“ erscheinen in ununterbrochener Reihenfolge.

Der Praktiker gewinnt damit allmählich ein für seine Bedürfnisse sehr geeignetes Kompendium der gesamten spezialärztlichen Ausbildung.

Die D. M. W. hat unter allen Wochenschriften die umfangreichste Literaturübersicht. Etwa 80 Zeitschriften, Archive usw. werden sofort nach Erscheinen referiert.

Eine sorgsame Pflege durch hervorragende Fachmänner finden ferner: Standesangelegenheiten, Soziale Medizin und Hygiene, Medizinalgesetzgebung, technische Erfindungen, Berichte über Vereinsverhandlungen und Kongresse.

Die Kleinen Mitteilungen geben Kenntnis von den wichtigsten ärztlichen Tagesereignissen.

Zur Unterhaltung des Lesers dienen die fast in jeder Nummer erscheinenden Feuilletonartikel, Aufsätze aus der Geschichte der Medizin, Philosophie usw.

Die sorgfältigste Auswahl des Stoffes ermöglicht auch den vielbeschäftigten Praktiker eine rasche und gründliche Orientierung über alles Wissenswerte.

729

C_3H_8

~~C_3H_7OH~~

~~$CH_3CH_2CH_3$~~

~~$CH_3CH_2CH_2OH$~~

~~CH_3CH_2COOH~~

~~CH_3OCH_2COOH~~

~~CH_3CH_2COOH~~



