LEHRBUCH DER PHYSIK

FÜR DIE OBERSCHULE

ZEHNTES SCHULJAHR

LEHRBUCH DER PHYSIK

FÜR DIE OBERSCHULE

ZEHNTES SCHULJAHR

Wellenlehre – Akustik – Optik

Elektrizitätslehre

Mit 333 Abbildungen

Ausgabe 1954

VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1955

Verfaßt von
Franz Eichler, Reinhold Fischer,
Rudolf Girke, Dr. Otto Joachimi,
Helmut Mucke, Dr. Ernst Schneider,
Werner Steinrück

Redaktionelle Bearbeitung:
Georg Sprockhoff, Alfred Schubert

Zeichnungen von Kurt Dornbusch

Die vorliegende durchgesehene Neuauflage des Lehrbuches der Physik für das 10. Schuljahr ist entstanden aus den beiden Büchern:

Lehrbuch der Physik für das 10. Schuljahr, Teil: Wellenlehre – Akustik – Optik, Best.-Nr. 02 908, Berlin 1954

Lehrbuch der Physik für das 10. Schuljahr, Teil: Elektrizitätslehre, Best.-Nr. 02 907, Berlin 1954

Sie entspricht dem vom 1. September 1954 an gültigen Lehrplan.

Redaktionsschluß: 15. Dezember 1954

Bestell-Nr. 02 912-2
3,50 DM · Lizenz Nr. 203 · 1000-V-02 54 06-II (DN)
Satz u. Druck: VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig III/18/203

Inhaltsverzeichnis

WELLENLEHRE

I. Schwingungen 5
§ 1. Die Grundbegriffe der Schwingungslehre 5
§ 2. Die ungedämpfte und die gedämpfte Schwingung 9
§ 3. Erzwungene Schwingungen – Resonanz 13

II. Wellen 17
§ 4. Die Entstehung von Wellen – Wellenarten 17
§ 5. Kopplungskräfte 22
§ 6. Die Bestimmungsstücke einer Welle 23
§ 7. Das Huygenssche Prinzip 27
§ 8. Reflexion und Brechung von Wellen 31
§ 9. Stehende Wellen 35

AKUSTIK

III. Schallerregung und Schallausbreitung 40
§ 10. Die akustischen Grundbegriffe 40
§ 11. Die Schallwellen – Das Echo 45
§ 12. Der Doppler-Effekt 49
§ 13. Akustische Resonanz 52

IV. Schallerzeugung 54
§ 14. Schwingende Saiten 54
§ 15. Schwingende Stäbe und Platten 56
§ 16. Schwingende Luftsäulen 58
§ 17. Ultraschall 62

OPTIK

V. Die Lichtausbreitung 67
§ 18. Ausbreitung des Lichtes im Raum 67
§ 19. Die Reflexion des Lichtes 70
§ 20. Die Reflexion des Lichtes an gekrümmten Spiegeln 75
§ 21. Die Brechung des Lichtes 80
§ 22. Die Zerlegung des Lichtes 86
§ 23. Linsen und Linsenbilder 89
§ 24. Die Linsenfehler und ihre Beseitigung 94
§ 25. Der Sehvorgang im Auge 99

VI. Optische Instrumente 102
§ 26. Geräte für Bildaufnahme und Bildwiedergabe 102
§ 27. Optische Geräte zur Nahbeobachtung 107
§ 28. Optische Geräte zur Fernbeobachtung 111

VII. Lichtemission und -absorption – Photometrie 117
§ 29. Die Emission des Lichtes 117
§ 30. Die Absorption des Lichtes 121
§ 31. Körperfarben 123
§ 32. Lichttechnik und Lichtmessung 125

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

VIII. Grundbegriffe und Grundgesetze des elektrischen Stromkreises 131
§ 33. Die elektrische Spannung 131
§ 34. Die elektrische Stromstärke 135
§ 35. Der elektrische Widerstand — Das Ohmsche Gesetz 137
§ 36. Technische Widerstandsgeräte — Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur 141
§ 37. Der unverzweigte Stromkreis — Die Reihenschaltung 145
§ 38. Der verzweigte Stromkreis — Die Parallelschaltung 148
§ 39. Die Brückenschaltung 151
§ 40. Energie und Leistung eines elektrischen Stromes 155

IX. Das konstante elektrische Feld 161
§ 41. Die elektrische Ladung 161
§ 42. Das Messen elektrischer Ladungen 165
§ 43. Das elektrische Feld 169
§ 44. Die Feldstärke im homogenen Feld — Die Einheit der Feldstärke 175
§ 45. Das Messen der Elementarladung 178
§ 46. Die Kapazität 180
§ 47. Das Dielektrikum 183
§ 48. Die Verteilung der Ladungen im elektrischen Feld 188

X. Das konstante magnetische Feld 194
§ 49. Grundeigenschaften und Formen magnetischer Felder 194
§ 50. Die magnetische Feldstärke 199
§ 51. Die Kraftwirkung eines Magnetfeldes auf einen stromdurchflossenen Leiter 203
§ 52. Beeinflussung des Magnetfeldes durch Eisen 208
§ 53. Ferromagnetische Stoffe 213
§ 54. Der Elektromagnet und seine Anwendungen 216

XI. Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten und in festen Körpern 220
§ 55. Die elektrolytische oder Ionenleitung in wäßrigen Lösungen 220
§ 56. Die Faradayschen Gesetze — Die Ionenleitung in Salzen 223
§ 57. Galvanische Elemente und Akkumulatoren 228
§ 58. Elektronentheorie der Leitung in festen Körpern 233
§ 59. Elektrische Vorgänge in der Grenzschicht zweier fester Leiter ... 236

Namen- und Sachverzeichnis 242

Quellenverzeichnis der Abbildungen 247

WELLENLEHRE

I. Schwingungen

§ 1. Die Grundbegriffe der Schwingungslehre

1. Die Schwingung. An einer Schraubenfeder hängt ein Hakengewicht in Ruhe. Man nennt diese Lage die *Nullage*. Ziehen wir das Gewichtsstück einige Zentimeter nach unten und lassen es dann los, so beobachten wir eine periodisch auf- und abwärts verlaufende Bewegung des Gewichtsstückes (Abb. 5/1). *Periodisch* heißt eine Bewegung, wenn sie sich in gleichen Zeiträumen in allen Einzelheiten regelmäßig wiederholt. Eine solche Bewegung um die Nullage nennt man eine *Schwingung* und die eben beschriebene Anordnung einen vertikalen

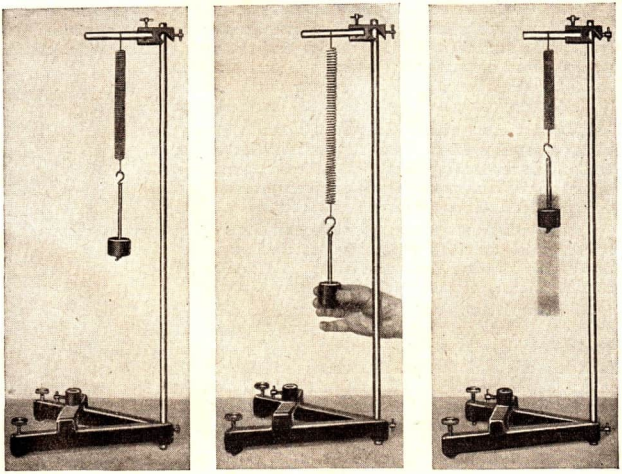


Abb. 5/1. Vertikaler Federschwinger
Links: Nullage Mitte: Feder gespannt Rechts: Federschwinger in Schwingung begriffen

Federschwinger. Hat das Gewichtsstück nach dem Loslassen die Ausgangslage wieder erreicht, so hat es eine volle Schwingung ausgeführt; derselbe Bewegungsvorgang beginnt von neuem.

Wir betrachten noch einen anderen schwingungsfähigen Körper und hängen zu diesem Zweck ein Gewichtsstück an einem Faden auf. Man nennt diese Anordnung ein *Fadenpendel.* Die Schwingungen leiten wir dadurch ein, daß wir einen seitlichen Stoß gegen das ruhig in der Nullage hängende Gewichtsstück ausführen. Den Ablauf einer vollen Schwingung zeigt Abb. 6/1 in fünf nebeneinandergestellten Momentbildern. Eine volle Schwingung besteht aus einem vollständigen Hin- und Hergang.

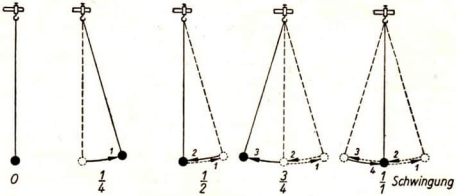


Abb. 6/1
Schwingungszustände eines Fadenpendels. Die dargestellten Schwingungszustände unterscheiden sich um je eine Viertelschwingung.

2. Die Bestimmungsstücke einer Schwingung. Will man die Schwingungen eines Körpers kennzeichnen und sie exakt beschreiben, so muß man einige Eigenschaften herausgreifen, die für eine Schwingung charakteristisch sind. Wir veranschaulichen sie uns am vertikalen Federschwinger, den Abb. 6/2 in einem beliebigen Schwingungszustand zeigt. Es handelt sich um folgende Bestimmungsstücke einer Schwingung:

a) Der **Ausschlag** oder die **Elongation** (Formelzeichen y bzw. x) ist der jeweilige Abstand des schwingenden Körpers von der Nullage. Der Ausschlag ändert sich mit jedem Augenblick und nimmt abwechselnd positive und negative Werte an. Die Wahl der positiven Richtung ist dabei willkürlich.

b) Die **Schwingungsweite** oder die **Amplitude** (Formelzeichen a) ist der größte Ausschlag des Schwingers. Sie wird durch eine absolute Zahl, d. h. durch eine Zahl ohne Vorzeichen, wiedergegeben.

c) Die **Schwingungsdauer** (Formelzeichen T) ist die Zeitdauer einer vollen Schwingung. Sie wird in Sekunden gemessen. Bei einem Federschwinger wird beispielsweise durch einen Versuch festgestellt, daß $n = 50$ Schwingungen in $t = 38{,}20$ s erfolgen. Daraus ergibt sich die Schwingungsdauer T als Quotient aus der Dauer t einer großen Anzahl von Schwingungen und der Anzahl n der Schwingungen selbst:

$$T = \frac{t}{n}.$$

In unserem Beispiel ist $T = \frac{38{,}20}{50}\,\text{s} \approx 0{,}76\,\text{s}.$

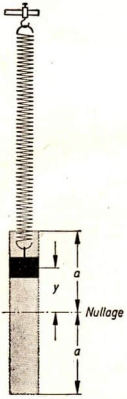


Abb. 6/2. Ausschlag und Amplitude am vertikalen Federschwinger

d) Die **Schwingungszahl** oder die **Frequenz** (Formelzeichen f) ist die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde. Die Einheit der Schwingungszahl ist das **Hertz** (Hz), das seinen Namen nach dem deutschen Forscher *Heinrich Hertz*[1] erhalten hat.

$$1\ \text{Hz} = 1\ \text{Schwingung/s}.$$

In der Hochfrequenztechnik wird häufig eine tausendmal so große Einheit verwendet, das **Kilohertz** (kHz).

$$1\ \text{kHz} = 1000\ \text{Hz}.$$

Auch die Frequenz wird zweckmäßigerweise durch Beobachtung über mehrere Sekunden ermittelt. In dem soeben durchgeführten Beispiel finden in 38,20 Sekunden 50 Schwingungen statt. Es entfallen dann auf eine Sekunde

$$\frac{50}{38{,}20}\ \text{Schwingungen} \approx 1{,}31\ \text{Schwingungen}.$$

Heinrich Hertz
(1857—1894)

Die Frequenz f beträgt mithin 1,31 Schwingungen je Sekunde oder 1,31 Hz. Allgemein ist die Frequenz f gleich dem Quotienten aus der Anzahl n der Schwingungen und der dabei verflossenen Zeit t.

$$f = \frac{n}{t}.$$

Da die Anzahl n der Schwingungen eine dimensionslose Zahl ist, ist die Dimension der Frequenz

$$[t^{-1}].$$

Die Schwingungsdauer und die Frequenz sind einander reziprok.

Es ist
$$T = \frac{1}{f} \quad \text{und} \quad f = \frac{1}{T}.$$

e) Unter der **Phase** versteht man den Schwingungszustand in irgendeinem Augenblick. Er ist gekennzeichnet durch den Ausschlag und durch die Richtung, in der sich der schwingende Körper gerade bewegt.

3. Die physikalischen Ursachen einer Schwingung. Wir untersuchen den Schwingungsvorgang am horizontalen Federschwinger (Abb. 7/1). Zieht man das Massenstück nach links, so wird dadurch die zurückziehende Kraft der rechten

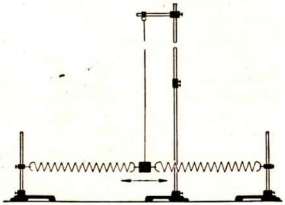


Abb. 7/1
Horizontaler Federschwinger. Ein an einem langen Faden hängendes Massenstück schwingt horizontal zwischen zwei Schraubenfedern.

[1] Heinrich Hertz (1857—1894), deutscher Physiker, 1885 Professor in Karlsruhe, 1889 Professor in Bonn. Er entdeckte 1887 die elektromagnetischen Wellen und schuf damit die Grundlage für die drahtlose Nachrichtenübertragung.

Feder vergrößert. Nach dem Loslassen wird das Massenstück wieder nach rechts zur Nullage zurückgezogen. Betrachtet man zur Erklärung der nun einsetzenden Bewegung lediglich die wirkenden Kräfte, dann müßte das Massenstück nach Erreichen der Nullage in dieser stehenbleiben; denn jetzt ziehen beide Federn wieder gleich stark. Tatsächlich bewegt sich aber das Massenstück infolge seiner *Trägheit* nach rechts über die Nullage hinaus, bis die mit der Verlängerung der Feder zunehmende Zugkraft der linken Feder das Massenstück wieder zum Stillstand bringt. Die Stelle, an der der Stillstand eintritt, nennt man den *Umkehrpunkt.* Sobald er erreicht ist, beschleunigt die stark gedehnte linke Feder das Massenstück wieder in Richtung auf die Nullage hin.

Bei allen Schwingungsvorgängen in der Mechanik, auf die wir uns hier beschränken wollen, finden wir dieses Zusammenspiel von Kräften und Massen. Man kann darum sagen:

Für das Zustandekommen einer mechanischen Schwingung sind eine schwingende Masse und eine zur Nullage zurücktreibende Kraft erforderlich.

Man kann die mechanischen Schwingungen nach der Art der rücktreibenden Kräfte unterscheiden. Sind die wirkenden Kräfte durch elastische Eigenschaften der Stoffe bedingt, wie beispielsweise beim horizontalen Federschwinger, so spricht man von *elastischen Schwingungen.*

Bei den Pendelschwingungen wird das Gewichtsstück immer wieder durch die Schwerkraft in die Nullage zurückgezogen. Doch gibt es auch viele mechanische Schwingungsvorgänge, bei denen beide Kräfte als Ursache auftreten.

Bei allen Schwingungen wirkt die Trägheit aller bewegten Teile mit. So ist bei den Federschwingern sowohl die Masse der Schwingkörper als auch die Masse der Federn selbst beteiligt. Ist die Masse des Schwingkörpers groß gegenüber der Masse der Federn, so kann man diese gegenüber der Masse des Schwingkörpers vernachlässigen. Man gelangt so zu der vereinfachenden Vorstellung, daß die *Masse* des *Schwingkörpers* die Ursache der Trägheit und die *Elastizität* der *Federn* die Ursache der Kraftwirkungen sind. Diese Darstellungsweise hat große Vorteile für eine mathematische Betrachtung des Vorganges. Sie ist aber eine Abstraktion und gibt nur ein angenähertes Bild der Wirklichkeit, in der alle Ursachen eines Vorganges in einem untrennbaren Zusammenhang stehen. Es gibt viele Beispiele für elastische Schwingungen, bei denen eine so weitgehende gedankliche Vereinfachung nicht möglich ist. Zu nennen sind etwa die Schwingungen einer weichen Schraubenfeder, die vertikal aufgehängt und nicht belastet ist, oder die Schwingungen einer einseitig eingeklemmten Blattfeder (Abb. 8/1) oder einer Stimmgabel.

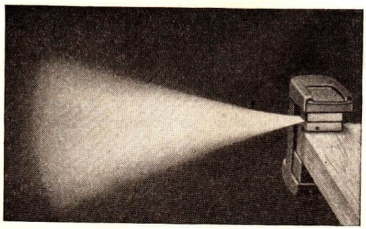


Abb. 8/1. Festgeklemmte Blattfeder
Die Masse ist über den ganzen schwingenden Körper verteilt.

4. Energieverteilung an mechanischen Schwingern. Der schwingende Körper befindet sich im ständigen Übergang aus der Bewegung in den Ruhezustand und umgekehrt. In allen seinen Bewegungszuständen muß die beim Anstoß aufgewandte Energie wieder auftreten, wenn man von dem Verlust an mechanischer Energie durch die Reibung absieht. In den Umkehrpunkten, in denen der Körper seine Bewegungsrichtung ändert, besteht die gesamte in Umwandlung begriffene Energie als *potentielle Energie*. Sie ist beim Pendel in der gehobenen Masse, beim horizontalen Federschwinger in der gedehnten Feder enthalten.

Wenn bei einem Pendel das Massenstück nach dem Stillstand im Umkehrpunkt allmählich wieder in Bewegung gerät, wandelt sich die potentielle Energie in zunehmendem Maße in kinetische Energie um. Im Augenblick des Durchgangs durch die Nullage hat das Massenstück seine größte Geschwindigkeit. Denn sobald es sich wieder von der Nullage entfernt, tritt die rücktreibende Kraft auf, die es bremst. Die gesamte potentielle Energie des Federschwingers ist beim Durchgang durch die Nullage in *kinetische Energie* umgewandelt. Potentielle Energie tritt in der Nullage beim Federschwinger nicht in Erscheinung, da sich die Wirkungen beider Federn in dieser Lage gerade aufheben.

Diese Umwandlung von potentieller in kinetische Energie und umgekehrt findet so lange statt, bis die ursprünglich aufgewandte Energie durch Reibung aufgebraucht ist und infolgedessen der Schwingungsvorgang aufhört.

5. Versuche, Fragen, Aufgaben:

1. Es sind Beispiele mechanischer Schwingungen anzugeben und die Wirkung der beteiligten Massen und Kräfte zu beschreiben.
2. Aus einer ungeglühten Heizwendel wird ein vertikaler Federschwinger hergestellt, indem man die Wendel aufhängt und mit einem Gewichtsstück belastet. Zu bestimmen ist die Frequenz und die Schwingungsdauer mit Hilfe einer mit Sekundenzeiger versehenen Uhr. Die Messung ist bei verschiedenen Amplituden zu wiederholen.
3. Stellen Sie ein Fadenpendel her und bestimmen Sie die Frequenz und die Schwingungsdauer!
4. Welche Schwingungsdauer hat ein Schwingungsvorgang mit einer Frequenz von a) 50 Hz, b) 7,3 Hz, c) 0,55 Hz?
5. Die Schwingungsdauer hat die Dimension [t]. Bestimmen Sie aus der Beziehung zwischen Schwingungsdauer und Frequenz die Dimension der Frequenz!
6. Wie ändert sich die Energieverteilung an einem vertikalen Federschwinger während der Schwingung?

§ 2. Die ungedämpfte und die gedämpfte Schwingung

1. Die Aufzeichnung einer Schwingung. Wir stellen uns ein Fadenpendel her, bei dem statt des Gewichtsstückes ein mit Sand gefüllter Trichter verwendet wird. Damit der Trichter nur in einer Ebene schwingt, hängt man ihn an zwei

Schnüren, oder wie man auch sagt, *bifilar* auf (Abb. **10**/1).

Wir bezeichnen ein solches Pendel als ein *Sandpendel*. Auf den Tisch legen wir dicht unter die Trichteröffnung ein Brett zum Auffangen des Sandes.

Wir lassen das Pendel schwingen. Der ausfließende Sand hinterläßt bei allen Schwingungen geradlinige Spuren, die sich sämtlich zu einer einzigen geraden Sandspur überdecken. Wir wiederholen den Versuch, ziehen aber dabei die Unterlage mit konstanter Geschwindigkeit senkrecht zur Schwingungsebene des Pendels über den Tisch hinweg. Es erscheint auf der Unterlage eine Sandspur in Form einer *Wellenlinie* (Abb. **10**/2). Diese entsteht dadurch, daß die einzelnen geradlinigen Sandspuren durch die Bewegung der Unterlage seitlich auseinandergezogen werden.

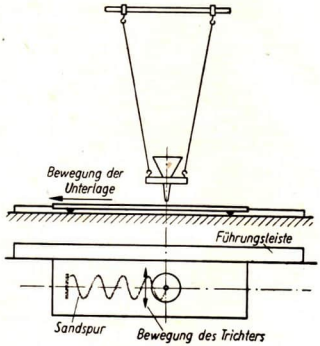


Abb. **10**/1. Sandpendel

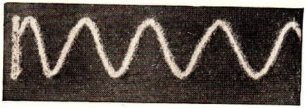
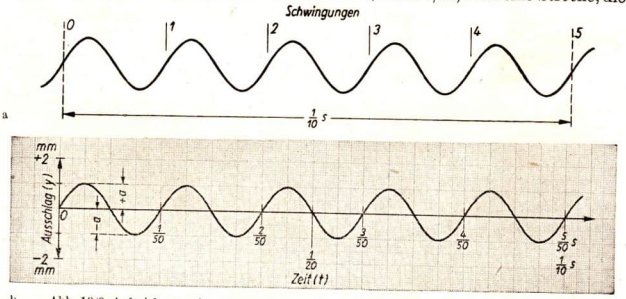


Abb. **10**/2. Wellenlinie als Sandspur eines Sandpendels

Auch mit einer Stimmgabel kann man den Schwingungsvorgang aufzeichnen. Dazu befestigt man an einer Zinke einen dünnen, vorn zugespitzten Blechstreifen. Die Spitze zieht man nach dem Anschlagen der Stimmgabel gleichförmig über eine berußte Glasplatte. Es entsteht wieder eine Wellenlinie.

Als Beispiel betrachten wir die Kurve, die eine Stimmgabel mit einer Frequenz von 50 Hz auf der berußten Platte aufzeichnet (Abb. **10**/3a). Auf eine Strecke, die



b

Abb. **10**/3. Aufzeichnung einer Federschwingung und graphische Darstellung der Schwingung a) Aufzeichnung einer Schwingung von 50 Hz b) Graphische Darstellung derselben Schwingung Auf der Abszissenachse wird die Zeit, auf der Ordinatenachse der Ausschlag veranschaulicht.

dem Zeitablauf von $\frac{1}{10}$ Sekunde entspricht, entfallen dann 5 Schwingungen. Eine solche Aufzeichnung eines Schwingungsvorganges kann man auch zur graphischen Darstellung einer Schwingung entwickeln. Auf der Abszissenachse wird die Zeit veranschaulicht, auf der Ordinatenachse der zum jeweiligen Zeitpunkt gehörige Ausschlag des schwingungsfähigen Körpers (Abb. **10**/3b).

2. Die zeichnerische Darstellung eines Schwingungsablaufes. Eine wellenförmige Kurve als Darstellung eines Schwingungsablaufes läßt sich mit Hilfe eines Kreises zeichnerisch entwickeln. Das Verfahren sei hier ohne Beweis mitgeteilt. Man teilt den Umfang eines Kreises durch die Punkte $P_0, P_1, P_2, \ldots$ in gleiche Teile (Abb. **11**/1). Der waagerechte Durchmesser des Kreises wird verlängert. Auf der Verlängerung markiert man in gleichen, aber sonst beliebigen Abständen die Punkte $P'_0, P'_1, P'_2, \ldots$, die den Punkten $P_0, P_1, P_2, \ldots$ entsprechen sollen. Nun fällt man von den Punkten $P_0, P_1, P_2, \ldots$ Lote auf den waagerechten Durchmesser. In den Punkten $P'_0, P'_1, P'_2, \ldots$ errichtet man Senkrechten, die in ihren Längen den von den Punkten $P_0, P_1, P_2, \ldots$ gefällten Loten gleichen. Die Verbindungslinie der Streckenendpunkte $Q_0, Q_1, Q_2, \ldots$ ergibt eine wellenförmige Kurve. Sie ist uns von der Mathematik her als Bild der *Sinusfunktion* bekannt.

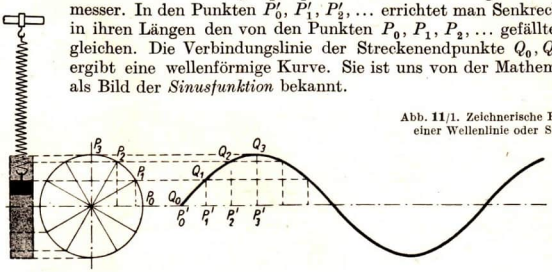


Abb. **11**/1. Zeichnerische Entwicklung einer Wellenlinie oder Sinuskurve

3. Gedämpfte Schwingungen. Wenn man eine mit einer Spitze versehene Blattfeder in ähnlicher Weise wie oben die Stimmgabel in Schwingungen versetzt und gleichmäßig über eine berußte Platte zieht, dann zeichnet sie ebenfalls eine wellenförmige Kurve auf. Diese unterscheidet sich von der durch die Stimmgabel erzeugten dadurch, daß die Amplituden schnell kleiner werden. Man spricht jetzt

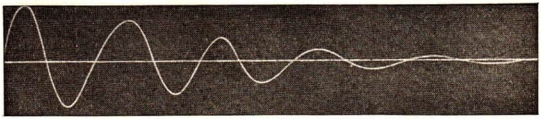


Abb. **11**/2. Aufzeichnung der gedämpften Schwingung einer Blattfeder
Die Amplituden werden immer kleiner.

von *gedämpften Schwingungen* (Abb. **11**/2). Die Dämpfung drückt sich in der allmählichen Abnahme der Schwingungsamplitude aus; sie ist eine Folge der Reibung, die zwischen den kleinsten Teilchen des schwingenden Körpers und

zwischen ihm und seiner Umgebung auftritt. Man kann die Dämpfung der schwingungsfähigen Körper in gewissen Grenzen beeinflussen. Befestigt man beispielsweise an den Tragschnüren eines Sandpendels quer zur Schwingungsrichtung mit einigen Federklammern eine große Pappscheibe, so verläuft die Schwingung merklich gedämpft (Abb. 12/1).

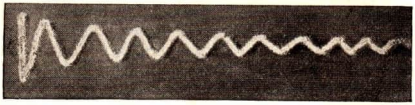


Abb. 12/1
Gedämpfte Schwingungen eines Sandpendels. Die Dämpfung wurde durch eine an den Tragschnüren eines Sandpendels befestigte Pappscheibe hervorgerufen.

Die bisher betrachteten Schwingungen mit konstanter Amplitude bezeichnet man demgegenüber als *ungedämpfte Schwingungen*. Sie sind als ein praktisch nicht erreichbarer Grenzfall anzusehen, da man die Reibung nie ganz ausschalten kann. Man kann ungedämpfte Schwingungen nur durch ständig neue Anstöße verwirklichen.

Die Dämpfung kann so groß sein, daß die aus der Nullage gebrachte Masse lediglich in die Nullage zurückschwingt, ohne sie zu überschreiten (Abb. 12/2). Eine solche Bewegung bezeichnet man als *aperiodisch*. Sie ist für manche technischen Zwecke sehr wichtig. So wird bei elektrischen und bei anderen Meßinstrumenten oft eine *Luftdämpfung* eingebaut, etwa in Form einer Metallscheibe, die in einer geschlossenen Kammer gegen den Luftwiderstand bewegt wird (Abb. 12/3). Die Metallscheibe ist mit dem Zeiger des Instrumentes starr verbunden und verhindert infolge ihrer großen Dämpfung das Pendeln des Zeigers, das die Messung erschwert.

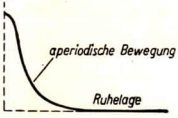


Abb. 12/2. Aperiodische Bewegung, hervorgerufen durch starke Dämpfung

Bei noch größerer Dämpfung bewegt sich die aus der Nullage herausgebrachte Masse sehr langsam in die Ruhelage zurück. Man bezeichnet diesen Sonderfall der aperiodischen Bewegung als eine *kriechende Bewegung* (Abb. 12/4).

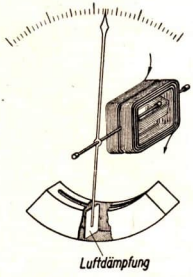


Abb. 12/3. Dämpfungseinrichtung eines elektrischen Meßgerätes

Abb. 12/4. Kriechende Bewegung, hervorgerufen durch sehr starke Dämpfung einer Schwingung

4. Fragen und Aufgaben:

1. Wie kann man die Schwingung eines vertikalen Federschwingers aufzeichnen?
2. Eine Wellenlinie ist als Darstellung eines Schwingungsablaufes graphisch zu entwickeln.
3. Wie wirkt sich die Dämpfung einer Schwingung aus?
4. Wie läßt sich die Dämpfung eines Fadenpendels verändern?
5. Wenn man das Gewichtsstück eines Pendels nicht an einem Faden aufhängt, sondern es mit seinem Drehpunkt durch eine starre Stange verbindet, erhält man ein Stabpendel. Wodurch läßt sich die Dämpfung eines Stabpendels beeinflussen?

§ 3. Erzwungene Schwingungen – Resonanz

1. Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen. Bisher haben wir nur solche Schwingungen betrachtet, bei denen der Körper nur einmal angestoßen wird und sich dann selbst überlassen bleibt. Die Amplitude der Schwingung ist dabei von der Stärke des Anstoßes abhängig und nimmt je nach der Dämpfung des schwingungsfähigen Gebildes mehr oder weniger schnell ab. Auf die Frequenz der Schwingung hat der Anstoß jedoch keinen Einfluß, diese richtet sich nach der Masse und nach anderen Größen, die nur durch den schwingungsfähigen Körper bestimmt sind. Man nennt diese Schwingungen darum *Eigenschwingungen* eines Körpers.

Es gibt noch eine zweite Möglichkeit, einen Körper in Schwingungen zu versetzen. Man läßt auf den schwingungsfähigen Körper periodische Stöße einwirken, die verhältnismäßig schwach sein können, und regt ihn dadurch zu Schwingungen an. Derartige Schwingungen heißen *erzwungene Schwingungen*. Sie haben in der Technik eine große Bedeutung.

2. Resonanz. Wir machen uns das Wesen einer erzwungenen Schwingung an einem Versuch klar. Der schwingungsfähige Körper sei ein Fadenpendel von kleiner Masse (Pendel I in Abb. 13/1). Die Frequenz f_0 der Eigenschwingung ist durch die Länge des Pendels gegeben.

Die periodischen, schwachen Anstöße verursacht ein zweites Fadenpendel (Pendel II), das aus einer leichten Gliederkette mit einem darangehängten schweren Hakengewicht besteht. Dadurch, daß man das Gewichtsstück in verschiedenen Höhen einhängt, kann man die Pendellänge und damit die Frequenz ändern. Die beiden Pendel sind durch einen Gummifaden verbunden. Führt das zweite Pendel Schwingungen aus, so wird das erste Pendel dadurch periodisch angestoßen.

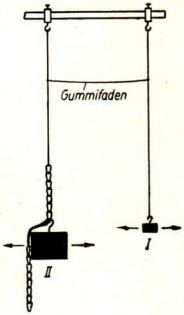


Abb. 13/1
Versuchsanordnung zum Erzeugen erzwungener Schwingungen. Pendel I wird durch periodische Anstöße des Pendels II angeregt.

Wir beobachten die Schwingung, die der schwingungsfähige Körper (Pendel I) unter dem Einfluß der

periodischen Anstöße ausführt, und stellen folgendes fest:

Das Fadenpendel gerät auch bei schwächsten Anstößen in heftige Schwingungen, wenn das die Anstöße liefernde Kettenpendel etwa die gleiche Länge hat. Stellt man die Amplitude der Schwingungen des Fadenpendels in Abhängigkeit von der Frequenz des anstoßenden Kettenpendels graphisch dar, so erhält man eine Kurve der in Abb. 14/1 wiedergegebenen Form. Wir können aus ihr folgende Gesetzmäßigkeit entnehmen, die durch zahlreiche Versuche an beliebigen anderen schwingungsfähigen Körpern bestätigt wird:

Ein schwingungsfähiger Körper wird durch regelmäßige Anstöße in heftige Schwingungen maximaler Amplitude versetzt, wenn die Anstoßfrequenz mit der Eigenfrequenz des Körpers übereinstimmt.

Dieses bei Übereinstimmung beider Frequenzen eintretende starke Schwingen nennt man **Resonanz** und die Kurve der Abb. 14/1 die *Resonanzkurve*.

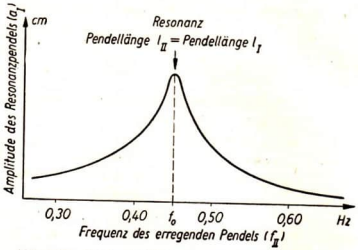


Abb. 14/1. Abhängigkeit der Amplitude einer Pendelschwingung von der Länge eines anstoßenden Pendels

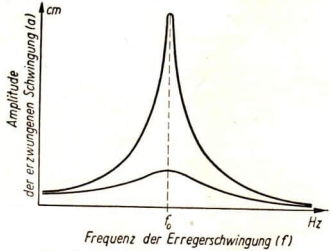


Abb. 14/2. Resonanzkurve einer Schwingung bei verschiedener Dämpfung

Die Resonanz tritt um so stärker hervor, je geringer die Dämpfung des schwingungsfähigen Systems ist (Abb. 14/2). Wenn ein schwingungsfähiger Körper von geringer Dämpfung beim Eintritt der Resonanz unter dem Einfluß schwacher Anstöße immer größere Amplituden erreicht, spricht man auch vom *Aufschaukeln* der Schwingung.

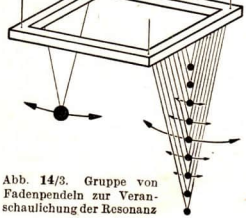


Abb. 14/3. Gruppe von Fadenpendeln zur Veranschaulichung der Resonanz

Zur Veranschaulichung der Resonanz lassen wir noch einen Versuch folgen. Ein rechteckiger Holzrahmen wird in den Ecken an kurzen Fäden aufgehängt. Der Rahmen trägt auf der einen Seite ein bifilares Fadenpendel von großer Masse, auf der gegenüberliegenden Seite mehrere verschieden lange, bifilar aufgehängte Fadenpendel, deren Pendelkörper in einer Reihe übereinander angeordnet sind (Abb. 14/3). Wird das einzelne Pendel in leichte Schwingungen versetzt, so geraten nach kurzer Zeit auch die Pendel auf

der anderen Seite in Schwingung, und zwar am stärksten dasjenige, das die gleiche Länge wie das einzelne Pendel besitzt, dessen Eigenfrequenz mithin gerade mit der erregenden Frequenz übereinstimmt. Die Anstöße werden durch den Rahmen auf die Pendel übertragen.

3. Beispiele für Resonanz in der Technik. Die Resonanz spielt in der Technik eine erhebliche Rolle. Ein Beispiel für die Ausnutzung der Resonanz ist der *Zungenfrequenzmesser*. Er besteht aus einer Reihe verschieden langer Blattfedern, die auf einer Leiste befestigt sind (Abb. **15**/1). Wird die Leiste an den Rahmen eines rotierenden Kreisels oder an das Lager einer umlaufenden Welle gehalten, so schwingt diejenige Zunge am stärksten, deren Schwingungsfrequenz mit der Umdrehungszahl je Sekunde übereinstimmt. Denn die geringsten Unausgeglichenheiten rufen leichte Schwingungen des Lagers hervor, auf die der Frequenzmesser anspricht.

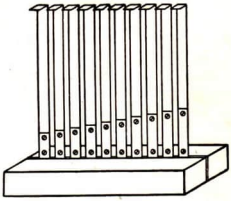


Abb. 15/1
Modell eines Zungenfrequenzmessers

Zungenfrequenzmesser werden insbesondere zur Anzeige der Frequenz von Wechselströmen verwendet (Abb. **15**/2). Als Zungen dienen kleine magnetisierte Stahlbänder. Über oder unter den Zungen werden Spulen angebracht, die vom Wechselstrom durchflossen werden. Durch ihr wechselndes Magnetfeld versetzen sie die Zungen in Schwingung. Am stärksten schwingt wieder die Zunge, deren Frequenz mit der Wechselstromfrequenz übereinstimmt.

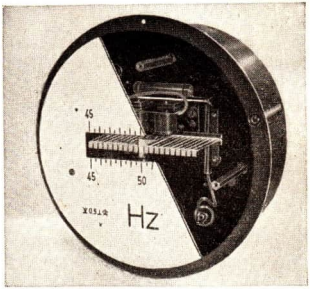


Abb. 15/2. Zungenfrequenzmesser für Wechselstrom, hergestellt in den Elektro-Apparate-Werken J. W. Stalin, Berlin-Treptow. Die weiße Skalenscheibe ist zur Hälfte entfernt. Sie enthält einen waagerechten Schlitz, in dem die an den Metallzungen angebrachten weißen Blättchen sichtbar sind. Das Blättchen der in Resonanz befindlichen Zunge erscheint zu einem Streifen ausgezogen.

In anderen Fällen hingegen kann sich die Resonanz störend auswirken, weil schon kleinste periodisch folgende Anstöße ein schwingungsfähiges System in heftige Schwingungen versetzen können, wenn sie mit der gleichen Frequenz erfolgen wie die Eigenfrequenz des Systems.

Ein Beispiel für eine solche schädliche Resonanz ist das Schwingen leichter Brücken, vor allem von Hängebrücken. Es kann dadurch ausgelöst werden, daß eine größere Anzahl von Menschen im gleichen Schritt darübergeht. Die Schwingungen können sich im Resonanzfalle bis zu einer gefahrbringenden Stärke aufschaukeln. So muß auch bei der Aufstellung von Maschinen darauf geachtet werden, daß das Fundament nicht Eigenfrequenzen besitzt, die mit den durch

die Drehzahl der Wellen gegebenen Schwingungsfrequenzen der Maschine übereinstimmen.

Eine häufig zu beobachtende Erscheinung ist das Klirren von Scheiben und anderen Teilen eines Kraftwagens, sobald das durch den Motor hervorgerufene Vibrieren des Wagens mit der jeweiligen Eigenfrequenz der einzelnen Teile übereinstimmt.

4. Versuche und Fragen:

1. Stellen Sie eine Pendeleinrichtung nach Art von Abb. **13/1** her und nehmen Sie eine Resonanzkurve auf, indem Sie das Kettenpendel um einen konstanten Betrag, beispielsweise um 2 cm, aus der Ruhelage herausziehen und loslassen! Messen Sie für verschiedene Längen des Anstoßpendels seine Frequenz und die größte Amplitude, die das Fadenpendel dabei erreicht! Stellen Sie die gemessenen Werte in einer Tabelle zusammen und fertigen Sie dazu nach Art der Abb. **14/1** eine graphische Darstellung an!
2. Welcher Unterschied besteht zwischen Eigenschwingungen und erzwungenen Schwingungen?
3. Es sind Beispiele für Resonanz im Bereich der Technik und des täglichen Lebens anzugeben.

II. Wellen

§ 4. Die Entstehung von Wellen – Wellenarten

1. Schwingung und Welle. Die bekanntesten Wellenerscheinungen sind die regelmäßigen Bewegungen auf einer Wasseroberfläche. Doch sind gerade an den *Wasserwellen* Einzelheiten des Zustandekommens einer Welle infolge des schnellen Ablaufs schwer zu erkennen. Wir veranschaulichen uns daher die Zusammenhänge besser an einem einfacheren Beispiel und benutzen dazu folgende Anordnung, die als Juliussches Wellengerät bekannt ist.

An einem hohen Stativ sind wenige Zentimeter nebeneinander zwei Schnüre aufgehängt. An ihnen ist eine Anzahl von Querstäben befestigt, die sämtlich an ihren Enden je eine kleine Scheibe tragen (Abb. 17/1).

Jeder der Querstäbe führt Drehschwingungen aus, wenn er von der Seite her angestoßen wird. Versetzen wir nun beispielsweise den untersten Stab in Schwingung, dann beobachten wir, wie diese Schwingung der Reihe nach auf die benachbarten Stäbe übergreift, so daß nacheinander alle Stäbe in Schwingung geraten. Es läuft eine *Welle* durch die Stabreihe hindurch (Abb. 17/2).

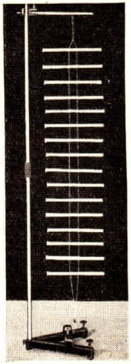


Abb. 17/1
Wellengerät nach Julius zur Veranschaulichung der Entstehung einer Welle

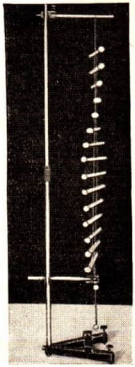


Abb. 17/2
Eine durch das Wellengerät hindurchlaufende Welle. Der unterste Querstab ist festgeklemmt.

Die Übertragung der Schwingung von einem Querstab auf den anderen erfolgt durch die Spannung der Schnüre, durch die die Stäbe verbunden sind. Eine solche durch elastische, aber auch durch andersartige Kräfte verursachte Verbindung zwischen schwingungsfähigen Körpern bezeichnet man als *Kopplung*.

Wir veranschaulichen die Entstehung und die Ausbreitung einer Welle noch an einem zweiten Beispiel. Eine größere Zahl gleich langer Fadenpendel wird in einer Reihe an einer Leiste aufgehängt. Die Kopplung der Pendel wird dadurch bewirkt, daß die jeweils benachbarten Pendel durch einen durch ein kleines

Gewichtsstück belasteten Faden verbunden werden (Abb. 18/1). Stößt man das erste Pendel seitlich an, so werden die Schwingungen ebenfalls von einem Pendel zum anderen übertragen. Es breitet sich eine *Welle* in der Pendelreihe aus.

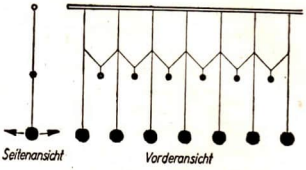


Abb. 18/1. Pendelvorrichtung zum Erzeugen einer Transversalwelle. Die einzelnen Pendel schwingen senkrecht zur Zeichenebene.

Beide soeben beschriebenen Vorrichtungen enthalten eine Anzahl hintereinander liegender, miteinander gekoppelter, schwingungsfähiger Teile. Wir versetzen davon jeweils das erste in Schwingung. Infolge der Kopplung geraten auch die übrigen Teile nacheinander in Schwingung. Die Schwingungen der einzelnen Teile verschmelzen zu einer Gesamtbewegung, die sich durch die ganze Reihe der schwingungsfähigen Teile ausbreitet. Man nennt diese Bewegung eine Welle oder noch genauer eine *fortschreitende Welle*. Besonders wichtig für das Verständnis des Wesens einer Welle ist die Tatsache, daß die einzelnen Teile nur Schwingungen um ihre Nullage ausführen, daß sich diese aber selbst nicht verschiebt. Die Gesamtheit aller schwingungsfähigen Teile, innerhalb deren sich die Wellenbewegung ausbreiten kann, heißt das *Medium*[1] der Welle.

In einem aus schwingungsfähigen Teilen bestehenden Medium entsteht eine Welle, wenn die einzelnen Teile miteinander gekoppelt sind und gleichartige Schwingungen ausführen.

2. Die Transversalwelle. Wir achten jetzt darauf, in welcher Richtung die fortschreitende Welle läuft und in welcher Richtung im Vergleich dazu die Teilchen schwingen. Wir stellen folgendes fest:

Die Ausbreitungsrichtung der Welle und die Schwingungsrichtung der einzelnen Teile stehen bei beiden Beispielen senkrecht aufeinander (Abb. 18/2).

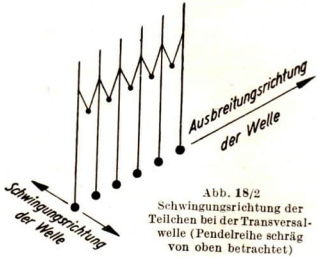


Abb. 18/2 Schwingungsrichtung der Teilchen bei der Transversalwelle (Pendelreihe schräg von oben betrachtet)

Eine Welle, bei der die einzelnen Teile senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, nennt man Quer- oder Transversalwelle.

Mit einem Seil kann man gleichfalls Transversalwellen erzeugen, wenn man das eine Ende hin- und herbewegt. Diese Wellen heißen *Seilwellen*.

3. Die zeichnerische Darstellung einer Transversalwelle. Wir sehen an den im 1. und 2. Abschnitt angeführten drei Beispielen, daß das äußere Bild einer Transversalwelle der Kurve sehr ähnlich ist, die wir bei der Aufzeichnung einer Schwingung erhielten. Wir müssen aber diese beiden äußerlich gleichen Darstellungen begrifflich auseinanderhalten. Bei der zeichnerischen Darstellung einer Schwingung handelt es sich um die Aufzeichnung des laufend wiederholten

[1] medium (lat.) = das Mittel

Bewegungsvorganges eines einzelnen schwingenden Teilchens. In der bildlichen Wiedergabe einer Transversalwelle dagegen wird die gegenseitige Lage aller schwingenden Teilchen des Mediums in einem bestimmten Augenblick festgehalten. Es handelt sich gleichsam um ein *Momentbild der Welle*. Man trägt für einen bestimmten Zeitpunkt die Ausschläge aller gekoppelten Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle ab und verfährt wie in § 2,2.

Die Darstellungen einer Schwingung und einer Transversalwelle sind in den Abb. **19**/1 a und b gegenübergestellt. In Abb. **19**/1 a ist der Ausschlag des schwingenden Körpers als *Funktion der Zeit* dargestellt. In Abb. **19**/1b werden die Ausschläge sämtlicher schwingenden Teilchen längs der Ausbreitungsrichtung in einem bestimmten Augenblick als *Funktion der Entfernung* vom Ursprungspunkt der Welle wiedergegeben.

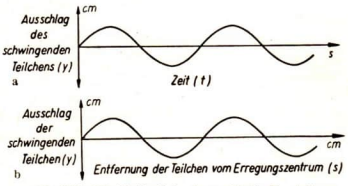


Abb. **19**/1. Die Wellenlinie als graphische Darstellung

a) Darstellung einer Schwingung: Die Elongation als Funktion der Zeit

b) Momentbild einer Welle: Die Ausschläge der Wellenteilchen als Funktion der Entfernung der Teilchen vom Erregungszentrum

Den zeitlichen Ablauf der Wellenbewegung kann man dadurch ausdrücken, daß man die Welle durch mehrere solcher Momentbilder darstellt, die in regelmäßigen Abständen aufgenommen werden, wodurch auch eine gute Veranschaulichung des Fortschreitens einer Welle gegeben wird (Abb. **19**/2).

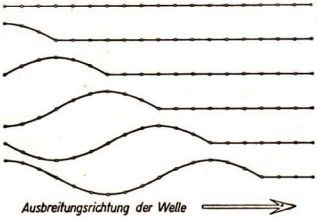


Abb. **19**/2. Darstellung des Fortschreitens einer Transversalwelle durch mehrere Bilder

4. Die Longitudinalwelle. Wir betrachten jetzt eine horizontal aufgehängte, lange, weiche Schraubenfeder. Wird sie am Ende in der Längsrichtung angestoßen, dann sieht man eine Verdichtung der Windungen wellenartig durch die Feder hindurchlaufen (Abb. **19**/3). Die einzelnen Windungen verändern dabei ihre Abstände, das heißt, sie schwingen in der Längsrichtung der Feder. Eine solche Welle nennt man darum *Längswelle* oder *Longitudinalwelle*. Während bei einer Transversalwelle alle schwingungsfähigen Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen, bewegen sie sich bei einer Longitudinalwelle in der Ausbreitungsrichtung der Welle.

Bei einer Longitudinalwelle schwingen alle schwingungsfähigen Teilchen in der Ausbreitungsrichtung.

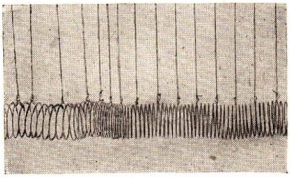


Abb. **19**/3. Vorrichtung zur Übertragung eines in der Längsrichtung gegebenen Impulses. Sie besteht aus einer waagerecht aufgehängten Schraubenfeder.

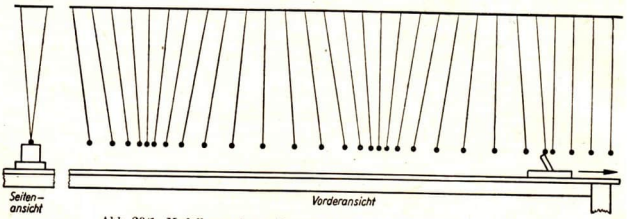


Abb. 20/1. Modellversuch zur Veranschaulichung einer Longitudinalwelle
Die Pendel schwingen in der Längsrichtung hin und her, so daß das Bild einer Welle entsteht. Es fehlt aber die für das Zustandekommen einer wirklichen Welle erforderliche Kopplung.

Wir können uns die Bewegungsvorgänge bei einer Longitudinalwelle an einem *Modellversuch* klarmachen. Wir benutzen dazu die in Abb. **20**/1 wiedergegebene Anordnung. Eine Anzahl bifilarer Pendel ist so in einer Reihe angeordnet, daß alle Pendel nur in der Richtung der Reihe schwingen können, nicht dagegen senkrecht zu ihr wie bei der in den Abbildungen **17**/1, **17**/2 und **18**/1 wiedergegebenen Versuchsanordnung. Alle Pendel werden nacheinander angestoßen, indem man mit einem kleinen Brett leicht streifend unter den Pendelkörpern entlangfährt. Man sieht eine Stelle durch die Reihe hindurchgleiten, an der sich die Pendelkörper zusammendrängen. Ihr folgt eine Stelle, an der der Abstand der Pendelkörper stark vergrößert ist. Beide Erscheinungen wiederholen sich regelmäßig.

Der Vorgang ähnelt dem bei der Schraubenfeder beobachteten (vgl. Abb. **19**/3) und zeigt noch deutlicher als jener die Längsschwingungen jedes Teilchens. Jedoch fehlt der benutzten Anordnung eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung und Ausbreitung einer fortschreitenden Welle, nämlich die Kopplung der Teilchen. Erst infolge der Kopplung breitet sich eine Welle selbständig aus; hier aber mußten die Pendel einzeln angestoßen werden. Darum kann dieser Versuch auch nur zur Veranschaulichung von Wellen dienen. Der dargestellte Vorgang selbst darf nicht als Welle aufgefaßt werden, sondern stellt eine solche nur modellartig dar.

5. Die zeichnerische Darstellung einer Longitudinalwelle. Wir gehen von der Darstellung der Transversalwelle aus (vgl. Abb. **19**/1 und **11**/1). Dort wurden die Ausschläge der einzelnen Teilchen als Senkrechte zur Ausbreitungsrichtung gezeichnet. Sämtliche Senkrechten klappen wir nunmehr rechtsdrehend um ihre Fußpunkte P'_0, P'_1, P'_2, ... auf die waagerechte Achse um, so daß die Punkte $Q_0, Q_1, Q_2, \ldots$ in die Punkte Q'_0, Q'_1, Q'_2, ... übergehen (Abb. **20**/2). Die Punktreihe

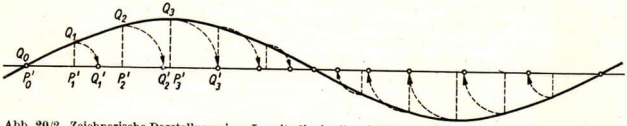


Abb. 20/2. Zeichnerische Darstellung einer Longitudinalwelle mit Hilfe der Zeichnung einer Transversalwelle

Abb. 21/1. Punktreihe als Bild einer Longitudinalwelle
Darüber das Bild der Transversalwelle, aus der die Longitudinalwelle abgeleitet wurde.

$Q_0', Q_1', Q_2', \ldots$ vermittelt dann ein Bild der Anordnung der Teilchen in einer Longitudinalwelle und der damit verbundenen Verdichtungen und Verdünnungen im Medium (Abb. 21/1).

6. Wasserwellen. In den Wellen auf einer Wasseroberfläche lernen wir noch eine dritte Art fortschreitender Wellen kennen (Abb. 21/2). Da sich Flüssigkeitswellen vorwiegend an der Oberfläche von Flüssigkeiten ausbilden, heißen sie *Oberflächenwellen*. Man gibt ihnen ihren Namen nicht nach der Bewegungsrichtung der schwingenden Teilchen. Ihre Form ist im Schnitt in Abb. 21/3 dargestellt.

Abb. 21/2. Brandungswellen

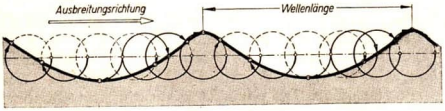


Abb. 21/3. Form einer Oberflächenwelle (Wasserwelle) im senkrechten Schnitt. Die einzelnen Wasserteilchen der Oberfläche sind in kreisender Bewegung begriffen. Die Bewegung jedes Wasserteilchens beginnt etwas später als die des vorangehenden.

Man könnte Wasserwellen auf den ersten Eindruck hin für Transversalwellen halten. Doch weichen Oberflächenwellen bei näherer Betrachtung wesentlich von Transversalwellen ab. Die Gipfel der Wasserwellen sind viel schmaler als bei Transversalwellen. Man kann die Schwingungen eines Wasserteilchens an der Wasseroberfläche untersuchen, indem man in einem langen, schmalen Glastrog die Bewegungen kleiner schwimmender Holzstückchen beobachtet. Man erkennt, daß die einzelnen Teilchen kreisende Bewegungen vollführen, wenn das Wasser nicht zu seicht ist. Die Kreisbewegung jedes folgenden Teilchens tritt gegenüber der des vorangehenden etwas verspätet ein. Es ergibt sich die in Abb. 21/3 dargestellte Kurvenform.

7. Versuche, Fragen, Aufgaben:

1. Erzeugen Sie mit Hilfe einer Wäscheleine fortschreitende Transversalwellen!
2. An welche Bedingungen ist das Zustandekommen einer fortschreitenden Welle gebunden?
3. Welcher Unterschied besteht zwischen den zeichnerischen Darstellungen einer Schwingung und einer Transversalwelle?
4. Zeichnen Sie eine Transversalwelle unter Verwendung der in Abb. **11**/1 dargestellten Konstruktion!
5. Stellen Sie eine Longitudinalwelle zeichnerisch dar, indem Sie gemäß Abb. **20**/2 von der Darstellung einer Transversalwelle ausgehen!
6. Wodurch kann man in der zeichnerischen Darstellung einer Welle das Fortschreiten der Welle zum Ausdruck bringen?
7. Warum sind Wasserwellen keine Transversalwellen?

§ 5. Kopplungskräfte

1. Die Ausbreitung eines Stoßes. Wir haben das Entstehen und das Ausbreiten einer Welle bisher an modellmäßigen Vorrichtungen untersucht. An ihnen waren verhältnismäßig große schwingungsfähige Körper in sichtbarer Weise miteinander gekoppelt, so daß eine gut beobachtbare fortschreitende Welle entstand. Bei vielen in der Natur vorkommenden Wellen sind die kleinsten Teilchen der Stoffe selbst die schwingungsfähigen Körper. So ist es zum Beispiel bei den festen Körpern, auf die wir uns bei folgenden Versuchen beschränken. Zwischen ihren kleinsten Teilchen sind elastische *Kopplungskräfte* wirksam. Denn nur unter Aufwendung von Kräften kann man die gegenseitigen Abstände der kleinsten Körperteilchen voneinander in gewissen Grenzen verändern. Eine gute Veranschaulichung dieser zwischen den kleinsten Teilchen der Körper wirkenden elastischen Kopplungskräfte geben die Vorgänge beim *elastischen* Stoß, von denen hier zwei Beispiele angeführt werden.

Wir legen eine Anzahl gleicher Stahlkugeln (Kugellagerkugeln) so auf eine waagerechte Rinne, daß sie sich berühren. Lassen wir nun eine ebensolche Kugel gegen die Reihe stoßen, so beobachten wir, daß kurz nach dem Anstoß die letzte Kugel fortgeschleudert wird. Die übrigen Kugeln bleiben ruhig liegen. Die Ursache für dieses Verhalten ist die Elastizität der Kugeln. Infolge des Stoßes läuft ein Zustand der Verdichtung und anschließend der Ausdehnung durch die Kugelreihe hindurch, ganz ähnlich wie bei einer Longitudinalwelle.

Noch deutlicher läßt der folgende Versuch die zwischen den kleinsten Körperteilchen wirkenden Kopplungskräfte erkennen. Man klemmt einen Stahlstab in seiner Mitte waagerecht an einem Stativ fest und schlägt mit einem Hammer gegen die e i n e Endfläche. Der *Impuls* des Schlages wird durch den Stab hindurch bis zum anderen Ende übertragen. Man kann dies dadurch sichtbar machen, daß man ein kleines Pendel an das Ende hält. Die Pendelkugel, die man am zweckmäßigsten ebenfalls aus Stahl wählt, wird fortgeschleudert. Die Ursache für diese Erscheinung liegt in der Weitergabe des Impulses in der Längsrichtung durch den ganzen Stab hindurch.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Ausbreitung einer Schallwelle in der Luft, deren Teilchen druckelastisch miteinander gekoppelt sind.

2. Energieübertragung. Der soeben erwähnte Versuch zeigt aber mehr als das äußere Bild der Ausbreitung eines Stoßes, wenn man die energetischen Verhältnisse betrachtet. Die stoßende Kugel gibt ihre kinetische Energie an die Kugelreihe ab. In dieser wird sie von jeder Kugel zur nächsten in Form potentieller Energie weitergegeben, wobei in jeder Kugel eine Umwandlung von potentieller in kinetische Energie stattfindet. In der fortgeschleuderten letzten Kugel wird die Stoßenergie wieder als kinetische Energie wirksam. Durch den Stoß wird demnach Energie übertragen.

In einem elastischen festen Körper wird durch Stoß Energie von Teilchen zu Teilchen übertragen, ohne daß sich der Körper als Ganzes dabei bewegt.

Man kann diese Erkenntnis auch auf die Wellen übertragen. Dabei ist allerdings auf folgenden Unterschied zu achten: Bei der Ausbreitung eines Stoßes erfahren alle gekoppelten Teilchen nacheinander eine einmalige Ablenkung aus der Ruhelage, während die Teilchen bei der Ausbreitung einer Welle mehrfach hintereinander Schwingungen ausführen. Trotz dieser Unterschiedlichkeit ersieht man, daß die *Ausbreitung von Stoß und Welle dem Wesen nach sehr ähnlich* ist. Eine Energieübertragung tritt beispielsweise bei der Ausbreitung einer Welle in einer Reihe gekoppelter Fadenpendel auf (vgl. Abb. 18/1). Aus der Tatsache, daß die ursprünglich ruhende Pendelreihe bis zum letzten Pendel ins Schwingen gerät, folgt, daß die dem ersten Pendel beim Anstoß zugeführte Energie durch die Reihe hindurch weitergegeben wurde.

Mit der Ausbreitung von Wellen ist eine Energieübertragung verbunden.

3. Fragen:

1. Inwiefern läßt die Ausbreitung eines Stoßes durch einen Stahlstab die zwischen den kleinsten Teilchen des Körpers wirkenden Kopplungskräfte erkennen?
2. Wie bewegen sich gekoppelte Teilchen bei der Ausbreitung eines Stoßes einerseits und bei einer Welle andererseits?
3. Warum liefert der in Abb. 20/1 dargestellte Modellversuch, auch vom Standpunkt der Energieübertragung aus betrachtet, keine echte Welle?

§ 6. Die Bestimmungsstücke einer Welle

Wie eine Schwingung ist auch eine Welle durch mehrere kennzeichnende Eigenschaften bestimmt. Es sind dies die Frequenz, die Amplitude, die Wellenlänge, die Wellenphase, die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

1. Die Frequenz. Die *Frequenz* einer Welle (Formelzeichen f) ist gleich der Frequenz der Schwingungen der einzelnen Teilchen. Sie wird wie bei den Schwingungen in Hertz (Hz) gemessen.

Von der Schwingungsdauer T einer Welle zu sprechen, ist im allgemeinen ungebräuchlich.

2. Die Amplitude. Die *Amplitude* einer Welle (Formelzeichen a) ist gleich der Amplitude der einzelnen schwingenden Teilchen. Je größer die Amplitude einer fortschreitenden Welle ist, desto mehr Energie wird durch die Welle übertragen. Vom Entstehungsort der Welle aus nimmt die Amplitude der fortschreitenden Welle allmählich ab, je nachdem wie groß die Dämpfung der einzelnen schwingungsfähigen Teilchen ist.

3. Die Wellenlänge. Die *Wellenlänge* einer Welle (Formelzeichen λ) ist die Strecke zwischen zwei benachbarten Punkten der Welle, die sich im gleichen Schwingungszustand, in gleicher Phase, befinden. Zwei Teilchen haben dann den gleichen Schwingungszustand, wenn sie nicht nur im Ausschlag, sondern auch im weiteren Ablauf der Schwingung übereinstimmen. So befinden sich in Abb. 24/1 die beiden Teilchen A und C im gleichen Schwingungszustand, die Teilchen A und B dagegen nicht. A und B haben zwar den gleichen Ausschlag, bewegen sich aber in entgegengesetzter Richtung. Dies läßt die gestrichelte Kurve in Abb. 24/1 erkennen, die die Welle in einem späteren Zeitpunkt zeigt, in dem sie schon ein Stück weitergewandert ist. Die beiden Punkte A und C haben sich beide um den gleichen Betrag gesenkt, während sich gleichzeitig Punkt B gehoben hat. Die Strecke AC ist mithin gleich der Wellenlänge λ.

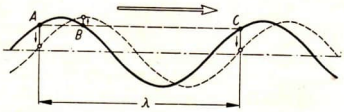


Abb. 24/1. Die Wellenlänge einer fortschreitenden Welle. A und C befinden sich im gleichen Schwingungszustand. Die Strecke AC ist gleich λ.
Die ausgezogene Kurve zeigt die Welle in einem früheren, die gestrichelte Kurve in einem kurz danach folgenden Zeitpunkt.

Bei dieser Gelegenheit seien noch zwei qualitative Begriffe erwähnt, die sich für die Beschreibung von Wellenvorgängen als sehr geeignet erwiesen haben. Den sich über die Nullinie erhebenden Teil einer Transversalwelle bezeichnet man als einen *Wellenberg*, den sich unter die Nullinie senkenden Teil als ein *Wellental*. Jede einzelne Welle umfaßt demnach einen Wellenberg und ein Wellental (Abb. 24/2). Die Wellenlänge mißt man in der Regel von einem Schnittpunkt der Welle mit der Nullinie bis zu dem zweiten darauf folgenden oder vom Scheitel eines Wellenberges bis zum Scheitel des folgenden. Man kann auch als Wellenlänge die Entfernung zwischen zwei Wellenteilchen messen, die in der gleichen Phase schwingen.

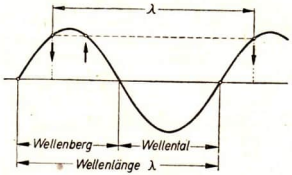


Abb. 24/2. Zusammenhang zwischen Wellenberg, Wellental und Wellenlänge

4. Der Phasenunterschied. Breiten sich zwei Wellen gleicher Wellenlänge im gleichen Medium aus, so weisen sie trotzdem im allgemeinen eine Verschiebung gegeneinander auf. Das bedeutet, die Wellen befinden sich an einem beliebig gewählten Beobachtungspunkt in verschiedenen Schwingungszuständen. Zur

Vereinfachung der Darstellung zieht man den Phasenbegriff der Schwingungslehre heran (vgl. § 1,2) und bezeichnet den an einem Beobachtungsort zwischen den Wellen bestehenden Schwingungsunterschied im übertragenen Sinne als den *Phasenunterschied* der Wellen oder als die *Phasenverschiebung*. Der Phasenunterschied wird meistens in Bruchteilen der Wellenlänge λ angegeben.

Je nachdem ob der Anfangspunkt der zweiten Welle vor oder hinter dem Anfangspunkt der ersten liegt, spricht man von einer *Phasenvoraneilung* oder einer *Phasenverzögerung*. Abbildung 25/1 gibt dafür zwei Beispiele.

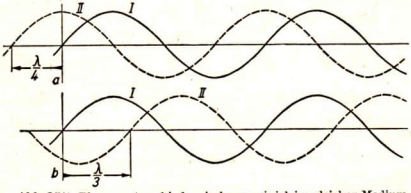


Abb. 25/1. Phasenunterschied zwischen zwei sich im gleichen Medium ausbreitenden Wellen

a) Phasenvoraneilung. Der Phasenunterschied der Welle II gegenüber der Welle I beträgt $+\frac{\lambda}{4}$.

b) Phasenverzögerung. Der Phasenunterschied der Welle II gegenüber der Welle I beträgt $-\frac{\lambda}{3}$.

5. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die *Ausbreitungsgeschwindigkeit* einer Welle (Formelzeichen c) gibt an, wie schnell sich eine bestimmte Schwingungsphase im Medium ausbreitet. Man stellt die Ausbreitungsgeschwindigkeit c beispielsweise dadurch fest, daß man die Wegstrecke s mißt, die eine Stelle der Welle von eindeutig bestimmter Phase in der Zeit t zurücklegt (Abb. 25/2). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist dann der Quotient aus Weg und Zeit:

$$c = \frac{s}{t},$$

sie wird in m/s oder in cm/s gemessen.

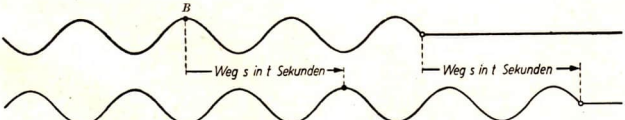


Abb. 25/2. Die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer fortschreitenden Welle. Der Wellenberg B hat sich in der Zeit t um die Strecke s weiterbewegt. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit gilt dann

$$c = \frac{s}{t}.$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist von der Größe der Kopplungskräfte abhängig. Man kann dies experimentell dadurch nachweisen, daß man die Schnüre des in Abb. 17/1 wiedergegebenen Juliusschen Wellengerätes durch verschieden große Gewichtsstücke spannt.

6. Der Zusammenhang zwischen den Bestimmungsstücken einer Welle. Ein Beispiel soll zeigen, daß die drei Größen, durch die die Ausbreitung einer Welle

gekennzeichnet ist, nämlich die *Geschwindigkeit* c, die *Wellenlänge* λ und die *Frequenz* f, voneinander abhängig sind.

An dem in Abb. 17/1 wiedergegebenen Wellengerät führen der angestoßene Querstab und nach ihm alle übrigen Stäbe 8 Schwingungen in 5 s aus. Die Frequenz der Stäbe beträgt demnach $f = 1{,}6$ Hz. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde zu $c = 40$ cm/s gemessen.

Die Wellenlänge λ braucht man nun nicht mehr zu messen, sie läßt sich aus den genannten Angaben errechnen. Ersetzt man in der Gleichung $c = \frac{s}{t}$ die beliebige Strecke s durch die Wellenlänge λ, so geht die Zeit t in die Schwingungsdauer T über. Denn während sich die Welle um eine Wellenlänge vorwärtsschiebt, vollführt jedes Teilchen eine ganze Schwingung. An Stelle der ersten Gleichung tritt dann die Gleichung

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

Da T durch $\frac{1}{f}$ ersetzt werden kann (s. § 1), erhält man

$$\boldsymbol{c = \lambda \cdot f.}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ist gleich dem Produkt aus der Wellenlänge und der Frequenz.

Umgekehrt ist

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

Für das dem Wellengerät entnommene Zahlenbeispiel ergibt sich demnach

$$\lambda = \frac{40 \text{ cm/s}}{1{,}6 \text{ s}^{-1}} = 25 \text{ cm}.$$

Auch hinsichtlich der Dimension stimmen beide Seiten der soeben abgeleiteten Gleichung überein:

$$c = \lambda \cdot f,$$

$$[l \cdot t^{-1}] = [l] \cdot [t^{-1}].$$

Die Gültigkeit dieser Gleichung ist nicht auf eine bestimmte Wellenart beschränkt. Sie ist auf beliebige periodische Bewegungen anwendbar, die mit einer Fortbewegung verbunden sind.

Beispiel: Auf den Hauptstrecken der Deutschen Reichsbahn sind Schienen mit der Normlänge $\lambda = 30$ m verlegt. In einem auf einer solchen Strecke fahrenden D-Zug sind in periodischer Folge Stoßgeräusche zu hören, die durch das Überfahren der Schienenstöße verursacht werden. In 12,5 s werden 10 Stoßgeräusche gezählt. Mithin ist die Frequenz der Stöße

$$f = \frac{10}{12{,}5 \text{ s}} = 0{,}8 \text{ s}^{-1}.$$

Die Geschwindigkeit des D-Zuges beträgt demnach

$$c = \lambda \cdot f = 30 \text{ m} \cdot 0{,}8 \text{ s}^{-1} = 24 \text{ m/s}.$$

7. Fragen und Aufgaben:

1. Wie kann man a) die Frequenz, b) die Wellenlänge, c) die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle bestimmen?
2. In welchem Zusammenhang stehen die Größen c, λ und f bei einer fortschreitenden Welle? Welche Dimensionen haben diese Größen?
3. Wie groß ist die Wellenlänge einer Wasserwelle, deren Frequenz 13,5 Hz beträgt und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit zu 23 cm/s bestimmt wurde?
4. In welcher Frequenz wird eine Seilwelle erregt, die eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von $c \approx 5$ m/s und eine Wellenlänge von $\lambda = 1{,}5$ m aufweist? Welche Schwingungsdauer T hat die erregende Schwingung?
5. Auf dem Meere betrage die Wellenlänge einer Wasserwelle $\lambda = 50$ m. Die Schwingungsdauer T, das ist die Zeit, in der sich an irgendeiner Stelle der Wasseroberfläche ein schwimmender Körper einmal auf und ab bewegt, sei 5,7 s. Mit welcher Geschwindigkeit breitet sich die Welle aus?

§ 7. Das Huygenssche Prinzip

1. Die Erzeugung von Wasserwellen. Wir untersuchen im folgenden die Ausbreitung der Wellen am Beispiel der Oberflächenwellen auf Wasser. Die dabei auftretenden Erscheinungen werden wir als charakteristisch für Wellen jeder Art erkennen, so daß wir sie verallgemeinern und später zur Erklärung weniger übersichtlicher Wellenerscheinungen heranziehen können.

Die *Wasserwellen* erzeugen wir in einer Wellenwanne. Diese besteht aus einer wassergefüllten Schale mit flach abfallenden Seitenwänden (Abb. 27/1). Die Wellen

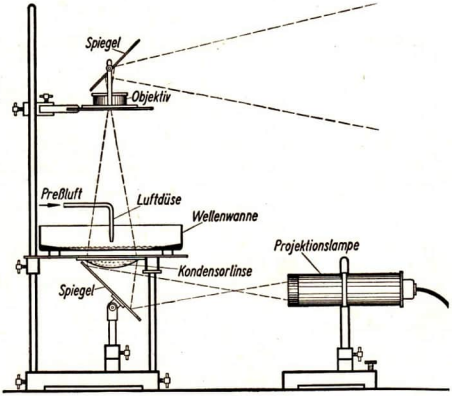


Abb. 27/1. Wellenwanne
Durch periodisch aus einer Düse heraustretende Luftstöße werden auf der Wasseroberfläche Wellen erregt. Die Wanne wird von unten durchleuchtet, die Wasseroberfläche wird über einen schräggestellten Spiegel auf einen Schirm projiziert.
Schematische Abbildung nach einer Zeichnung des VEB (K) Metallbau Apolda

erzeugt man durch periodisches Eintauchen eines Stiftes oder durch periodische Luftstöße gegen die Wasseroberfläche. Um das *Erregungszentrum* herum breitet sich eine Oberflächenwelle kreisförmig aus, wie wir sie bei einem ins Wasser geworfenen Stein beobachten können (Abb. 28/1).

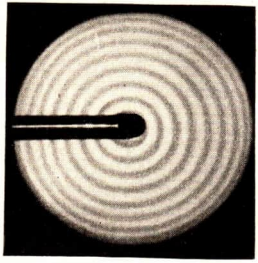


Abb. 28/1. Kreiswelle in einer Wellenwanne. Die in den Abb. 28/1, 28/2, 29/1, 30/1, 31/1 und 33/1 dargestellten Wellen wurden durch periodische, gegen die Wasseroberfläche gerichtete Luftstöße erregt.

Abb. 28/1 ist eine Photographie. Die Abbildungen 28/2, 29/1, 30/1, 31/1 und 33/1 sind Zeichnungen, die aus Photographien durch Vereinfachung entstanden sind.

Die entstehenden Wellen projiziert man auf einen Bildschirm. Sie zeichnen sich auf dem Bildschirm als helle und dunkle Kreise ab. Im allgemeinen laufen die Wellenbilder jedoch so schnell vom Erregungszentrum fort, daß man sie nur schlecht beobachten kann. Man kann die Beobachtung dadurch verbessern, daß man die Beleuchtung durch eine rotierende, mit sektorförmigen Ausschnitten versehene Scheibe in dem gleichen Rhythmus unterbricht, in dem die Wellen erregt werden. Eine solche Beleuchtung nennt man *stroboskopisch*. Sie bewirkt, daß die Wellenbilder auf dem Schirm stillstehen. Denn die Beleuchtung erfolgt unter den angegebenen Umständen immer dann, wenn die folgende Welle an die Stelle der vorangehenden getreten ist.

2. Elementarwellen. Mit der eben beschriebenen Wellenwanne untersuchen wir nun die Ausbreitung der Wellen. Wir legen einen mit einer schmalen Öffnung versehenen Ring in das Wasser und erregen in seinem Zentrum eine Welle. Wir sehen, daß durch den Spalt wieder eine kreisförmige Welle tritt (Abb. 28/2). Faßt man den Spalt selbst als Erregungszentrum auf, so kann man die Erscheinung in folgender Weise deuten: Im primären Erregungszentrum wird das Wasser durch den Wellenerreger in Schwingung versetzt, im Spalt wird es durch die ankommenden Wellen gehoben und gesenkt. Sowohl im Zentrum der ursprünglichen Kreiswellen als auch im Spalt geben die in Schwingung versetzten Wasserteilchen ihre Energie an die sie umgebenden, mit ihnen gekoppelten Teilchen weiter, so daß sich um beide Orte eine *kreisförmige Welle* ausbildet.

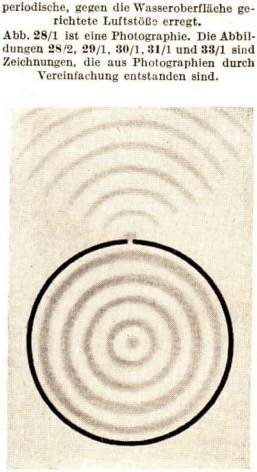


Abb. 28/2. Abgeschirmte Kreiswelle
Aus einem engen Spalt des Schirmes tritt wieder eine Kreiswelle aus.

Zu einem ganz ähnlichen Ergebnis gelangt man, wenn man eine ebene Welle mit linearer Front gegen eine gerade Wand anlaufen läßt, in der sich ein schmaler

Spalt befindet (Abb. 29/1). Auch hierbei breitet sich um den Spalt als Zentrum eine Kreiswelle nach der abgeschirmten Seite hin aus.

Man kann beide Versuche dahin verallgemeinern, daß man die Spalte in der ringförmigen wie in der geraden Wand an irgendeine andere Stelle der Wand legt. In jedem Falle breitet sich hinter der Wand um den Spalt eine Kreiswelle aus.

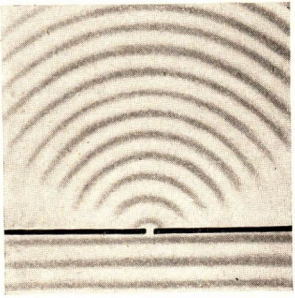


Abb. 29/1. Ausbildung einer Kreiswelle um einen Punkt einer ebenen Welle mit linearer Front. In der Wand befindet sich ein enger Spalt.

Der holländische Physiker *Christian Huygens*[1], der das Entstehen von Wellen grundlegend erforschte, kam im Jahre 1678 zu folgender Erkenntnis:

> Um jeden Punkt der Wasseroberfläche, der von einer sich ausbreitenden Welle erreicht und dadurch in Schwingung versetzt wird, breitet sich eine neue kreisförmige Welle aus. So entstehen an der äußersten Linie, die die fortschreitende Welle erreicht, in jedem Augenblick unzählig viele solcher Kreiswellen. Sie überschneiden und durchdringen sich gegenseitig, so daß sie nicht einzeln in Erscheinung treten.

Huygens nannte diese Wellen **Elementarwellen**. Er wollte damit zum Ausdruck bringen, daß diese Kreiswellen die Grundlage für alle Wellenerscheinungen bilden. Denn die Bedeutung der Huygensschen Gedanken liegt darin, daß man die Ausbreitung einer Welle auf die Entstehung und Ausbreitung einzelner Elementarwellen zurückführen kann. Wir werden darüber Näheres in den nächsten Abschnitten dieses Paragraphen erfahren.

Christian Huygens (1629—1695)

Die in den Abb. 28/2 und 29/1 wiedergegebenen Versuche können wir als Modellversuche zur Veranschaulichung von Elementarwellen auffassen. Das Heraussondern einer einzelnen Kreiswelle wurde dadurch erreicht, daß nur die im Spalt schwingenden Wasserteilchen ihre Schwingungen nach außen weitergeben konnten, während die Ausbildung weiterer Kreiswellen um die benachbarten Teilchen durch den Ring bzw. die ebene Wand verhindert wurde.

[1] Christian Huygens (1629–1695), ein holländischer Physiker, einer der bedeutendsten Wissenschaftler des 17. Jahrhunderts. Er erfand die Pendeluhr, entdeckte die Wellennatur des Lichtes und führte noch viele andere mathematische und physikalische Forschungen erfolgreich durch. Von 1666 bis 1681 wirkte er in Paris als Mitglied der Französischen Akademie der Wissenschaften.

3. Wellenfronten. Die von Huygens erkannte Existenz von Elementarwellen ermöglicht die Erklärung der Ausbreitung von Wellenfronten. Wir hatten festgestellt, daß sich die Elementarwellen im allgemeinen gegenseitig überschneiden, so daß sie nicht einzeln in Erscheinung treten. In welcher Weise sich die aus ihnen resultierende Welle zusammensetzt, können wir an einem weiteren Wellenwannenversuch beobachten. Wir ersetzen den bisher benutzten Ring durch einen solchen mit mehreren Öffnungen. Es ist zu beobachten, daß die austretenden Elementarwellen wieder zu einer neuen gemeinsamen Welle verschmelzen (Abb. 30/1). Diese Erscheinung ist um so deutlicher zu erkennen, je dichter die Öffnungen aneinanderliegen. Man bezeichnet die alle Elementarwellen einhüllende Welle als *Wellenfront.* Sie setzt sich aus ganz kleinen Stücken der Elementarwellen zusammen.

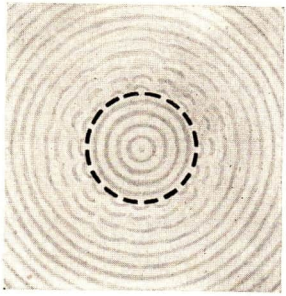


Abb. 30/1. Kreisförmige Wand mit vielen Öffnungen. Die aus den einzelnen Öffnungen austretenden Elementarwellen schließen sich zu einer gemeinsamen Welle zusammen.

Die Elementarwellen werden von der Wellenfront eingehüllt.

Bei einer geradlinigen Welle ist die *Einhüllende* die gemeinsame Tangente an die Elementarwellen. Zur geometrischen Konstruktion einer geradlinigen Wellenfront genügen danach zwei Elementarwellen.

4. Das Huygenssche Prinzip. Die am Beispiel der Wasserwellen gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf alle Wellenarten übertragen. Sie haben grundsätzliche Bedeutung und gelten für transversale und für longitudinale Wellen, für sichtbare wie für unsichtbare. *Huygens* erkannte die Wichtigkeit dieser Zusammenhänge und stellte das nach ihm benannte *Huygenssche Prinzip* auf.

Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen Welle, einer Elementarwelle. Die Elementarwellen setzen sich zu einer gemeinsamen Wellenfront zusammen, die geometrisch die Einhüllende der Elementarwellen ist.

Die Bedeutung des Huygensschen Prinzips liegt darin, daß es die Erklärung der verschiedenen Wellenerscheinungen wesentlich erleichtert. Will man über einen Wellenvorgang Näheres erfahren, so genügt es auf Grund des Huygensschen Prinzips meist, eine beschränkte Anzahl von Elementarwellen in ihrer Ausbreitung zu verfolgen. Man konstruiert dann die allen gemeinsame Wellenfront, zu der sich die einzelnen Elementarwellen zusammenfügen. Wir werden von diesem Verfahren im folgenden noch oft Gebrauch machen.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Erläutern Sie die Wirkungsweise einer Wellenwanne! Wozu dient das Gerät?
2. Wie läßt sich die Entstehung der Elementarwellen erklären?
3. Wie lautet das Huygenssche Prinzip?
4. Durch welchen Versuch läßt sich zeigen, daß die ungestörte, kreisförmige Ausbreitung einer Welle mit dem Huygensschen Prinzip erklärt werden kann?
5. Zeichnen Sie einen Kreis mit dem Radius $r = 5$ cm als Momentbild einer Kreiswelle! Legen Sie um eine größere Anzahl von Punkten kleine Kreise mit dem Radius $r_1 = 1$ cm als Bilder der Elementarwellen! Zeichnen Sie nach Augenmaß die Einhüllende als Bild der fortgeschrittenen Wellenfront!
6. Führen Sie dasselbe für eine geradlinige Wellenfront durch!

§ 8. Reflexion und Brechung von Wellen

1. Die Reflexion einer Welle. Wir beobachten nunmehr das Verhalten einer Welle beim Auftreffen auf ein geradliniges Hindernis und beschränken uns darauf, eine geradlinige Wellenfront anlaufen zu lassen (Abb. **31**/1). Man erkennt deutlich, daß ein Teil der Wellenfront durch das Hindernis abgeblendet wird und daß vor dem Hindernis ein Wellenstreifen reflektiert, das heißt, zurückgeworfen wird. Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips läßt sich zeigen, daß die Reflexion von Wellen in einer ganz bestimmten, gesetzmäßigen Form erfolgt.

Zur Erhöhung der Übersicht betrachten wir nur eine einzelne geradlinige Wellenfront, obwohl sich diese auf einer Wasseroberfläche nur schwer verwirklichen läßt. Die Wellenfront trifft an irgendeiner Stelle A auf die Wand (Abb. **31**/2a).

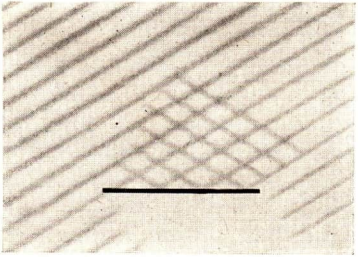


Abb. 31/1. Reflexion geradliniger Wellenfronten an einem geradlinigen Hindernis

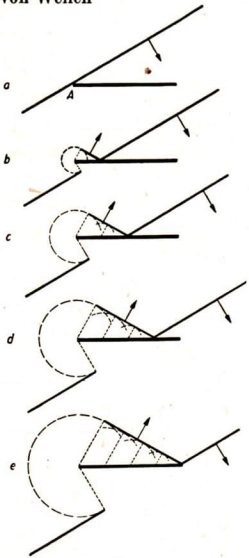


Abb. 31/2. Die Konstruktion der reflektierten Wellen mit Hilfe von Elementarwellen. Die Teilbilder *a* bis *e* zeigen, wie sich die Elementarwellen beim Fortschreiten der Wellenfront ausbreiten. Ihre gemeinsame Tangente ist die Wellenfront der reflektierten Welle.

Nach dem Huygensschen Prinzip bildet sich um jedes Wasserteilchen, das von der ankommenden Welle in Schwingung versetzt wird, eine Elementarwelle aus (Abb. **31**/2b). In demselben Maße, wie die Wellenfront an der Wand entlanggleitet, gehen von allen erregten Teilchen Elementarwellen aus (Abb. **31**/2b bis e). Sie breiten sich mit der gleichen Geschwindigkeit aus wie die auffallende Wellenfront und vereinigen sich zu einer *reflektierten Wellenfront*, die wir im Versuch beobachtet haben (vgl. Abb. **31**/1).

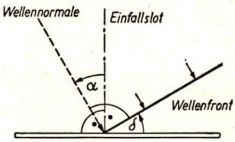


Abb. **32**/1. Die Wellennormale und das Einfallslot; der Einfallswinkel α als Winkel zwischen der Wellennormale und dem Einfallslot

Die bei der Reflexion einer Welle auftretende Richtungsänderung der Wellenfront erfolgt in ganz bestimmter gesetzmäßiger Weise. Zur Wiedergabe der Zusammenhänge benutzt man die Hilfsbegriffe der *Wellennormale* und des *Einfallslotes*. Die Wellennormale ist die auf der Wellenfront senkrecht stehende Richtung. Sie gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an (Abb. **32**/1). Das Einfallslot ist die im Auftreffpunkt der Wellenfront auf dem geradlinigen Hindernis errichtete Senkrechte. Die Richtung einer auftreffenden Welle wird durch den *Einfallswinkel* α festgelegt, den man zwischen dem Einfallslot und der Wellennormale mißt. Der Einfallswinkel α ist ebenso groß wie der von der Wellenfront und der Wand gebildete *Wellenwinkel* δ, da die Schenkel der beiden Winkel paarweise aufeinander senkrecht stehen. In Abb. **32**/2 ist eine reflektierte Welle gezeichnet. Die Gleichheit der Winkel δ_2 und δ_3 folgt aus der Kongruenz der Dreiecke ABC und ABD; denn es ist AB sich selbst gleich, $AD = AC$ als Radien derselben Elementarwelle, $\sphericalangle ADB = \sphericalangle ACB = 90°$. Ferner ist $\delta_2 = \delta_1$ als Scheitelwinkel.

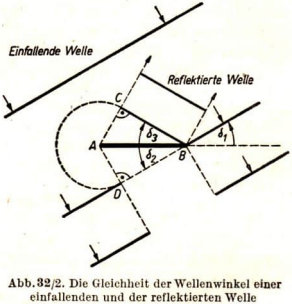


Abb. **32**/2. Die Gleichheit der Wellenwinkel einer einfallenden und der reflektierten Welle

In Abb. **32**/3 sind auch die zur reflektierten Welle gehörende Wellennormale und der zwischen dieser und dem Einfallslot liegende Winkel α' eingezeichnet. Man nennt ihn den *Reflexionswinkel*; er ist gleich δ_3. Da

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$$

und andererseits

$$\delta_1 = \alpha \quad \text{und} \quad \delta_3 = \alpha'$$

ist, sind auch die beiden Winkel α und α'

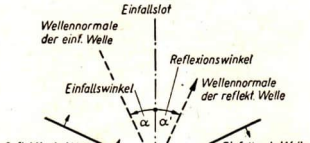


Abb. **32**/3
Schematische Zeichnung zum Reflexionsgesetz. Der Einfallswinkel α ist gleich dem Reflexionswinkel α'.

einander gleich. Es ergibt sich das *Reflexionsgesetz einer Welle*, das uns schon von der Optik her bekannt ist:

Bei der Reflexion einer Welle an einem geradlinigen Hindernis ist der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel.

2. Die Brechung einer Welle. In die Wellenwanne legen wir eine Glasplatte, die vom Wasser nur einige Millimeter bedeckt wird. In dem Flachwasserbereich über der Glasscheibe haben die Wasserwellen eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als im tiefen Wasser. Man unterscheidet zwei Gebiete, in denen sich eine Welle verschieden schnell ausbreitet, als *wellenmäßig dünner* und *wellenmäßig dichter*. Im wellenmäßig dichteren Medium breitet sich eine Welle langsamer aus als im wellenmäßig dünneren. Erzeugen wir nun im tiefen Wasser geradlinige Wellenfronten, die schräg auf die Grenzlinie des tiefen Wassers auftreffen, dann beobachten wir eine Richtungsänderung der Wellenfronten beim Übertritt in das Flachwassergebiet (Abb. **33**/1). Diese Richtungsänderung bezeichnet man als *Brechung*.

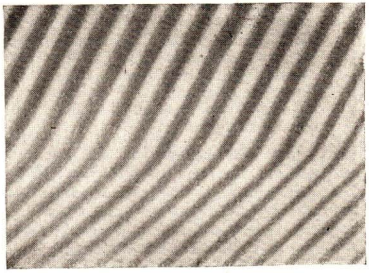


Abb. 33/1. Die Brechung von Wasserwellen beim Übertritt von tiefem in flaches Wasser

Wir erklären die Tatsache der Brechung wieder mit Hilfe des Huygensschen Prinzips, wobei wir uns auf eine einzige Wellenfront beschränken. Diese trifft, aus dem wellenmäßig dünneren Medium kommend, im Punkte A auf die Grenzlinie zwischen den beiden Medien (Abb. **33**/2a). Der Punkt A gleitet beim weiteren Ausbreiten der Welle an der Grenzlinie entlang. Es entstehen um jeden Punkt der Grenzlinie im Flachwasser Elementarwellen, die sich in diesem langsamer ausbreiten als im Tiefwasser. Sie setzen sich zu einer zusammenhängenden Wellenfront zusammen, die mit ihrem im Flachwasser verlaufenden Teil gegenüber dem sich im Tiefwasser ausbreitenden Teil infolge der geringeren Geschwindigkeit zurückbleibt (Abb. **33**/2b bis e). Die Wellenfront ist

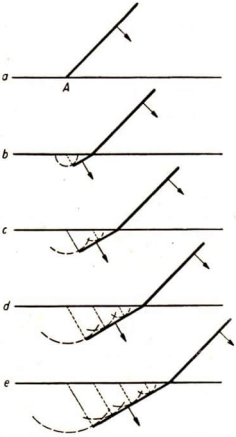


Abb. 33/2. Die Konstruktion der gebrochenen Welle mit Hilfe von Elementarwellen. Die Teilbilder *a* bis *e* zeigen schematisch, wie sich die Elementarwellen im wellenmäßig dichteren Medium langsamer ausbreiten als im wellenmäßig dünneren.

infolgedessen gebrochen. Wir führen wieder den Einfallswinkel α und außerdem den *Brechungswinkel* β ein (Abb. **34**/1). Man versteht darunter den nach dem Übertritt in das zweite Medium von der Wellennormale mit dem Einfallslot gebildeten Winkel.

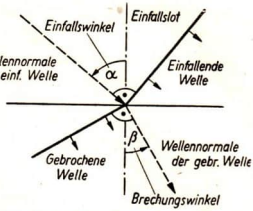


Abb. 34/1. Schematische Zeichnung zur Brechung einer Welle. Beim Übertritt einer Welle vom wellenmäßig dünneren ins wellenmäßig dichtere Medium ist der Brechungswinkel β kleiner als der Einfallswinkel α.

Es ergibt sich das *Brechungsgesetz für Wellen in qualitativer Form:*

> **Beim Übertritt einer Welle aus einem wellenmäßig dünneren in ein wellenmäßig dichteres Medium werden die Wellenfronten in der Weise gebrochen, daß der Brechungswinkel β kleiner ist als der Einfallswinkel α. Beim Übergang vom dichteren ins dünnere Medium ist der Brechungswinkel β größer als der Einfallswinkel α.**

Mit Hilfe der beiden verschiedenen Geschwindigkeiten c_1 und c_2, mit denen sich die Wellenfront im wellenmäßig dünneren und im wellenmäßig dichteren Medium ausbreitet, kann man den zwischen dem Einfalls- und dem Brechungswinkel bestehenden Zusammenhang unter Verwendung der Sinusfunktion dieser beiden Winkel quantitativ ausdrücken. In Abb. **34**/2, die noch einmal den Brechungsvorgang vereinfacht wiedergibt, ist

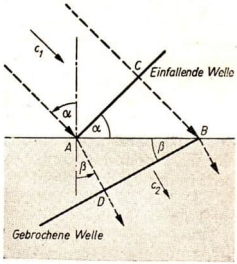


Abb. 34/2. Schematische Darstellung der Brechung einer Welle beim Übergang von einem wellenmäßig dünneren zu einem wellenmäßig dichteren Medium

im Dreieck ABC (dünneres Medium)

$$\sin\alpha = \frac{CB}{AB},$$

im Dreieck ABD (dichteres Medium)

$$\sin\beta = \frac{AD}{AB}.$$

Die Strecken CB und AD werden beide von der Wellenfront in der gleichen Zeit t, aber mit verschiedenen Geschwindigkeiten c_1 und c_2 durchlaufen. Es ist

$$CB = c_1 \cdot t, \qquad AD = c_2 \cdot t.$$

Demnach ergibt sich

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{CB}{AB} \cdot \frac{AB}{AD} = \frac{CB}{AD} = \frac{c_1 \cdot t}{c_2 \cdot t} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Wie man aus dieser Gleichung ersieht, ist das Verhältnis der Sinuswerte des Einfalls- und des Brechungswinkels von der jeweiligen Größe des Einfallswinkels unabhängig. Es ist lediglich abhängig von der Größe der Wellengeschwindigkeiten in den beiden Medien. Man bezeichnet dieses Sinusverhältnis als das *Brechungsverhältnis* (Formelzeichen n).

Es ergibt sich die allgemeine *quantitative Form des Brechungsgesetzes* für Wellen:

Beim Übergang einer Welle von einem Medium in ein anderes wird sie gebrochen. Das Brechungsverhältnis ist konstant; es ist gleich dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten in den beiden Medien.

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2}.$$

3. Fragen und Aufgaben:

1. Wie heißt das Reflexionsgesetz der Wellen?
2. Wie läßt sich die Reflexion einer Wellenfront mit Hilfe des Huygensschen Prinzips darstellen?
3. In welcher Weise wird eine Wellenfront gebrochen, wenn sie aus einem wellenmäßig dichteren in ein wellenmäßig dünneres Medium übertritt?
4. Erläutern Sie die Brechung einer Wellenfront nach dem Huygensschen Prinzip!
5. Warum ist der Übertritt einer Welle ins wellenmäßig dichtere Medium mit einer Verkürzung der Wellenlänge verbunden?
6. Welche Wellenlänge hat eine Wasserwelle der Frequenz $f = 13$ Hz in tiefem Wasser, in dem sie sich mit einer Geschwindigkeit von $c_1 = 23$ cm/s fortbewegt? Welche Wellenlänge hat diese Welle nach dem Übertritt in ein Flachwassergebiet, in dem sie eine Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_2 = 20$ cm/s besitzt?

§ 9. Stehende Wellen

1. Die Reflexion einer fortschreitenden Schwingung am festen und am losen Ende. Ein Seil oder ein Gummischlauch wird an einem Wandhaken befestigt. Das freie Ende wird mit einer Hand gefaßt und ruckartig einmal auf und nieder bewegt. Dadurch entsteht eine Ausbuchtung, die durch das Seil oder den Schlauch bis zur Wand läuft, dort reflektiert wird und zur Hand zurückläuft (Abb 35/1). Es erscheint nicht überraschend, daß die durch den Ruck hervorgerufene Seilschwingung als Ausbuchtung nach oben zur Wand läuft, jedoch als Ausbuchtung nach unten zurückkommt. Es findet eine Phasenumkehr statt. Man bezeichnet diesen Reflexionsvorgang als *Reflexion am festen Ende.*

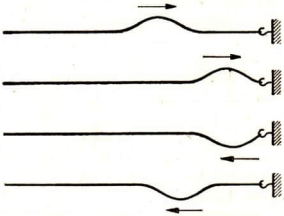


Abb. 35/1. Reflexion der Ausbuchtung einer Seilwelle an einer festen Wand – *Phasenumkehr*

Wir verändern die Versuchsanordnung insofern, als wir das Seil nicht unmittelbar, sondern mittels eines genügend langen, dünnen Fadens an der Wand befestigen. Der Querimpuls des Seiles wird jetzt am freien Ende reflektiert; eine Umkehr der Ausbuchtung tritt bei der

Reflexion am losen Ende nicht ein (Abb. **36**/1).

Man kann auch mit Hilfe des bereits in § 4, 1 erwähnten Juliusschen Wellengerätes feststellen, daß die Reflexion eines Querimpulses in verschiedener Weise erfolgen kann. Zur Darstellung der Reflexion am festen Ende klemmt man den obersten Querstab fest. Ein nach oben laufender Drehimpuls wird in der in Abb. **36**/2 dargestellten Weise reflektiert. Auch hier läuft die Schwingung wie in Abb. **35**/1 im entgegengesetzten Sinne zurück.

Gibt man den obersten Querstab frei, so läuft die Schwingung entsprechend Abb. **36**/1 im gleichen Sinne zurück.

2. Stehende Wellen. Wir wissen aus § 5, 2, daß die Ausbreitung eines Stoßes, mithin eines Längsimpulses, in einem elastischen Körper der Ausbreitung einer Welle wesensgleich ist. Dasselbe gilt auch für Querimpulse. Gehen wir nun von der Reflexion eines Impulses zur Reflexion einer Welle über, so stellt sich heraus, daß man die Reflexion einer Welle nicht mehr in so übersichtlicher Weise verfolgen kann wie beim Impuls, weil jetzt die ständig nachfolgenden Wellen die Beobachtung sehr erschweren. Beschränken wir uns beispielsweise beim gespannten Seil nicht nur auf eine einfache Ausbuchtung, sondern bewegen das freie Ende periodisch auf und ab, dann zeigt sich auf dem Seil die in Abb. **36**/3 dargestellte Schwingungsform.

Das Charakteristische der Erscheinung ist, daß die Welle nicht fortschreitet, sondern daß auf dem Seil Stellen vorhanden sind, die ständig in Ruhe bleiben, und daß dazwischen andererseits Stellen maximaler Schwingung liegen. Im Gegensatz zu einer fortschreitenden Seilwelle, bei der alle Teilchen nacheinander Schwingungen ausführen, bezeichnet man diese eben be-

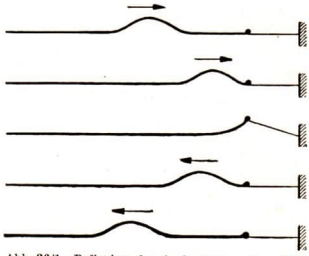


Abb. **36**/1. Reflexion der Ausbuchtung einer Seilwelle an einem beweglichen Ende – *Phasengleichlauf*

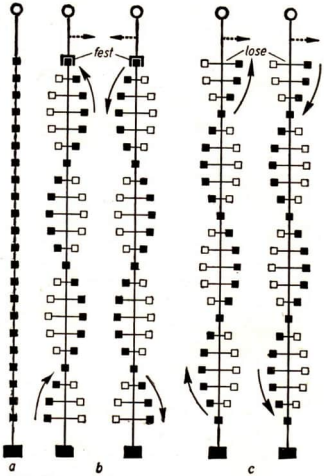


Abb. **36**/2. Reflexion eines Querimpulses am Juliusschen Wellengerät
a) Ungestörte Stabreihe. Es sind nur die Stirnflächen sichtbar.
b) Reflexion am festen Ende – Phasenumkehr
c) Reflexion am losen Ende – Phasengleichlauf

Abb. **36**/3. Reflexion einer Seilwelle am festen Ende

schriebene Welle als *stehende Welle*. Stehende Wellen treten auch bei der Reflexion am losen Ende und bei allen Arten von Wellen auf. Man bezeichnet die ständig in Ruhe bleibenden Stellen einer stehenden Welle als *Schwingungsknoten*, die Stellen maximaler Schwingung als *Schwingungsbäuche*.

3. Die Überlagerung von Wellen. Bei der Erläuterung des Zustandekommens einer stehenden Welle gehen wir von der Reflexion eines Quer- bzw. Längsimpulses aus. Wir konnten den Vorgang bei der Reflexion einer Einzelschwingung deshalb so gut verfolgen, weil die reflektierte Ausbuchtung auf Teilchen traf, die nach dem ersten Durchlaufen der Einzelschwingung schon wieder zur Ruhe gekommen waren. Bei einer Welle dagegen handelt es sich um eine Folge von mehreren Ausbuchtungen zu beiden Seiten der Nullinie. Bei der Reflexion trifft der vordere Teil der reflektierten Welle auf Teilchen, die sich noch in Schwingung befinden, über die dann der noch nachfolgende Teil der Welle hinwegläuft.

Bei der Reflexion einer Welle haben die anlaufende und die reflektierte Welle gleiche Wellenlänge und gleiche Amplitude. Jedes schwingende Teilchen des Mediums steht sowohl unter dem Einfluß der ankommenden als auch dem der reflektierten Welle. Die beiden Wellen überlagern sich. Die *Überlagerung* zweier Wellen stellen wir zeichnerisch in der Weise dar, daß wir die Ausschläge der beiden sich überlagernden Wellen an jeder Stelle geometrisch addieren (Abb. 37/1).

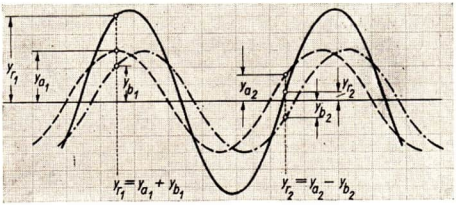


Abb. 37/1. Die zeichnerische Darstellung der Überlagerung zweier Wellen
Welle I gestrichelt, Welle II strichpunktiert, resultierende Welle ausgezeichnet

Arithmetisch ist dabei die Summe bzw. die Differenz der Teilausschläge zu bilden, je nachdem ob die Einzelwellen an der betreffenden Stelle beide in gleicher oder in entgegengesetzter Richtung schwingen. Die Verbindungslinie der sich durch Überlagerung ergebenden Ausschläge heißt die *resultierende Welle*.

In derselben Weise läßt sich auch eine aus zwei Wellen mit unterschiedlicher Amplitude und Wellenlänge resultierende Welle darstellen (Abb. 37/2).

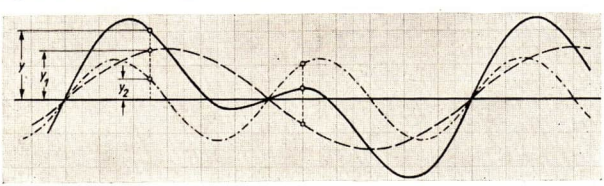


Abb. 37/2. Überlagerung zweier Wellen verschiedener Frequenz

4. Das Zustandekommen stehender Wellen. Man kann das Zustandekommen stehender Wellen zeichnerisch erläutern, indem man die Überlagerung zweier einander entgegenlaufender Wellenzüge gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude in einer Reihe von Momentbildern festhält (Abb. 38/1). Jedes einzelne Bild ist nach dem in Abschnitt 3 angegebenen Verfahren gezeichnet. Von Bild zu Bild ist jede der beiden Teilwellen um eine Achtelwellenlänge weitergeschoben, und zwar die eine nach links, die andere nach rechts. Aus der Zeichnung ersieht man, daß die resultierende Welle überhaupt nicht fortschreitet. Die Schnittpunkte der Welle mit der Nullinie bleiben an derselben Stelle liegen. In Abb. 38/1 sind diese Stellen durch senkrechte Ordnungslinien gekennzeichnet. Es ist das Bild einer stehenden Welle entstanden.

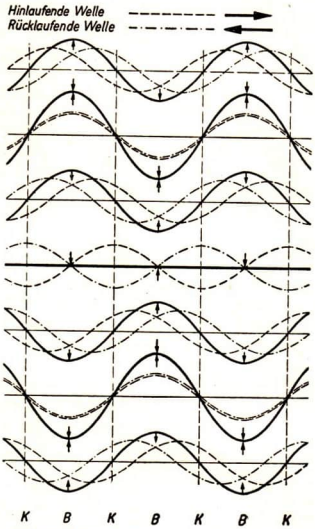


Abb. 38/1. Zeichnerische Entwicklung einer stehenden Welle in aufeinanderfolgenden Momentbildern
Anlaufende Welle (gestrichelt) nach rechts verschoben, reflektierte Welle (strichpunktiert) nach links verschoben — *K* Knoten, *B* Bauch

Eine stehende Welle, die sich durch Reflexion einer Welle am festen Ende bildet, hat am festen Ende selbst einen Knoten. Die anderen Knoten liegen in Abständen ganzzahliger Vielfacher einer halben Wellenlänge $\left(\frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2} \cdots\right)$ vom festen Ende entfernt (Abb. 38/2a).

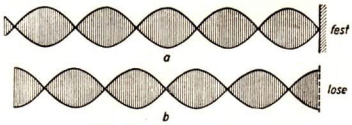


Abb. 38/2. Stehende Wellen
a) Reflexion am festen Ende
b) Reflexion am losen Ende

Bei der Reflexion am losen Ende können die an diesem Ende des Mediums liegenden Teilchen frei ausschwingen. Die zustandekommende stehende Welle hat am Ende einen Schwingungsbauch. Die Knoten liegen in Abständen ungeradzahliger Vielfacher einer Viertelwellenlänge $\left(\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4} \cdots\right)$ vom losen Ende entfernt (Abb. 38/2b).

Stehende Wellen sind bei allen Wellenarten möglich. Stehende Transversalwellen lassen sich gut mit folgender Anordnung erzeugen: Ein mehrere Meter langer Wollfaden wird auf der einen Seite eingespannt, auf der anderen Seite

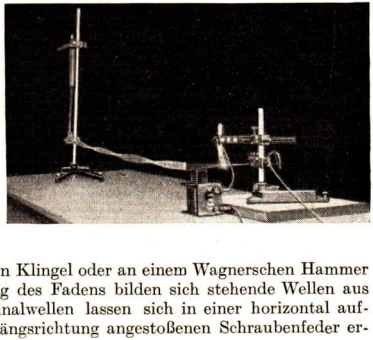


Abb. 39/1. Stehende Transversalwelle auf einem gespannten Faden. Ein Wollfaden wird durch einen Wagnerschen Hammer in periodische Querschwingungen versetzt. Das freie Ende des Fadens ist zur Regelung der Fadenspannung an einer Federwaage befestigt.

an dem Klöppel einer elektrischen Klingel oder an einem Wagnerschen Hammer befestigt. Bei richtiger Spannung des Fadens bilden sich stehende Wellen aus (Abb. 39/1). Stehende Longitudinalwellen lassen sich in einer horizontal aufgehängten, periodisch in der Längsrichtung angestoßenen Schraubenfeder erregen (Abb. 39/2, vgl. auch Abb. 19/3).

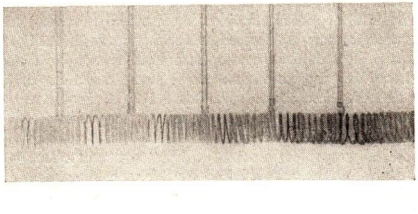


Abb. 39/2. Stehende Longitudinalwelle in einer Schraubenfeder. Die Schraubenfeder wird durch einen Wagnerschen Hammer in Längsschwingungen versetzt. In den Wellenbäuchen befinden sich die einzelnen Federwindungen in starker Erregung. Die photographische Wiedergabe ist in den Bäuchen infolge der Bewegung unscharf. In den Knoten dagegen entstehen scharfe Bilder, da dort die Windungen in Ruhe bleiben.

5. Versuche, Fragen, Aufgaben:

1. Untersuchen Sie mit Hilfe eines mehrere Meter langen gespannten Seiles die Reflexion einer Seilausbuchtung!
2. Erzeugen Sie mit Hilfe eines gespannten Seiles stehende Transversalwellen!
3. Wodurch sind bei stehenden Longitudinalwellen die Schwingungsknoten und -bäuche gekennzeichnet?
4. Es ist die aus zwei Wellen I und II gleicher Wellenlänge resultierende Welle zu zeichnen. (Wellenlänge I und II 8 cm, Amplitude I 1,5 cm, Amplitude II 1 cm, Verschiebung des Anfangspunktes II gegenüber I um 1 cm nach rechts.)
5. Es ist die aus zwei Wellen I und II verschiedener Wellenlängen resultierende Welle zu zeichnen. (Wellenlänge I 8 cm, Wellenlänge II 4 cm, Amplitude I 1,5 cm, Amplitude II 1 cm, gleiche Anfangspunkte.)
6. Wie Aufgabe 5, aber Verschiebung des Anfangspunktes II gegenüber I um 1 cm nach rechts.

AKUSTIK

III. Schallerregung und Schallausbreitung

§ 10. Die akustischen Grundbegriffe

1. Schallquellen. Wenn ein Schall wahrgenommen wird, so muß stets ein Körper vorhanden sein, durch den der Schall verursacht wird. Man nennt diesen Körper die *Schallquelle*. Solche Schallquellen sind beispielsweise ein in einen Schraubstock gespannter, schwingender Stahlstreifen oder eine schwingende Stricknadel (vgl. § 1, 3 und LB 6[1], Abb. 114), eine angeschlagene Stimmgabel, eine gezupfte oder mit einem Bogen gestrichene Saite usw.

Eine nähere Untersuchung zeigt, daß in jeder Schallquelle eine lebhafte Bewegung herrscht. Sie ist unserem Auge häufig verborgen, wir können sie aber durch besondere Hilfsmittel nachweisen, zum Beispiel bei einer angeschlagenen Stimmgabel oder Glocke durch ein kleines Pendel (Glaskügelchen an einem Faden), bei einer angestrichenen Saite durch einen aufgesetzten schmalen Papierreiter, bei einer tönenden Platte durch aufgestreuten Sand usw. Bei einem eingespannten Stahlstreifen kann man regelmäßige Hin- und Herbewegungen, elastische Schwingungen, feststellen. Wenn das freie Ende des Streifens hinreichend lang ist, kann man unter Umständen die Schwingungen sehen, ohne von ihnen etwas zu hören (vgl. Abb. 8/1). Verkürzt man das freie Ende, so folgen die Schwingungen immer schneller aufeinander, ihre Frequenz nimmt zu. Von einer gewissen Verkürzung an hört man einen Ton.

Man hat festgestellt, daß ein Mensch einen Ton erst dann wahrnimmt, wenn die Frequenz etwa 16 Schwingungen je Sekunde oder 16 Hertz (Hz) beträgt. Verkürzt man den Stahlstreifen immer mehr, so gelangt man zu einer *Grenzfrequenz*, oberhalb deren man einen Ton nicht mehr wahrnimmt (vgl. § 17). Sie liegt für das menschliche Ohr bei etwa 20000 Hz und sinkt bei einem alternden Menschen auf 16000 Hz, ja bis auf 14000 Hz oder gar 12000 Hz ab.

2. Tonhöhe. Ein Ton ist um so höher, je größer die Frequenz der Schwingungen ist. Man kann dies experimentell mit Hilfe einer *Zahnradsirene* nachweisen (Abb. 40/1). Sie besteht aus einer Gruppe

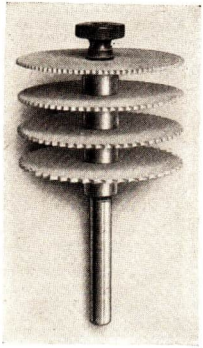


Abb. 40/1. Zahnradsirene
Die einzelnen Zahnräder haben der Reihe nach von unten nach oben die Zähnezahlen 24, 30, 36, 48.

[1] LB 6 bedeutet Lehrbuch der Physik für das 6. Schuljahr. Entsprechende Bedeutung haben die Zeichen LB 7, LB 8 und LB 9 für das 7., 8. und 9. Schuljahr.

von Zahnrädern mit verschiedener Zähnezahl, die auf der gleichen Achse befestigt sind und in Umdrehung versetzt werden. Wird ein federnder Pappstreifen gegen die Zähne eines Rades gedrückt, so führt er *periodische Schwingungen* aus, die sich auch auf die umgebende Luft übertragen. Bei langsamer Drehung hört man ein Schnarren, bei schnellerer Bewegung einen Ton, der mit zunehmender Drehzahl höher wird.

Drückt man den Pappstreifen der Reihe nach gegen die einzelnen Räder, so erklingen verschiedene Töne. Meist sind die Zähnezahlen der Räder so gewählt, daß der *Dur-Dreiklang* ertönt.

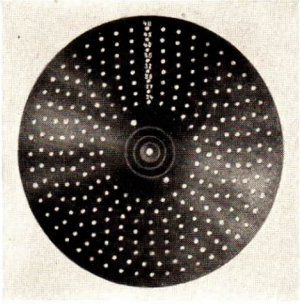


Abb. **41**/1. Lochsirene
Die Scheibe enthält, von innen nach außen gezählt, acht Lochreihen mit 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48 Löchern.

Man kann auch durch periodische Luftstöße einen Ton hervorrufen. Eine hierzu geeignete Vorrichtung ist die *Lochsirene* (Abb. **41**/1). Auf einer kreisförmigen Scheibe sind mehrere Lochreihen konzentrisch angeordnet. Die Löcher einer jeden Reihe haben gleiche Abstände voneinander. Die Scheibe wird möglichst gleichförmig gedreht. Dabei bläst man durch einen Schlauch mit angesetztem Röhrchen gegen eine Lochreihe. Es entstehen *periodische Luftstöße*. Wenn die Frequenz 16 Hz überschreitet, hören wir einen Ton, der um so höher wird, je schneller sich die Scheibe dreht.

Aus den Versuchen folgt:

Ein Ton wird durch elastische Schwingungen eines festen Körpers oder durch regelmäßige Luftstöße hervorgerufen. Der Ton ist um so höher, je größer die Frequenz der periodischen Bewegung ist.

Erst von einer gewissen Mindestfrequenz an tritt eine Gehörsempfindung auf, die man als **Ton** bezeichnet.

Die Tonhöhe ist durch die Frequenz der Schallquelle bedingt. Man erkennt dies am einfachsten am Beispiel der Tonleiter. Sie erklingt, wenn man die in Abb. **41**/1 wiedergegebene Lochsirene in schnelle, gleichmäßige Umdrehungen versetzt und die Lochreihen nacheinander von innen nach außen anbläst. Hält man die Drehzahl längere Zeit konstant auf 5,5 Umdr./s, so hört man die Töne, die man in der Musik mit den lateinischen Buchstaben c, d, e, f, g, a, h, c′ bezeichnet. Zu jedem Ton gehört eine bestimmte Frequenz, die man aus folgender Zusammenstellung entnehmen kann:

c	d	e	f	g	a	h	c′
132	148,5	165	176	198	220	247,5	264 Hz

Man ersieht am Beispiel des ersten und des letzten Tones, daß sich die Schwingungszahl verdoppelt, wenn man vom Grundton zur nächsthöheren Oktave übergeht.

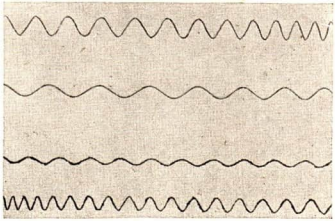


Abb. 42/1. Aufzeichnungen von Stimmgabelschwingungen auf einer mit Lykopodium bestäubten Glasplatte

Sehr reine Töne bestimmter Höhe erzeugt man durch Stimmgabeln. Eine Gabel mit der Frequenz 440 Hz erregt einen Ton, den man das eingestrichene a nennt; sein Zeichen ist a′.

Wie man die Schwingungen einer Stimmgabel aufzeichnen kann, haben wir bereits in § 2,1 kennengelernt. Abb. 42/1 zeigt noch einmal das Ergebnis einer Reihe von Versuchen. Aus den aufgezeichneten Wellenlinien erkennt man die periodische Bewegung der Stimmgabelzinke. Die Wellenlinien haben die Form von Sinuslinien. Man nennt Schwingungen dieser Art, wie sie Stimmgabelzinken ausführen, *harmonische Schwingungen.*

3. Tonstärke. Man kann eine Gabel stark oder schwach anschlagen. Die Höhe des Tones wird dadurch nicht beeinflußt, wohl aber seine **Stärke**. Auch beim allmählichen Abklingen einer angeschlagenen Gabel ändert sich die Tonhöhe nicht, sondern der Ton wird nur leiser.

Je größer die Amplitude der Schwingungen ist, desto lauter ist der Ton.

In Abb. 42/1 ist die Amplitude der Schwingungen aus der Höhe der Wellenberge zu erkennen. Die erste Kurve entspricht den Schwingungen einer laut klingenden, die dritte denen einer leise klingenden Stimmgabel.

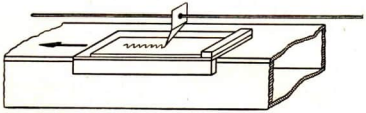


Abb. 42/2. Schreibspitze an einer Messingsaite zum Aufzeichnen der Saitenschwingungen

4. Klangfarbe. Man kann auch die Schwingungen einer Saite aufzeichnen. Zu diesem Zwecke lötet man an eine Messingsaite eine Schreibspitze (Abb. 42/2) und spannt die Saite auf einem Monochord aus (vgl. LB 6, Abb. 119). Man erregt sie durch Anstreichen oder Zupfen und zieht gleichzeitig wie bei dem in Abschnitt 3 beschriebenen Stimmgabelversuch eine berußte oder mit Lykopodium eingestäubte Glasplatte in der Längsrichtung der Saite an der Spitze vorbei. Auf der Glasplatte ergeben sich wieder Wellenlinien (Abb. 42/3). Diese sind

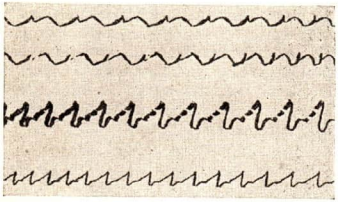


Abb. 42/3. Saitenschwingungen. Die beiden oberen Kurven wurden durch eine gezupfte Saite, die beiden unteren Kurven durch eine gestrichene Saite aufgezeichnet.

aber nicht so gleichmäßig abgerundet wie beim Stimmgabelversuch, sondern sehen *sägezahnförmig* aus. Sie zeigen viele große und kleine Zacken. Je nach der Art der Erregung durch Zupfen oder Streichen ergeben sich verschiedene Formen. Gleichzeitig hört man, daß sich auch der Klang der Saite mit der Art der Erregung ändert. Es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen der *Klangfarbe* des Saitentones und der Form der erregten Schwingungen.

Auch bei *Luftschwingungen* kann man sichtbare Wirkungen hervorrufen. Am besten gelingt dies mit Hilfe eines Mikrophons und eines damit verbundenen *Dosenoszillographen*. Ein Oszillograph ist ein elektrischer Schwingungsschreiber. Das hier verwendete Gerät ist aus der Hörkapsel eines Telephons gefertigt, mit deren Membran ein kleines, leichtes *Schwingspiegelchen* verbunden ist. Von einer kleinen Projektionslampe wird ein enges Lichtbündel auf den Schwingspiegel und von dort über einen Drehspiegel auf einen Schirm geworfen. Die Versuchsanordnung ist aus Abb. 43/1 zu erkennen.

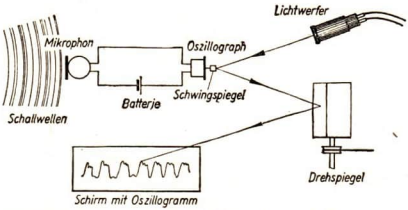


Abb. 43/1. Versuchsanordnung zur Wiedergabe einer Tonkurve durch einen Schwingspiegeloszillographen (schematisch). Auf dem Schirm erscheint das Tonbild der Schallquelle.

Hält man vor das Mikrophon eine Stimmgabel oder eine andere Schallquelle, so gerät das Schwingspiegelchen ebenfalls in periodische Schwingungen. Versetzt man den Drehspiegel in Umdrehungen, so erscheint auf dem Schirm ein Kurvenbild des aufgenommenen Tones (Abb. 43/2).

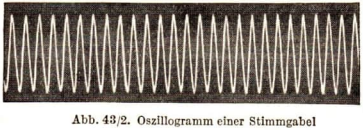


Abb. 43/2. Oszillogramm einer Stimmgabel

Singt man verschiedene Vokale mit gleicher Tonhöhe gegen das Mikrophon, so ergeben sich je nach der Klangfarbe des Vokals Kurvenbilder von regelmäßiger Form mit großen und kleinen Zacken (Abb. 43/3). Man sieht auch hier, daß zwischen der Klangfarbe und der Schwingungsform ein bestimmter Zusammenhang vorhanden ist.

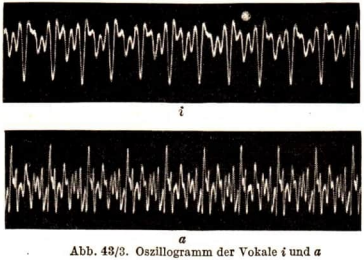


Abb. 43/3. Oszillogramm der Vokale *i* und *a*

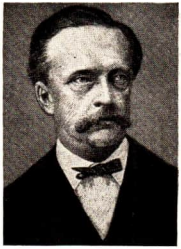
Die in den Abschnitten 2, 3 und 4 geschilderten Versuche zeigen, daß ein eindeutiger

Zusammenhang der Gehörsempfindungen mit den rein physikalischen Eigenschaften der Schallquellen besteht, und zwar entsprechen sich:

Tonhöhe und Schwingungszahl je Sekunde (Frequenz),

Tonstärke und Schwingungsweite (Amplitude),

Klangfarbe und Schwingungsform.



Hermann von Helmholtz (1821—1894)

Wir haben bisher zwischen *Tönen und Klängen* nicht unterschieden. Auf Grund der von *Hermann von Helmholtz*[1] durchgeführten Forschungen ist es üblich geworden, in der Akustik nur dann von Tönen zu sprechen, wenn die Gehörsempfindung durch rein sinusförmige, harmonische Schwingungen hervorgerufen wird. Der Begriff Klang dient zur Kennzeichnung einer Empfindung, wenn die verursachten Schwingungen zwar auch periodisch, aber nicht sinusförmig sind. Nach dieser Festsetzung geben nur Stimmgabeln Töne, alle Musikinstrumente aber Klänge.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Durch welche physikalische Größe wird die Höhe eines Tones bestimmt?
2. Von welcher Eigenschaft der tonerzeugenden Schwingungen ist die Stärke eines Tones abhängig?
3. Was ändert sich an einem Ton, wenn man einer tönenden Schallquelle mehr Energie zuführt?
4. Welchen Einfluß haben die Frequenz und die Amplitude einer hörbaren Schwingung auf die Schallwahrnehmung?
5. Der Lochkreis einer Lochsirene hat 22 Löcher. Wieviel Umdrehungen muß die Sirene in einer Sekunde machen, wenn sie beim Anblasen den Ton a′, das eingestrichene a, mit der Frequenz $f = 440$ Hz geben soll?
6. Mit Hilfe einer Lochsirene wird ein Ton mit der Frequenz 500 Hz erzeugt. Die Umdrehungszahl der Sirene wird a) auf den vierten Teil herabgesetzt, b) auf das Vierfache gesteigert. Welchen Einfluß hat dies auf die Töne, die dabei zu hören sind?
7. Worin unterscheiden sich Töne und Klänge?
8. Beschreiben Sie die Vorgänge, die sich bei der Untersuchung von Luftschwingungen mittels des in Abb. 43/1 wiedergegebenen Schwingspiegeloszillographen abspielen!

---

[1] Hermann von Helmholtz (1821–1894), deutscher Physiker von universeller Bedeutung. Er erkannte die allgemeine Bedeutung des Satzes von der Erhaltung der Energie und führte grundlegende Forschungen auf dem Gebiet der Schwingungslehre durch. Er erfand den nach ihm benannten Augenspiegel.

§ 11. Die Schallwellen – Das Echo

1. Das Medium. Wir haben bereits in der Grundschule erfahren, daß man nur dann einen Schall wahrnehmen kann, wenn sich zwischen der Schallquelle und dem Ohr ein Stoff befindet. Diesen Stoff nennt man, wie wir bereits in § 4, 1 erfuhren, das Mittel oder das *Medium*. Die Schallquelle ist der *Sender*, das Ohr der *Empfänger* und das Medium der *Vermittler* oder der Träger des Schalles. Durch den leeren Raum breitet sich der Schall nicht aus (vgl. LB 6, § 19, 1).

Die Vorgänge, die sich im Medium bei der Schallausbreitung abspielen, kann man nicht unmittelbar wahrnehmen. Gelegentlich kann man beobachten, daß Kerzenflammen zittern, wenn in der Nähe eine Uhr schlägt. Zur näheren Untersuchung des Verhaltens der Luft bei der Schallausbreitung führt man folgenden Versuch aus (Abb. 45/1).

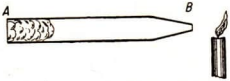


Abb. 45/1. Ausbreitung eines Luftstoßes in einem Rohr. Die Luftteilchen geben den Impuls weiter. Die Luftmasse als Ganzes bewegt sich aber nicht vorwärts.

Ein beiderseits offenes, etwa 3 m langes Glasrohr mit einem Durchmesser von 5 bis 8 cm ist an dem Ende *B* verjüngt. Vor *B* stellen wir eine brennende Kerze und bringen durch die andere Öffnung *A* etwas Rauch in das Rohr. Erzeugen wir dann vor *A* ein kräftiges Geräusch, etwa durch Händeklatschen oder Gegeneinanderschlagen zweier Holzklötze, so zuckt die Flamme und wird unter Umständen sogar ausgelöscht, während der Rauch an seiner Stelle liegenbleibt. Es wird demnach nicht die gesamte im Rohr befindliche Luftmenge von *A* nach *B* hin in Bewegung gesetzt, sondern nur ein Stoß durch die Luft übertragen. Das Kennzeichnende des Vorganges ist die Weitergabe von Bewegungsenergie ohne Mitführung von Luftteilchen.

Auch Flüssigkeiten und feste Körper leiten den Schall, wie wir bereits in der Grundschule erfuhren (vgl. LB 6, § 19, 1b). Man kann sich beispielsweise durch Schallsignale unter Wasser verständigen, sogar deutlicher als in der Luft. Der Erdboden kann den Schall ebenfalls leiten.

2. Die Schallwellen. Im einzelnen verläuft die Schalleitung in der Luft folgendermaßen:

Die periodischen Bewegungen, die wir bei einer Schallquelle, etwa einer schwingenden Stimmgabel, beobachten, versetzen die angrenzenden Luftteilchen in Schwingungen von der Frequenz der Schallquelle. Jedes erregte Luftteilchen wirkt seinerseits auf die benachbarten Luftteilchen ein, die mit ihm druckelastisch gekoppelt sind. Die Luftteilchen schwingen aufeinander zu und voneinander fort. So breiten sich in der Luft nach allen Seiten hin schnell aufeinanderfolgende *Luftverdichtungen* und *Luftverdünnungen* wellenartig aus (vgl. den in Abb. 20/1 wiedergegebenen Modellversuch). Die Geschwindigkeit der Ausbreitung ist nach allen Richtungen hin gleich groß. Denken wir uns um die Schallquelle als Mittelpunkt konzentrische Kugeln gelegt, so herrscht in einem gegebenen Augenblick an der Oberfläche einer solchen Kugel an allen

Stellen der gleiche Schwingungszustand (Abb. 46/1). Die geschilderte periodische Weitergabe der entstehenden Luftverdichtungen und -verdünnungen nennt man eine *Schallwelle*. Nach dem Huygensschen Prinzip (vgl. § 7) sind die erwähnten Kugeln die Wellenfronten oder Wellenflächen dieser Schallwelle. Alle Luftteilchen auf einer Wellenfläche schwingen in gleicher Phase.

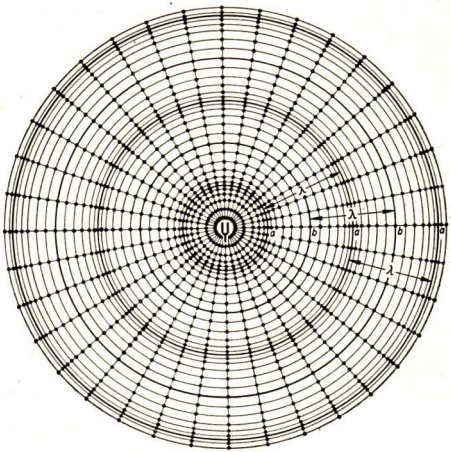


Abb. 46/1. Schematische Darstellung der Ausbreitung des Schalles in der Luft durch wellenförmig aufeinanderfolgende Luftverdichtungen und -verdünnungen. Die dargestellten Kreise sind Schnitte durch Kugeln. Man muß sich die Abbildung räumlich ergänzt denken.

Schreitet man von einer Wellenfront aus auf einer Wellennormale vorwärts, so kommt man in regelmäßigen Abständen zu Wellenflächen, auf denen die Luftteilchen in der gleichen Phase schwingen wie auf der Ausgangsfläche (Abb. 46/2). Der so bestimmte Abstand ist ein Maß für die Wellenlänge der betrachteten Schallwelle. Man kann die Wellenlänge einer Schallwelle auch dadurch festlegen, daß man auf einer Wellennormale den Abstand aufeinanderfolgender Stellen stärkster Luftverdichtung bzw. Luftverdünnung bestimmt.

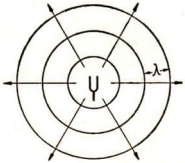


Abb. 46/2. Wellenfronten und Wellennormalen einer kugelförmigen Schallwelle (schematisch)

3. Die Schallwahrnehmung. Ein Ton wird nur dann hörbar, wenn die ihn übertragende Schallwelle auf ein *Gehörorgan* trifft, wie es beispielsweise bei den Wirbeltieren entwickelt ist. Näheres über das menschliche Gehörorgan vermittelt der Biologieunterricht. Zu vergleichen ist auch LB 6, § 20,4b.

4. Die Schallgeschwindigkeit. Von der Grundschule her ist bekannt, daß der Schall in der Luft in 1 s etwa $\frac{1}{3}$ km zurücklegt. Es hat sich gezeigt, daß die Schallgeschwindigkeit in Luft mit der Temperatur wächst.

Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt bei 0 °C 331 m/s, bei 15 °C 340 m/s.

Die Schallgeschwindigkeit in der Luft ist außerdem von der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit abhängig. Sie wächst mit zunehmender Luftfeuchtigkeit. Die Schallgeschwindigkeit in Wasser beträgt 1450 m/s. Sie ist demnach etwa 4mal so groß wie in der Luft. Noch bedeutend größer ist die Schallgeschwindigkeit in festen Körpern.

Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Stoffen. Durchschnittswerte in m/s

Kohlendioxyd	260	Eichenholz	3400
Luft bei 0° C	331	Ziegelstein	3600
Luft bei 15° C	340	Glas	5000...5300
Benzin	1160	Blei	1300
Alkohol	1160	Zink	3700
Wasser	1400	Stahl	5100
Eis	3200	Aluminium	5100

In neuerer Zeit hat die Übertragung von Schallsignalen unter Wasser für die Nachrichtenübermittlung große Bedeutung gewonnen. Dabei wird meist Schall sehr hoher Frequenz, *Ultraschall*, verwendet (vgl. § 17). Die Schallgeber werden in diesem Falle elektrisch angeregt.

5. Die Reflexion des Schalles – Echo und Nachhall. Man kann im Freien beobachten, daß Mauern, Waldränder und ähnliche Hindernisse den Schall zurückwerfen. Man spricht dann von einem *Echo*. Die Reflexion der Schallwellen erfolgt in der gleichen Weise wie bei den Wasserwellen.

Aus der Schallgeschwindigkeit und der zwischen dem Erregen des Schalles und dem Wahrnehmen des Echos verfließenden Zeit kann man die Entfernung der reflektierenden Wand bestimmen. Diese Erkenntnis hat eine große Bedeutung gewonnen bei der Messung der Wassertiefe durch *Echolotung* von einem Schiffe aus. Die unmittelbare Bestimmung der Wassertiefe mit Hilfe eines Lotes ist umständlich und läßt sich nur bei ruhenden Schiffen ausführen. Abb. 47/1 zeigt das Prinzip einer Echolotung nach *Behm*. Durch einen in die Schiffswand eingebauten Schallgeber wird ein kurz andauerndes Schallsignal erzeugt. Heute arbeitet man dabei meist mit Ultraschall (Abb. 47/2 – Näheres über den Ultraschall bringt § 17). Die Schallwellen durchlaufen das Wasser, werden am Meeresboden

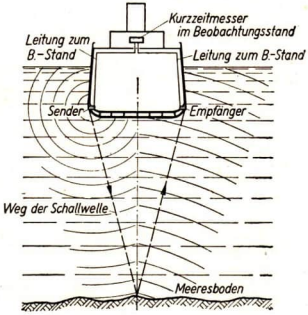


Abb. 47/1. Schematische Wiedergabe einer Echolotanlage

Abb. 47/2
Ultraschallsender einer Echolotanlage

reflektiert und von einem in der gegenüberliegenden Schiffswand befindlichen Empfänger wieder aufgefangen. Die Registrierung des Echos erfolgt im Innern des Schiffes an einem Beobachtungsstand, der mit dem Sender und dem Empfänger in Verbindung steht. Das Empfangsgerät ist so eingerichtet, daß man an der Skala des Instrumentes die Wassertiefe ohne Rechnung ablesen kann (Abb. 48/1). Das Schiff braucht während der Messung seine Fahrt nicht zu unterbrechen, da seine Geschwindigkeit gegenüber der hohen Geschwindigkeit des Schalles im Wasser ohne wesentlichen Einfluß auf die Laufzeit des Echos und damit auf die Genauigkeit der Ergebnisse ist.

Abb. 48/1. Echolotgerät, hergestellt vom volkseigenen RFT-Funkwerk Berlin-Köpenick. Das Gerät steht im Beobachtungsstand des Schiffes. Es enthält zwei Skalen für Feinmessung und für Grobmessung, auf denen die Wassertiefe unmittelbar abgelesen wird.

Mit Hilfe des Echolotes kann man ausgedehnte Profile des Meeresbodens in verhältnismäßig kurzer Zeit untersuchen, ohne daß die Fahrt unterbrochen zu werden braucht. Neuerdings verwendet man das Echolot zum Auffinden größerer Fischschwärme.

Zwischen zwei Schallreizen muß mindestens eine Zehntelsekunde verstreichen, wenn sie getrennt voneinander vom Ohr unmittelbar wahrgenommen werden sollen. Es kommt daher bei weniger als 17 m Abstand von einer Wand nicht zur Ausbildung eines deutlichen Echos. Es tritt dann eine Erscheinung auf, die man als *Nachhall* bezeichnet.

In geschlossenen Räumen treffen auf das Ohr eines Hörers nicht nur die unmittelbar von der Schallquelle ausgegangenen Schallwellen, sondern weitere Wellenzüge, die unter Umständen mehrfach an den Wänden reflektiert worden sind. Die Zeiten zwischen den Auslösungen der Schallreize durch die unmittelbaren und die reflektierten Schallwellen können so kurz sein, daß die durch sie hervorgerufenen Gehörsempfindungen zu einer einheitlichen Wahrnehmung verschmelzen. Es entsteht dann bei dem Hörer der Eindruck, als ob nur ein einziger Reiz mit verlängerter Dauer wirksam sei. Man hört dadurch deutlicher als ohne den Einfluß der reflektierten Schallwellen. Eine gewisse, sehr geringe Nachhallzeit ist demnach für das Hören in geschlossenen Räumen durchaus günstig. Wenn aber der unmittelbar auf das Ohr treffende Schall und der reflektierte Schall gesondert wahrgenommen werden, so ist die klare Erfassung eines gesprochenen Wortes oder einer Melodie empfindlich gestört. Man spricht in einem solchen Falle von einer schlechten Hörsamkeit oder einer *schlechten Akustik* des Raumes. Die Hörsamkeit großer Räume hängt nicht nur von der gesamten Raumanlage ab, sie läßt sich auch durch Auskleidung der Räume mit schallschluckenden oder schalldämmenden Stoffen beeinflussen. Sie wird außerdem durch die Besetzung des Saales beeinflußt.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Wie erfolgt die Ausbreitung des Schalles in einem Medium?
2. Welchen Einfluß hat die Elastizität eines Mediums auf die Ausbreitung des Schalles?

3. Welche Umstände beeinflussen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft und in welcher Weise?
4. Warum hört man den Pfiff einer sich nähernden Lokomotive bei nebligem Wetter aus größerer Entfernung als bei klarem Wetter?
5. Ein Beobachter hört das Echo eines kurzen Pfeifensignals 0,8 s nach dem Senden. Wie weit steht er von der echogebenden Wand entfernt? (Schallgeschwindigkeit 340 m/s bei 15 °C.)
6. Das menschliche Ohr vermag zwei Schallreize gerade noch getrennt zu empfinden, wenn der zweite Schallreiz dem ersten nicht in einer kürzeren Zeitspanne als $\frac{1}{10}$ s folgt. Wie weit darf man sich einer echogebenden Wand nähern, wenn man noch ein Echo wahrnehmen will? (Schallgeschwindigkeit 330 m/s bei 0 °C.)
7. Man mißt auf einem Schiff am Echolot zwischen dem Senden und dem Empfang eines Signals eine Laufzeit von a) 0,24 s, b) 0,36 s, c) 1,13 s. Wie groß ist jedesmal die Wassertiefe? (Die Breite des Schiffes ist zu vernachlässigen; die Schallgeschwindigkeit in Wasser beträgt 1450 m/s.)

§ 12. Der Doppler-Effekt

1. Kennzeichen des Doppler-Effektes. Wenn ein Beobachter am Straßenrande steht und ein sich mit hoher Geschwindigkeit nähernder Kraftwagen ein Signal gibt, so hat der Beobachter den Eindruck, daß der Ton der Hupe in einen tieferen Ton gerade in dem Augenblick umschlägt, in dem der Wagen an ihm vorüberfährt.

Eine entsprechende Frequenzänderung nimmt man wahr, wenn man mit großer Geschwindigkeit an einer ruhenden Schallquelle, etwa einer tönenden Werksirene, vorbeifährt.

Bei dem Pfeifton einer Lokomotive kann man unter entsprechenden Bedingungen ähnliche Beobachtungen machen.

Die beschriebenen Erscheinungen haben ihre Ursache in der Wellennatur des Schalles. *Christian Doppler*[1] hat als erster 1842 darauf aufmerksam gemacht, daß bei Wahrnehmungen, die uns durch Wellenvorgänge irgendwelcher Art vermittelt werden, eine Relativbewegung zwischen dem Wellenzentrum und dem Beobachter einen Einfluß auf die am Beobachtungsort festgestellte Frequenz hat. Man bezeichnet daher derartige Frequenzänderungen, die sich bei den angeführten Beispielen in einem plötzlichen Absinken der Tonhöhe äußern, allgemein als **Doppler-Effekt**.

Den Doppler-Effekt kann man durch folgenden Versuch nachweisen:

Man schließt eine auf einen festen Ton abgestimmte Pfeife mittels eines langen Gummischlauches an eine mit komprimierter Luft oder Kohlensäure gefüllte und mit einem Reduzierventil versehene Stahlflasche an und läßt die Pfeife tönen. Dann schwingt man sie über dem Kopfe auf einer waagerechten Kreisbahn herum. Ein in der Kreisebene befindlicher Beobachter vernimmt beim Nähern der Pfeife ein Ansteigen und beim Entfernen ein Absinken der Tonhöhe.

[1] Christian Doppler (1803–1853), Professor der Mathematik in Prag und Wien

2. Qualitative Veranschaulichung des Doppler-Effektes. Wir beurteilen die Höhe eines Tones nach der Zahl der Impulse, die je Sekunde auf unser Ohr einwirken. Wenn sich eine Schallquelle und ein Beobachter in einer beliebigen konstanten Entfernung voneinander befinden, dann erreichen in jeder Zeitspanne ebenso viele Schallwellen das Ohr des Beobachters, wie sie die Schallquelle in dieser Zeit aussendet. So ist es bei einem im fahrenden Kraftwagen sitzenden Beobachter, der den Ton der Wagenhupe hört. Die Frequenz des wahrgenommenen Tones stimmt in diesem Falle mit der Frequenz der Schwingungen der Schallquelle überein. Wenn sich aber die Entfernung zwischen der Schallquelle und dem Beobachter verringert, dann treffen je Sekunde mehr Impulse auf das Ohr des Beobachters als zuvor, das heißt, die Frequenz des Tones ist für den Beobachter größer als vorher. Der Beobachter hört einen höheren Ton, als er der Frequenz der Schallquelle entspricht.

Bei einer Vergrößerung der Entfernung zwischen der Schallquelle und dem Beobachter ist es dagegen umgekehrt. Es wirken dann weniger Impulse je Sekunde als im Ruhezustande auf das Ohr des Beobachters ein; er hört einen tieferen Ton.

3. Quantitative Angaben der Größe des Doppler-Effektes. Zahlenmäßige Angaben über die Größe des Doppler-Effektes lassen sich auf Grund einiger mathematischer Überlegungen gewinnen. Man hat dabei zu unterscheiden, ob sich der Beobachter oder ob sich die Schallquelle bewegt.

1. Fall: *Die Schallquelle ruht.* Der Beobachter nähert sich der Schallquelle mit der Geschwindigkeit v. Steht zunächst auch der Beobachter still, so bewegen sich die Schallwellen mit der Schallgeschwindigkeit c an ihm vorüber. Er hört einen Ton von der Frequenz

$$f = \frac{c}{\lambda},$$

wenn λ die Wellenlänge der Schallwellen ist. Nähert sich dagegen der Beobachter der Schallquelle mit der Geschwindigkeit v, so treffen ihn die Schallwellen mit der Geschwindigkeit $c + v$. Der Beobachter hört dann einen Ton von der Frequenz

$$f_1 = \frac{c+v}{\lambda}.$$

Man findet daraus:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda} = f + \frac{v}{\frac{c}{f}} = f + f \cdot \frac{v}{c},$$

mithin

$$f_1 = f \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right).$$

Entfernt sich der Beobachter mit der Geschwindigkeit v von der Schallquelle, so ist

$$f_1 = f \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right).$$

Allgemein gilt für einen bewegten Beobachter bei ruhender Schallquelle die *Frequenzgleichung*

$$f_1 = f \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right).$$

2. Fall: *Der Beobachter ruht.* Die Schallquelle nähert sich dem Beobachter mit der Geschwindigkeit v. Hat die Schallquelle die Eigenfrequenz f, so vollführt sie eine Schwingung in $T = \frac{1}{f}$ Sekunden. Sie legt in dieser Zeit den Weg

$$v \cdot T = \frac{v}{f}$$

zurück. Um den gleichen Betrag vermindert sich die ursprüngliche Wellenlänge λ auf der Vorderseite der sich nähernden Schallquelle. Es ist

$$\lambda_1 = \lambda - \frac{v}{f} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f} = \frac{c - v}{f}.$$

Hat der vom ruhenden Beobachter wahrgenommene Ton die Frequenz f_1, so ist

$$c = \lambda_1 \cdot f_1 .$$

Daraus folgt

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{c - v}{f},$$

mithin

$$f_1 = f \cdot \frac{c}{c - v}$$

oder

$$f_1 = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}}.$$

Entfernt sich die Schallquelle mit der Geschwindigkeit v vom Beobachter, so ist

$$f_1 = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}}.$$

Allgemein gilt für eine bewegte Schallquelle bei ruhendem Beobachter die Frequenzgleichung

$$f_1 = \frac{f}{1 \pm \frac{v}{c}}.$$

Daß man beim Doppler-Effekt diese beiden Fälle unterscheiden muß, ist dadurch begründet, daß man den zweiten Fall nicht einfach als die Umkehrung des ersten ansehen kann. Man wäre dazu nur dann berechtigt, wenn sich im zweiten Fall das Medium, mithin die Luft, mit gleicher Geschwindigkeit bewegen würde wie die Schallquelle. Das Medium ruht aber in beiden Fällen.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Ein Kraftwagen fährt mit einer Geschwindigkeit von 30 m/s an einer tönenden Werksirene (Tonfrequenz $f = 1800$ Hz) vorüber. In welchem Verhältnis ändert sich dabei die Frequenz des von einem mitfahrenden Beobachter wahrgenommenen Sirenentones? (Schallgeschwindigkeit 330 m/s.)
2. An einer Bahnschranke fährt eine pfeifende Lokomotive mit einer Geschwindigkeit von 25 m/s vorüber. In welchem Verhältnis ändert sich die Frequenz des Tones (ursprüngliche Tonfrequenz $f = 2400$ Hz) für einen an der Schranke stehenden Beobachter? (Schallgeschwindigkeit 340 m/s.)

3. Ein Düsenflugzeug fliegt mit einer Geschwindigkeit, die halb so groß ist wie die Schallgeschwindigkeit, in verhältnismäßig niedriger Höhe über einen auf einem hohen Berg stehenden Beobachter hinweg. Auf den wievielten Teil sinkt dabei die Durchschnittsfrequenz des vom Beobachter wahrgenommenen Geräusches?

4. Beweisen Sie durch Rechnung, daß die beiden für den ersten und zweiten Fall geltenden Frequenzgleichungen annähernd die gleichen Ergebnisse liefern, wenn v klein gegenüber c ist! Die Ergebnisse sind auf zwei Dezimalstellen abzukürzen.

Beispiele: a) $v = \frac{2}{100}c$, b) $v = \frac{4}{100}c$, c) $v = \frac{6}{100}c$,

dagegen d) $v = \frac{8}{100}c$, e) $v = \frac{10}{100}c$.

5. Ein Beobachter entfernt sich mit Schallgeschwindigkeit von einer ruhenden Schallquelle, deren Tonfrequenz $f = 1000$ Hz ist. Wie groß ist die Frequenz des von ihm wahrgenommenen Tones?

6. Eine Schallquelle, deren Tonfrequenz $f = 1000$ Hz beträgt, entfernt sich mit Schallgeschwindigkeit von einem ruhenden Beobachter. Welchen Ton hört der Beobachter?

§ 13. Akustische Resonanz

1. Resonanz zwischen Stimmgabelschwingungen. Wie wir bereits in § 3,2 erfuhren, spricht man von Resonanz, wenn ein schwingungsfähiger Körper durch Schwingungen eines anderen zu kräftigen Eigenschwingungen veranlaßt wird. Dieser Fall tritt nur ein, wenn die Eigenschwingungen beider Körper die gleiche Frequenz haben. *Akustische Resonanz* liegt vor, wenn es sich um Schallschwingungen handelt. Einen Vorgang dieser Art, bei dem eine Stimmgabel durch die Schwingungen einer anderen erregt wurde, haben wir bereits in der Grundschule kennengelernt (vgl. LB 6, § 20,2b).

Wenn man eine schwingende Stimmgabel mit dem Stiel auf die Platte eines Tisches oder auf eine leere Holzkiste aufsetzt, so vernimmt man einen lauteren Ton, als wenn man die Stimmgabel am Stiel frei in der Hand hält. Durch den Stiel der Stimmgabel wird die Unterlage zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Die Schallenergie wird von einer größeren Fläche abgestrahlt als allein von den schmalen Zinken der Stimmgabel. Es handelt sich hier aber nicht um Resonanz in dem oben angegebenen strengen Sinne, sondern um ein *Mitschwingen* der Unterlage. Erst wenn die Eigenschwingungen der Unterlage und die erregenden Schwingungen gleiche Frequenz haben, ist wirkliche Resonanz vorhanden. Dann ist die Verstärkung des Tones besonders deutlich hörbar.

Dabei ist folgendes zu beachten: Die Energie der Schallschwingungen wird allein durch die Schwingungen der Stimmgabel geliefert. Ein Teil dieser Energie wird auf die Unterlage übertragen und somit der Schwingungsenergie der Stimmgabel entzogen. Die Gabel kommt infolgedessen schneller zur Ruhe, als wenn sie frei schwingen würde.

2. Resonanz zwischen Saitenschwingungen. Ähnliche Versuche wie mit Stimmgabeln kann man auch mit Saiten durchführen. Man spannt auf einem Monochord zwei Saiten aus und stimmt sie auf denselben Ton. Durch Zupfen oder Anstreichen der einen Saite kann man die andere zu *Eigenschwingungen* anregen.

Eine gespannte Saite strahlt die Schwingungsenergie sehr schlecht ab, da sie nur eine geringe Luftmasse in Bewegung setzt. Bei allen Saiteninstrumenten werden deshalb die Saiten auf einer hölzernen Unterlage, dem *Resonanzboden*, ausgespannt. Dieser wird bei der Erregung der Saiten in Mitschwingung versetzt und bewirkt, wie bei den Stimmgabelversuchen beschrieben wurde, eine Verstärkung des Tones.

3. Schwebungen. Werden zwei Saiten oder zwei Stimmgabeln erregt, deren Frequenzen nur wenig voneinander verschieden sind, so vernehmen wir einen Ton, dessen Stärke periodisch an- und abschwillt. Diese Erscheinung bezeichnet man als *akustische Schwebung*. Die Zahl der Wechsel der Tonstärke je Sekunde heißt *Schwebungsfrequenz*. Diese ist gleich der Differenz der Frequenzen der beiden Einzelschwingungen. Schwebungen lassen sich leicht hervorrufen, wenn man zwei gleichartige Stimmgabeln anschlägt, von denen man die eine durch ein auf einer Zinke verschiebbares Gewichtsstück verstimmt. Man hört dann Schwebungen, deren Frequenz mit dem Grad der Verstimmung wächst.

Man kann die Schwebungen objektiv nachweisen, indem man die überlagerten Schwingungen beider Gabeln aufzeichnet. Es ergibt sich dann eine *Schwebungskurve* mit periodisch zu- und abnehmenden Amplituden (Abb. 53/1). Wenn man zwei Saiten auf den gleichen Ton stimmen will, so kann man am Auftreten von Schwebungen leicht feststellen, ob die Stimmung ganz rein ist.

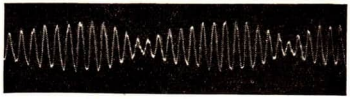


Abb. 53/1. Schwebungskurve (Oszillogramm), entstanden aus den Tönen zweier leicht verstimmter Stimmgabeln

4. Fragen und Aufgaben:

1. Wie kann man einen Stimmgabelton verstärken?
2. Wenn man beim Klavier durch Pedaltreten die Dämpfung von den Saiten abhebt und einen Ton singt, so hört man aus dem Klavier denselben Ton herausschallen. Geben Sie die Ursache für diese Erscheinung an!
3. Führen Sie dieselbe Untersuchung an einem Klavier durch, indem Sie die Dämpfung abheben und die Vokale gegen das Klavier rufen! Was ist wahrzunehmen?
4. Die Mandoline und das Klavier sind für jeden Ton mit zwei bzw. drei Saiten versehen. Wie ist das schnelle Vibrieren des Tones zu erklären, wenn eine dieser Saiten gegenüber den anderen verstimmt ist?
5. Inwiefern hat ein Klavierstimmer beim Stimmen eines Klaviers das Auftreten von Schwebungen zu beachten?

IV. Schallerzeugung

§ 14. Schwingende Saiten

1. Saitenlänge und Frequenz. Wir spannen auf einem Monochord, das wir bereits in der Grundschule kennengelernt haben und bei dem der Abstand der Stege voneinander 120 cm beträgt, zwei Stahl- oder Messingsaiten gleichen Durchmessers nebeneinander auf und stimmen sie auf denselben Ton. Die Frequenz, in der beide Saiten dann schwingen, ist für die weitere Untersuchung die *Grundfrequenz* und der Ton der Saiten der *Grundton*.

Wir verkürzen eine der beiden Saiten auf die Hälfte, indem wir sie durch ein darunter geschobenes Klötzchen begrenzen. Nach dem Gehör stellen wir fest, daß das Intervall zwischen dem Ton dieser Saite und dem Grundton gerade eine Oktave ist. Entsprechend ergeben sich die nächst höhere Quinte, Quarte und große Terz, wenn man die Saite im Verhältnis 2:3, 3:4, 4:5 verkürzt. Man kann das Ergebnis durch Strecken veranschaulichen, die als Abb. 54/1 in die untenstehende Tabelle eingefügt sind.

Saitenlänge und Intervalle

Als Grundton wurde c gewählt

Länge der verkürzten Saite: cm	Bruchteile der ursprünglichen Länge	Saitenlängen, veranschaulicht durch Strecken (Abb. 54/1)	Frequenz Hz	Intervall der Töne der verkürzten und der unverkürzten Saite
120	1		132	Grundton c
60	$\frac{1}{2}$		264	Oktave c′
80	$\frac{2}{3}$		198	Quinte g
90	$\frac{3}{4}$		176	Quarte f
96	$\frac{4}{5}$		165	große Terz e

Wie man durch Vergleich mit der Lochsirene feststellen kann, führt die Verkürzung der Saite gleichzeitig zu einer entsprechenden Erhöhung der Frequenz. Es ergibt sich:

Die Frequenzen der Töne gleichgespannter Saiten, die aus gleichem Material bestehen und auch sonst gleiche Beschaffenheit haben, verhalten sich umgekehrt wie die Längen.

2. Spannung und Frequenz. Zur Untersuchung des Einflusses der Spannung der Saiten auf die Frequenz benutzt man wieder das Monochord. Die Spannung wird durch Federkraftmesser gemessen. Abb. 55/1 zeigt das Schema der Versuchsanordnung. Das Ergebnis der Versuche lautet:

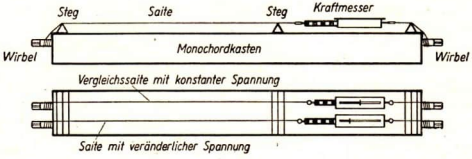


Abb. 55/1. Prüfung der Abhängigkeit der Frequenz einer Saitenschwingung von der Spannung mit Hilfe des Monochords. Die Abbildung zeigt einen Aufriß und einen Grundriß der Versuchsanordnung.

Die Schwingungszahl einer Saite ist um so größer, je kürzer die Saite ist, je geringer die Masse der Längeneinheit der Saite ist und je stärker die Saite gespannt ist.

Die Frequenz ist aber nicht der Spannung proportional, sondern wächst mit der Quadratwurzel aus der Spannung.

3. Die Grundschwingungen und Oberschwingungen. Eine Saite von der Länge l kann wie ein Seil verschiedene Eigenschwingungen ausführen. Es können beispielsweise nur die beiden Endpunkte in Ruhe bleiben, dann bietet die schwingende Saite das Bild einer stehenden Transversalwelle mit einem einzigen Schwingungsbauch zwischen zwei Knoten. Die Wellenlänge ist $2\,l$. Die Saite gibt dann den Grundton. Wenn man die Saite in der Mitte mit dem Finger leicht berührt und anstreicht, dann schwingt auch der nicht angestrichene Teil der Saite, wie man durch aufgesetzte Papierreiter nachweisen kann. Das Bild der schwingenden Saite ist das eines Seiles, auf dem sich eine stehende Welle mit der Wellenlänge l ausgebildet hat. Es sind drei Knoten, zwei davon an den beiden Endpunkten, und zwei Bäuche vorhanden. Diese Eigenschwingung heißt 1. *Oberschwingung*, der ihr entsprechende Saitenton ist der 1. *Oberton*. Er ist die Oktave des Grundtons.

Berührt man die Saite in der Weise, daß ein Drittel der Länge abgegrenzt wird, und streicht den längeren Teil an, so erhält man das Schwingungsbild der 2. *Oberschwingung*. Es sind vier Knoten und drei Bäuche vorhanden. Grenzt man durch leichtes Berühren ein Viertel der Länge ab, so erhält man beim Anstreichen des längeren Teiles die 3. *Oberschwingung*. Das Schwingungsbild ist eine stehende Welle mit fünf Knoten und vier Bäuchen. Die der 2. und 3. Oberschwingung entsprechenden Saitentöne sind der 2. und 3. *Oberton*. Der 2. Oberton ist die Quinte des 1. Obertones, der 3. Oberton ist die Quarte des 2. und die höhere Oktave des 1. Obertones. Die Verteilung der Knoten und Bäuche auf gespannten Saiten gibt die in die auf S. 56 stehende Tabelle eingefügte Abb. 56/1 wieder.

In allen diesen Fällen kann man durch aufgesetzte Papierreiter nachweisen, daß, abgesehen von den Knoten, alle Teile der Saite schwingen, auch die nicht angestrichenen. Es handelt sich demnach um Eigenschwingungen der ganzen Saite. Zu beachten ist, daß die Obertöne weicher klingen als Töne gleicher Höhe, die durch Verkürzung der Saite erzeugt werden.

Eigenschwingungen einer Saite von der Länge l
Als Grundfrequenz ist 66 Hz angenommen

Art der Eigenschwingungen	Abstand benachbarter Knoten	Frequenz Hz	Bezeichnung des Tones	Zeichen des Tones	Schwingungsform einer Saite (Abb. 56/1)
Grundschw.	l	66	Grundton	C	
1. Oberschw.	$\frac{1}{2}\,l$	132	1. Oberton	c	
2. Oberschw.	$\frac{1}{3}\,l$	198	2. Oberton	g	
3. Oberschw.	$\frac{1}{4}\,l$	264	3. Oberton	c′	

Die Folge der Obertöne läßt sich noch weiter fortsetzen. Man nennt die entstehende Tonreihe eine *harmonische Tonreihe.*

4. Fragen und Aufgaben:

1. In welcher Weise wird die Tonhöhe bei der Geige und den anderen Streichinstrumenten geändert?
2. Wie erfolgt die Tonänderung bei der Gitarre, der Mandoline und anderen Zupfinstrumenten?
3. Bei welchen Saiteninstrumenten bleibt die Tonhöhe für jede Saite während des Spiels unverändert?
4. Ein Monochord hat eine Saitenlänge von 120 cm. Auf welche Länge muß man die frei schwingende Saite verkürzen, wenn die Oktave, die Quinte, die Quarte, die große Terz des Grundtones erklingen soll?
5. Warum sind einzelne Geigensaiten mit feinem Draht umsponnen?
6. Geben Sie zu dem als großes C bezeichneten Grundton die ersten sechs Obertöne an!

§ 15. Schwingende Stäbe und Platten

1. Schwingende Stäbe. Während eine Saite gespannt werden muß, wenn sie zu Schwingungen erregt werden soll, ist ein *Stab* schon unmittelbar ein schwingungsfähiges Gebilde. Man kann einen Stab einklemmen, aufhängen oder auf Stegen lagern. Die in Abb. 8/1 wiedergegebene schwingende Blattfeder ist ebenfalls in diesem Sinne ein Stab. Stäbe können Transversalschwingungen oder Longitudinalschwingungen ausführen, je nachdem ob die Schwingungen der einzelnen Teilchen senkrecht zur Längsausdehnung des Stabes oder in der Längsausdehnung erfolgen.

Abb. 56/2 zeigt schematisch einen Stab, der auf zwei Stegen gelagert und durch Anschlagen in der Mitte zu Transversalschwingungen erregt worden

Abb. 56/2. Schwingungsform eines auf zwei Stegen gelagerten Stabes

ist. Das Bild des schwingenden Stabes erinnert an das Schwingungsbild eines Seiles, auf dem sich eine stehende Transversalwelle mit Knoten und Bäuchen ausgebildet hat.

Abb. 57/1 Schwingungsform einer Stimmgabel (schematisch)

Eine Stimmgabel kann als ein mit einem Stiel versehener, gebogener Stab aufgefaßt werden. Schlägt man sie an, so führen die Zinken Transversalschwingungen aus, während der Stiel mit derselben Frequenz in seiner Längsrichtung gehoben und gesenkt wird (Abb. 57/1). In der Nähe des Stieles bilden sich zwei Knotenstellen aus. Es ergibt sich auch hier ein ähnliches Bild wie bei einer stehenden Welle.

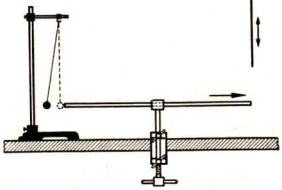


Abb. 57/2. Erregen eines Stabes zu Longitudinalschwingungen. Nachweis mittels eines Fadenpendels

Stäbe können auch Longitudinalschwingungen ausführen (Abb. 57/2). Klemmt man zum Beispiel einen elastischen Stab in der Mitte fest und streicht ihn von der Mitte aus in der Längsrichtung mit einem Lappen, den man durch Kolophonium rauh gemacht hat, so hört man einen kräftigen, hohen Ton. Er entsteht durch Longitudinalschwingungen, in die der Stab versetzt wurde. Man kann diese Schwingungen auch objektiv an den Enden des Stabes mittels eines Fadenpendels nachweisen, an dem ein Glaskügelchen hängt. Der schwingende Stab gleicht dem Schwingungszustande einer Schraubenfeder, auf der sich eine stehende Longitudinalwelle mit Knoten und Bäuchen ausgebildet hat (vgl. Abb. 39/2).

2. Schwingende Platten. Auch bei einer schwingenden *Platte* gibt es eine Grundschwingung, die Schwingung mit der niedrigsten Frequenz, und Oberschwingungen mit höheren Frequenzen. Dementsprechend kann man auch hier einen Grundton und Obertöne unterscheiden. Die Obertöne bilden keine harmonische Tonfolge. Man kann die Eigenschwingungen einer Platte durch ein von *Chladni*[1] angegebenes Verfahren gesondert nachweisen.

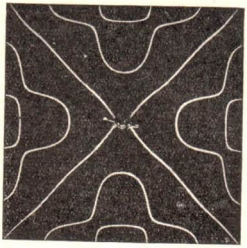
Abb. 57/3 Lagerung einer Platte zur Erzeugung Chladnischer Klangfiguren. Eine quadratische Metallplatte ist in der Mitte durchbohrt und wird auf einem Gewindebolzen mittels einer Flügelmutter so festgeschraubt, daß sie waagerecht steht.

Wir beschränken uns dabei auf ebene Platten. Abb. 57/3 zeigt die Lagerung der Platte. Schlägt man die Platte irgendwie an, so klingt sie wie ein *Gong*. Sie führt dabei Transversalschwingungen aus. Um diese nachzuweisen, streuen wir feinen, trockenen Sand, am besten Seesand, auf die Platte. Die Schwingungen der Platte setzen die Sandkörnchen in Bewegung. Bei der

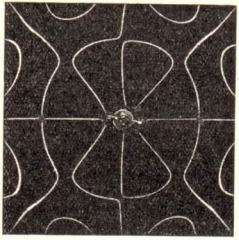
[1] Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827), gebürtig aus Wittenberg, zuerst Jurist, wurde später Experimentalphysiker, besonders auf dem Gebiete der Akustik.

angegebenen Art der Erregung wirkt die Bewegung ganz ungeordnet. Wir erregen die Platte nunmehr durch Streichen mit einem Geigenbogen. Dadurch versetzt man die Platte in ungedämpfte Schwingungen, da man ihr immer wieder Energie zuführt.

Bei einer bestimmten Art des Streichens hört man nicht mehr ein wirres Klanggemisch, sondern einen klaren Ton. In diesem Falle schwingt die Platte in einer ganz bestimmten Oberschwingung. Wie bei einer stehenden Welle sondern sich Knotenstellen von Bäuchen. Der aufgestreute Sand wird in diesem Falle von allen in Bewegung befindlichen Stellen fortgeschleudert und bleibt an den Knotenstellen liegen. Die Knotenstellen sind diesmal nicht wie bei der Saite einzelne Punkte, sondern ordnen sich zu Linien, die auffallende Regelmäßigkeiten zeigen (Abb. 58/1). Die dabei auftretenden Figuren heißen nach ihrem Entdecker *Chladnische Klangfiguren*. Sie lassen sich je nach der Art des Erregens mannigfaltig verändern.



a) Streichen bei 1, Berühren bei 2 und 3



b) Streichen bei 1, Berühren bei 2

Abb. 58/1. Chladnische Klangfiguren auf einer 2 mm dicken quadratischen Messingplatte (Seitenlänge 25 cm)

3. Fragen und Aufgaben:

1. Auf welche beiden Arten kann man einen Stab zu Schwingungen erregen?
2. Welcher Bruchteil einer Welle bildet sich auf einem an einem Ende festgeklemmten, transversal schwingenden Stab bei der Abgabe des Grundtones?
3. Welcher Bruchteil einer Welle bildet sich auf einem in der Mitte festgeklemmten, transversal schwingenden Stab bei der Abgabe des Grundtones?
4. Welches Intervall bilden die beiden Grundtöne, die ein schwingender Stab abgibt, wenn man ihn einmal an einem Ende, ein andermal in der Mitte einspannt?
5. Lösen Sie die Abb. 57/1 in drei nebeneinander gezeichnete Einzelbilder auf!

§ 16. Schwingende Luftsäulen

1. Resonanz einer Luftsäule. Man füllt einen Standzylinder langsam mit Wasser und hält dicht über die Öffnung eine tönende Stimmgabel. Bei einer bestimmten Höhe des Wasserspiegels beginnt die Luftsäule im Zylinder laut zu tönen. Man hört den Stimmgabelton erheblich verstärkt. Die Luftsäule im Zylinder ist durch

die Schwingungen der Stimmgabel zu einer Eigenschwingung erregt worden, sie befindet sich mit der Stimmgabel in Resonanz.

Man kann den Versuch dadurch verbessern, daß man einen mit einem Schlauchansatz versehenen Zylinder verwendet. Man verbindet ihn mit einem *Niveaugefäß*, das man mit Wasser füllt (Abb. 59/1). Durch Heben und Senken des Niveaugefäßes kann man in einfacher Weise den Wasserspiegel im Zylinder beeinflussen und so die Resonanz mit der Stimmgabel sehr genau herstellen.

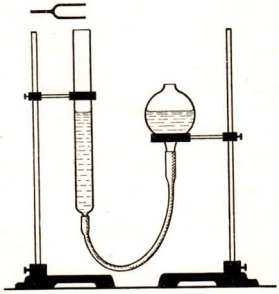


Abb. 59/1. Anordnung für Resonanzversuche mit Stimmgabeln. Der Standzylinder kommuniziert mit einem Niveaugefäß.

Die Luftteilchen im Zylinder geraten in Longitudinalschwingungen; denn sie schwingen in der Längsrichtung hin und her. Man kann diesen Vorgang durch einen Federschwinger modellartig veranschaulichen, den man im Zylinder auf und nieder schwingen läßt (Abb. 59/2). Gibt die Luftsäule den Grundton von sich, so befinden sich die Luftteilchen am geschlossenen Ende in Ruhe, genauso wie die Windungen des Federschwingers an seinem Aufhängepunkt. Am geschlossenen Ende liegt ein Schwingungsknoten, am offenen Ende ein Schwingungsbauch. *Die ganze Luftsäule schwingt beim Grundton in der Form einer stehenden Viertelwelle.*

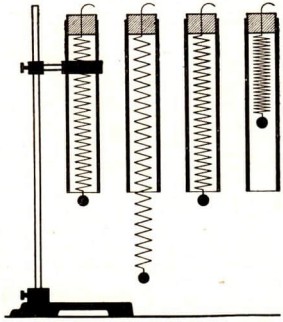


Abb. 59/2. Modellversuch zur Resonanz einer Luftsäule. Die schwingenden Luftteilchen werden durch die Windungen des Federschwingers veranschaulicht.

2. Die Kundtsche Röhre. Auch bei einer in einem Glasrohr schwingenden Luftsäule können Oberschwingungen auftreten; es bilden sich dann mehrere Knoten und Bäuche. Der Nachweis kann nach der von dem deutschen Experimentalphysiker *August Kundt*[1] angegebenen Art folgendermaßen erbracht werden:

Man bringt in ein Glasrohr mit einem lichten Durchmesser von etwa 15 mm ein wenig trockenes Korkpulver und verschließt das Rohr an einem Ende; man hält es waagerecht und bläst vor der Öffnung unter Zwischenschalten eines

[1] August Kundt (1839–1894), ein bedeutender Experimentalphysiker, Professor der Physik in Bonn, später in Berlin. Er ist besonders bekannt durch seine Experimentalforschungen auf dem Gebiete der Akustik.

Schlauches eine Signalpfeife an. Hierdurch wird die Luft im Innern der Röhre zu Schwingungen angeregt. Wenn die Länge des Luftraumes auf die Frequenz der Pfeifenschwingungen abgestimmt ist, bilden sich *stehende Luftwellen* im Rohr. Das Pulver wird dadurch aufgewirbelt und lagert sich an den Schwingungsknoten wieder ab. So zeigt es die Lage der Knoten und Bäuche im Rohr an (Abb. 60/1).

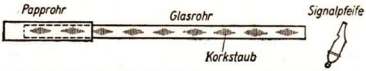


Abb. 60/1. Kundtsche Röhre zum Nachweis von Oberschwingungen einer Luftsäule. Die Abstimmung erreicht man mittels eines über das Glasrohr gestreiften, leicht verschiebbaren Papierröhrchens.

Man kann diesen Versuch zu einem quantitativen Versuch ausgestalten. Zu diesem Zweck mißt man den zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Knoten vorhandenen Abstand, der gleich einer halben Wellenlänge, mithin gleich $\frac{\lambda}{2}$ ist. Ist außerdem die Schallgeschwindigkeit c bekannt, so kann man mit Hilfe der in § 6, 6 abgeleiteten Gleichung $c = \lambda \cdot f$ die Frequenz f des Tones ermitteln.

Umgekehrt ermöglicht der Versuch, die Schallgeschwindigkeit in der Luft experimentell festzustellen, wenn man die Frequenz des Tones und die Wellenlänge kennt.

3. Schwingende Luftsäulen als Schallerreger. Bei der Blockflöte und der Orgelpfeife wird die im Flöten- bzw. Pfeifenrohr befindliche Luftsäule dadurch in Schwingungen versetzt, daß ein durch das Mundstück geblasener Luftstrom gegen eine scharfe, schneidenartige Kante, die *Lippe*, stößt, an der er sich teilt (vgl. LB 6, § 20, 3). Es bilden sich dadurch abwechselnd zu beiden Seiten der Lippe Luftwirbel, die sich in rascher Folge von der Lippe ablösen. Auf diese Weise werden in der im Rohr befindlichen Luftsäule periodisch aufeinanderfolgende Verdichtungen und Verdünnungen hervorgerufen. Es entsteht ein Ton, den man nach der Art der Ursache als einen *Schneidenton* bezeichnet. Er wird dadurch verstärkt, daß die Luftsäule im Rohr zum Mitschwingen angeregt wird.

Wie wir schon im Abschnitt 1 erfuhren, schwingt die Luftsäule in einer einseitig geschlossenen Röhre beim Grundton in Form einer stehenden Viertelwelle (Abb. 60/2). Die Luftteilchen schwingen abwechselnd auf das geschlossene Ende hin und von ihm fort. Am geschlossenen Ende bildet sich ein *Schwingungsknoten* aus. In ihm kommt es abwechselnd zu Luftverdichtungen und -verdünnungen. Am offenen Ende der Röhre sind die Luftteilchen immer in stärkster Bewegung begriffen; es liegt dort ein *Schwingungsbauch*.

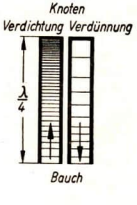


Abb. 60/2. Schematische Darstellung der Luftschwingungen in einem einseitig geschlossenen Rohr beim Grundton. Die starke Zusammendrängung der Querstriche im linken Bild bedeutet eine Luftverdichtung, ihr großer Abstand im rechten Bild eine Luftverdünnung. Beide Zustände wechseln im Schwingungsknoten in rascher Folge. Am offenen Ende strömt die Luft ungehindert zu und ab.

Zum gleichen Ton kann man auch die Luftsäule in einer Pfeife erregen, die an beiden Enden offen ist. Das Rohr muß dann doppelt so lang sein wie vorher. In diesem Falle bildet sich der Knoten, das heißt, die Stelle stärkster Verdichtung und Verdünnung, in der Mitte des Rohres aus. An den beiden offenen Enden liegen Schwingungsbäuche.

Die Luft in beiden Rohrhälften schwingt in Form je einer stehenden Viertelwelle, die Luft im ganzen Rohr demnach in Form einer stehenden halben Welle (Abb. **61**/1).

Man bezeichnet eine Pfeife, die an beiden Seiten geöffnet ist, als eine *offene Pfeife*, dagegen eine Pfeife, die an einem Ende geschlossen ist, als eine *gedeckte Pfeife*.

Öffnet man eine gedeckte Pfeife, so erklingt die nächst höhere Oktave. Denn der Knoten rückt jetzt in die Mitte des Rohres. Die eingeschlossene Luftsäule schwingt dann in Form einer halben stehenden Welle von gleicher Länge wie vorher die Viertelwelle. Die Frequenz des Tones steigt damit auf das Doppelte.

Umgekehrt sinkt die Frequenz des Tones auf die Hälfte, wenn man das eine Ende einer zunächst an beiden Enden geöffneten Pfeife verschließt. Die Tonhöhe sinkt dabei auf die nächst tiefere Oktave.

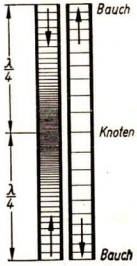


Abb. **61**/1. Schematische Darstellung der Luftschwingungen in einem an beiden Enden offenen Rohr. Wie in Abb. **60**/2 werden durch die Einzelbilder die beiden einander abwechselnden extremen Schwingungszustände veranschaulicht. Das gleiche gilt für Abb. **61**/2.

4. Oberschwingungen tönender Luftsäulen. Man kann durch scharfes Anblasen erreichen, daß eine Luftsäule auch zur Abgabe eines anderen als des Grundtones erregt wird. Man nennt einen solchen Ton wie bei einer schwingenden Saite einen *Oberton*. In diesem Falle entstehen im Rohr mehr als ein Schwingungsknoten. Bei einer gedeckten Pfeife liegen am geschlossenen Ende stets ein Schwingungsknoten, am offenen Ende ein Schwingungsbauch. Bei einer offenen Pfeife liegen an beiden Enden Schwingungsbäuche. Die Knoten und Bäuche verteilen sich über die Rohrlänge so, daß auf die gesamte Rohrlänge ein ganzzahliges Vielfaches der Viertelwellenlänge des entstehenden Tones entfällt. Zwischen zwei benachbarten Knoten liegt dann immer eine halbe Wellenlänge, zwischen dem offenen Ende und dem ihm zunächstliegenden Knoten eine Viertelwellenlänge. Abb. **61**/2 gibt eine schematische Übersicht über die Lage der Knoten und Bäuche für einige Obertöne in gedeckten und offenen Pfeifen.

5. Blasinstrumente. Nicht alle Pfeifen sind mit einer Lippe ausgestattet. Schon in der Grundschule erfuhren wir, daß bei manchen Pfeifen, zum Beispiel bei der Mundharmonika, der Ton auch durch schnell hin- und herschwingende kleine Metallzungen erregt wird. Bei einer Orgel werden *Lippen-* und *Zungenpfeifen* als Schallquellen verwendet. Abb. **62**/1 zeigt noch einmal den Unterschied zwischen einer Lippen- und einer Zungenpfeife. Nur wenige Blasinstrumente, nämlich die Blockflöte und

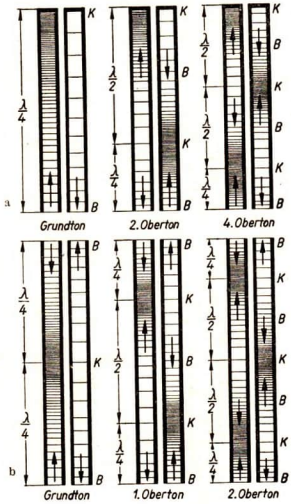


Abb. **61**/2. Verteilung der Knoten und Bäuche beim Entstehen von Obertönen (schematisch)
a) in gedeckten Pfeifen, b) in offenen Pfeifen
K Knoten, *B* Bauch

die Querflöte, sind im physikalischen Sinne als Lippenpfeifen anzusehen. Die Mehrzahl der Blasinstrumente ist nach dem Prinzip der Zungenpfeifen gebaut. Dazu gehören die Holzinstrumente *Klarinette*, *Oboe*, *Fagott* und die Blechinstrumente *Posaune*, *Trompete*, *Horn*, *Tuba* und *Saxophon*. Das Mundstück einer Klarinette ist durch eine kleine, sehr elastische Holzzunge abgeschlossen (Abb. **62/2**). Die Oboe und das Fagott sind mit Doppelzungen ausgestattet.

Die Blechinstrumente werden dadurch zum Tönen gebracht, daß man die Lippen gegen das Mundstück des Instrumentes preßt und in dieses hineinbläst. Dabei fangen die Lippen des Bläsers selbst an, leicht zu vibrieren; sie vertreten die Stelle der Metall- oder Holzzunge bei anderen Instrumenten. Dem Prinzip nach sind mithin auch die Blechinstrumente Zungenpfeifen.

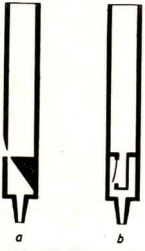


Abb. 62/1. Längsschnitt durch eine Lippenpfeife (a) und eine Zungenpfeife (b) (schematisch)

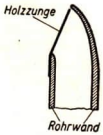


Abb. 62/2 Mundstück einer Klarinette

Bei den Blasinstrumenten wird die Tonhöhe durch Verkürzen bzw. Verlängern des Schallrohres bewirkt. Dies geschieht bei der Flöte durch Schließen und Öffnen von Schallöchern bzw. -klappen, bei der Posaune durch Ausziehen oder Zusammenschieben des Rohres, bei der Trompete u. ä. Instrumenten durch Öffnen von Ventilen.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Welchen Bruchteil einer Welle bildet die schwingende Luftsäule bei Abgabe des Grundtones bei a) einer gedeckten Pfeife, b) einer offenen Pfeife?
2. Ergänzen Sie die Abb. **61/2a** und b für die nächsten beiden Obertöne jeder Pfeifenart!
3. Geben Sie die Ursache für das Entstehen eines Tones beim Anblasen der Öffnung eines hohlen Schlüsselschaftes, eines Reagenzglases an!
4. Wir erregen ein Reagenzglas durch Anblasen zur Abgabe des Grundtones und stimmen sieben weitere Reagenzgläser durch behutsames Eingießen von Wasser auf die Ganztöne der sich darauf aufbauenden Tonleiter ab. In welchem Verhältnis stehen die freien Längen der einzelnen Reagenzgläser zu der des ersten Glases?

§ 17. Ultraschall

1. Die Galtonpfeife. Will man besonders hohe, in ihrer Tonhöhe genau festliegende Töne erzeugen, so bedient man sich dazu einer von *Francis Galton*[1] erfundenen Pfeife. Eine *Galtonpfeife* ist ganz aus Metall gefertigt und nach dem Prinzip der gedeckten Lippenpfeife gebaut (Abb. **63/1**). Eine Galtonpfeife besteht aus einem zylindrischen Mundstück und einem dem Mundstück genau gegenüberstehenden kurzen, zylindrischen Pfeifenrohr, dessen Länge durch einen drehbaren Kolben geändert werden kann (Abb. **63/2**). Die Ränder des Pfeifenrohres sind schneidenartig geschärft.

[1] Francis Galton (1822–1911), Arzt und Meteorologe in London, erfand die von ihm als *Grenzpfeife* bezeichnete Vorrichtung zur Untersuchung der oberen Gehörgrenze.

Mundstück und Pfeifenrohr sind durch einen Bügel miteinander verbunden. Durch Drehen des Mundstückes um seine Achse kann man seinen Abstand vom Pfeifenrohr ändern.

Läßt man durch das Mundstück einen starken Luftstrom treten, so erklingt als Grundton der Pfeife ein sehr hoher Ton. Seine Frequenz ist nach der Gleichung $c = \lambda \cdot f$ berechenbar, die zwischen der Schallgeschwindigkeit c, der Wellenlänge λ und der Frequenz f besteht (vgl. § 6, 6). Die Wellenlänge λ ist gleich dem Vierfachen der Rohrlänge des Pfeifenrohres. Die Rohrlänge kann an dem drehbaren Verschlußteil des Pfeifenrohres abgelesen werden.

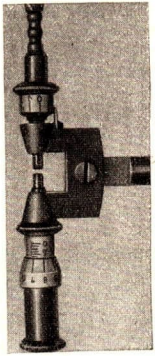


Abb. 63/1. Galtonpfeife

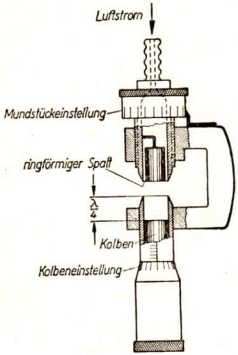


Abb. 63/2. Längsschnitt durch eine Galtonpfeife (schematisch). In der Öffnung des Mundstücks ist durch ein gekrümmtes Haltestück ein zylindrischer Körper eingefügt, der die Rohröffnung bis auf einen schmalen, ringförmigen Spalt verschließt. Die Spaltöffnung des Mundstücks und die ringförmige Schneide des Pfeifenrohres stehen sich koaxial gegenüber.

2. Erregung einer Kundtschen Röhre durch eine Galtonpfeife. Wir wiederholen den in § 16, 2 beschriebenen Versuch, benutzen aber als Kundtsche Röhre ein Glasrohr mit einer lichten Weite von 4 bis 5 mm, in das wir ein wenig feinen Korkstaub einbringen. Als Tonerreger verwenden wir eine Galtonpfeife. Wieder kann man beobachten, daß sich der Korkstaub im Innern der Röhre in ganz regelmäßigen Abständen zusammenballt.

Wir setzen den Versuch fort, verkürzen aber die Länge des Pfeifenrohres in zunehmendem Maße. Der Ton wird dabei immer höher, bis er die Grenze der Hörbarkeit erreicht (20000 Hz). Verkürzt man das Pfeifenrohr noch weiter und bläst man die Galtonpfeife vor der Öffnung der Kundtschen Röhre an, so ordnen sich die Staubteilchen von neuem in Linien an (Abb. **63**/3). Die Kundtsche Röhre wird also nach wie vor zur Resonanz erregt. Wir ersehen daraus, daß auch bei einer Frequenz von mehr als 20000 Hz die entstehenden Luftschwingungen die gleiche Wirkung ausüben wie vorher. Die sich im Rohr bildenden stehenden Luftwellen haben demnach unverändert

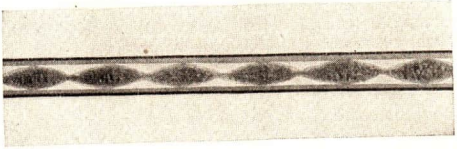


Abb. 63/3. Kundtsche Staubfiguren, hervorgerufen durch Ultraschall. Bildvergrößerung 2:1, Wellenlänge 1,5 cm, Frequenz etwa 22500 Hz

den Charakter von Schallwellen. Sie sind nur mit unserem Gehörorgan nicht mehr wahrzunehmen. Man spricht in diesem Falle von unhörbarem Schall oder *Ultraschall*.

Schallwellen mit einer Frequenz von mehr als 20000 Hz bezeichnet man als Ultraschall.

Noch überzeugender wirkt der Versuch, wenn man ein Glasrohr verwendet, längs dessen Achse ein Wollastondraht ausgespannt ist. An seine beiden Enden legt man eine niedrige Spannung, so daß der Draht schwach glüht. Erzeugt man wieder in der Röhre stehende Luftwellen, so wird der Draht in den Schwingungsbäuchen durch die Luftbewegung so stark gekühlt, daß er dort nicht mehr glüht. Dieselbe Erscheinung ist auch noch jenseits der Hörbarkeitsgrenze zu beobachten (Abb. 64/1).

Abb. 64/1. Kundtsche Röhre mit Wollastondraht im Ultraschallfeld
An den glühenden Stellen des Drahtes liegen die Schwingungsknoten, an den dunklen Stellen die Schwingungsbäuche. Technische Daten wie bei Abb. 63/3.

3. Ultraschallwahrnehmung durch Tiere. Die Hörbarkeitsgrenze des menschlichen Ohres liegt, wie wir schon erfuhren, bei etwa 20000 Hz. Andere Lebewesen können auch noch höher liegende Tonfrequenzen, mit anderen Worten Ultraschall, wahrnehmen. So sprechen Hunde auch noch auf Signale mit einer Galtonpfeife an, die für uns unhörbar sind.

Fledermäuse fliegen in dunklen und mit Hindernissen stark durchsetzten Räumen deshalb sicher, weil sie fortgesetzt Ultraschallschreie mit einer Frequenz von 30000 bis 80000 Hz ausstoßen. Die von einer fliegenden Fledermaus hervorgerufenen Ultraschallwellen werden an einem Hindernis reflektiert und von der Fledermaus als Echo wahrgenommen. Sie kann sich dadurch im Raum orientieren.

Ebenso sind manche Insektenarten mit Ultraschallorganen ausgerüstet, so die Grashüpfer (Conocephalus). Sie vermögen durch Reiben der Flügeldecken aneinander Ultraschallschwingungen von etwa 40000 Hz zu erzeugen, für die sie andererseits auch empfänglich sind. Auch von Walen ist es bekannt, daß sie Ultraschallsignale zu geben und zu empfangen vermögen.

4. Die Verwendung des Ultraschalls in der Technik. In neuerer Zeit findet der Ultraschall in der Technik vielfache Verwendung. Meist erzeugt man ihn mit Geräten, in denen eine besonders zurechtgeschnittene *Quarzplatte* durch elektrische Erregung zu schnellen, elastischen Längsschwingungen gebracht wird

(Abb. 65/1). Es ist gelungen, Quarzschwingungen mit einer Frequenz bis zu 20 Mill. Hz zu erzeugen. Über die Art und Weise dieser elektrischen Erregung werden wir in der Elektrizitätslehre Näheres erfahren.

Mit Hilfe eines Ultraschallgebers kann man *scharf begrenzte Schallbündel* erzielen, die man auf die zu beschallenden Objekte richtet. An diesen werden, je nach den vorliegenden Umständen verschieden, auffallende Wirkungen hervorgerufen, die man technisch ausnutzt.

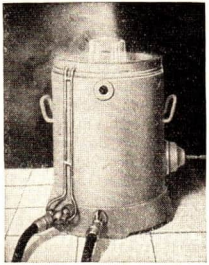


Abb. 65/1. Ultraschallgerät, genannt Ultraschalltopf, hergestellt vom Carl-Zeiss-Werk Jena VEB. Das Gerät dient zur Beschallung von Flüssigkeiten.

a) In der chemischen Industrie und in verwandten Produktionszweigen verwendet man Ultraschall zum Herstellen sonst schwer erreichbarer *Emulsionen*. So kann man mit Hilfe von Ultraschall ganz feinkörnige Emulsionen bei der Bereitung *photographischer Filme und Platten* erzeugen.

In ähnlicher Weise kann man mit Hilfe von Ultraschall hochmolekulare Stoffe wie Gelatine, Stärke, Eiweiß und andere in ihre Bestandteile aufspalten und sie auf diese Weise in einfachere Verbindungen überführen.

b) Mit Hilfe von Ultraschall läßt sich aber auch erreichen, daß sich umgekehrt feinverteilte Stoffe zusammenballen und abscheiden. So werden mit Hilfe des Ultraschalls Flüssigkeiten, vor allem Metall- und Salzschmelzen, *entgast*. Durch den Ultraschall entstehen im Innern der Flüssigkeiten feine Risse und schließlich zusammenhängende Hohlräume, in denen sich die etwa in einer Flüssigkeit vorhandenen Gase sammeln. Sie steigen dann als Blasen empor, so daß die Flüssigkeit gasfrei wird. Auch geschmolzenes Glas läßt sich auf diese Weise klären.

c) Eine große Bedeutung kommt dem Ultraschall in der modernen *Werkstoffprüfung* zu. Insbesondere handelt es sich dabei um das Auffinden von Rissen, Hohlräumen und Fremdkörpern in metallischen Werkstücken. Diese als *Lunker* bezeichneten Stellen sind für den Ultraschall schlechter leitend als das normale Werkstück.

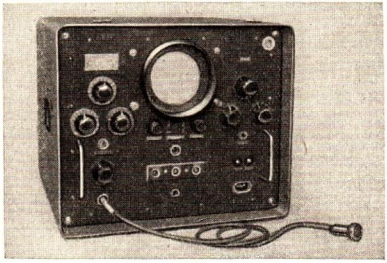


Abb. 65/2. Ultraschallgerät für Materialprüfung, hergestellt vom RFT-Funkwerk Erfurt VEB
In der Bildmitte oben ist der Fluoreszenzschirm des eingebauten Oszillographen sichtbar. Etwa vorhandene Materialfehler sind als Zacken erkennbar, die im Oszillogramm vorhanden sind.

Abbildung 65/2 zeigt ein vom RFT-Funkwerk Erfurt hergestelltes Ultraschallgerät zur Werkstoffprüfung. Ein Ultraschallimpuls wird

gegen das zu untersuchende Werkstück gerichtet. Er dringt in das Werkstück ein und wird an dessen Rückseite reflektiert. Ist in dem Werkstück ein Lunker oder ein Riß vorhanden, so findet auch an diesem eine Reflexion statt. Die eindringende wie die reflektierte Ultraschallwelle wirken auf einen Kathodenstrahloszillographen ein und werden als Oszillogramm wiedergegeben. Etwa vorhandene Fehler des Werkstücks sind daran sofort erkennbar.

Der große Vorzug der Werkstoffprüfung mit Hilfe von Ultraschall besteht darin, daß fehlerhafte Stellen im Werkstück mit Sicherheit gefunden werden, ohne daß das Werkstück selbst dabei beschädigt wird. So trägt die Verwendung von Ultraschall dazu bei, die Qualität der Erzeugnisse unserer volkseigenen Betriebe immer mehr zu steigern.

d) Eine weitgehende Verfeinerung des Meßverfahrens ist bei der Echolotung durch Anwendung des Ultraschalls erreicht worden. Die Fehlergrenzen liegen bei einem *Ultraschallot* viel enger als beim Echolot im Hörbereich.

e) Eine ebenso große Bedeutung wie den technischen Anwendungen des Ultraschalls kommt seiner *Verwendung in der Heilkunde* zu. Besonders erfolgreich hat sich bisher die Anwendung des Ultraschalls bei der Heilbehandlung von Neuralgien und Gelenkerkrankungen erwiesen.

In das medizinisch-biologische Gebiet gehört auch die *Beeinflussung von Bakterien* durch Ultraschall. Dieser wirkt nämlich auf Bakterien zerstörend ein. Man kann Milch und andere Nahrungsmittel durch Ultraschall sterilisieren.

f) Sehr nützlich hat sich die Vorbehandlung von Pflanzensamen durch Ultraschall erwiesen. Das Wachstum mancher Pflanzen wird durch eine vorangehende Beschallung der Samen wesentlich gesteigert.

Die hier angeführten Beispiele machen deutlich, daß alle Vorgänge in der Natur im weitesten Maße einander beeinflussen und daß sich unsere Erkenntnis der Natur immer höher entwickelt. Die Erweiterung der wissenschaftlichen Durchdringung der Natur führt wieder zu einer sich ständig erweiternden Beherrschung der Natur und zu einer Verbesserung technischer Vorgänge.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Wie lang muß das Rohr einer Galtonpfeife sein, wenn sie einen Ton mit der Frequenz $f = 14000$ Hz geben soll? ($c = 340$ m/s)
2. Das Rohr einer Galtonpfeife ist auf 26 mm eingestellt. Wie groß ist die Frequenz des abgegebenen Tones? ($c = 330$ m/s)
3. Wie lang ist das Rohr einer Galtonpfeife beim Erreichen der Hörbarkeitsgrenze? ($f = 20000$ Hz, $c = 340$ m/s)
4. Welche Wellenlänge hat Ultraschall mit einer Frequenz von 80000 Hz?
5. Wir nehmen als untere Hörbarkeitsgrenze der Einfachheit halber einen Ton mit der Frequenz $f_u = 20$ Hz, als obere einen Ton mit der Frequenz $f_o = 20000$ Hz an. Wieviel Oktaven umfaßt der gesamte Hörbereich?
6. Geben Sie eine Übersicht über die Verwendbarkeit des Ultraschalls!

OPTIK

V. Die Lichtausbreitung

§ 18. Ausbreitung des Lichtes im Raum

1. Lichtquellen. Man kann einen Körper nur dann sehen, wenn von ihm Licht ausgeht, das durch Reizung der Sehnerven die Sinneswahrnehmung hervorruft. Dabei ist es gleichgültig, ob der Körper selbst leuchtet oder nur Licht reflektiert.

Die selbständige Lichtausstrahlung erfolgt meist bei hoher Temperatur. Bei etwa 525° C beginnen feste und flüssige Körper in schwacher Grau-Glut zu leuchten. Das von ihnen ausgestrahlte Licht geht bei steigender Temperatur in Rot, in Gelb und schließlich in Weiß über. Diese Farbe wird bei einer Temperatur von 1000° C und mehr erreicht. Man nennt Lichtquellen, die bei hoher Temperatur Licht aussenden, *Temperaturstrahler*. Es gibt aber auch Stoffe, die bereits bei Temperaturen unterhalb von 500° C leuchten. Man bezeichnet sie als *Kaltstrahler*. Beispiele hierfür sind die Leuchtröhren und die Leuchtstoffröhren, die in jüngster Zeit einen hohen Entwicklungsstand erreicht haben.

2. Geradlinige Ausbreitung des Lichtes. Von der Grundschule her sind uns die folgenden Tatsachen bereits bekannt:

a) Das Licht breitet sich nach allen Seiten geradlinig aus.

b) Hinter jedem von einer Lichtquelle bestrahlten undurchsichtigen Körper entsteht auf der der Lichtquelle abgewandten Seite ein Schattenraum. Auf einem hinter dem Körper angebrachten weißen Schirm zeigt sich eine dunkle Fläche, der Schatten.

c) Ein von einer punktförmigen Lichtquelle beleuchteter Körper wirft einen scharf begrenzten, gleichmäßig dunklen Schlagschatten.

d) Ein von einer ausgedehnten Lichtquelle beleuchteter Körper erzeugt einen Kernschatten, der von einem nach außen hin heller werdenden Halbschatten umgeben ist.

e) Auch hinter durchscheinenden Körpern entstehen schwache Schatten, da nur ein Teil des auffallenden Lichtes diese Körper durchdringt.

Wir stellen vor die Lichtquelle eine Lochblende mit kleiner kreisförmiger Öffnung und beobachten, daß durch das Loch nur ein enges Lichtbündel hindurchdringt. Wir können uns den Durchmesser des Lichtbündels so klein vorstellen, daß wir ihn gegenüber der Länge des Lichtbündels vernachlässigen dürfen. Ein solches Lichtbündel nennt man einen *Lichtstrahl*. Lichtstrahlen gibt man in Zeichnungen abstrahierend durch gerade Linien wieder. Sie deuten

gleichzeitig die Ausbreitungsrichtung des von der Lichtquelle ausgehenden Lichtstromes an. Man muß aber beachten, daß alle auf die beschriebene Art erzeugten Lichtstrahlen einen Querschnitt von meßbarer Größe haben.

3. Divergente und parallele Lichtstrahlenbündel. Der Querschnitt des Lichtstrahlenbündels, das wir aus dem Lichtstrom einer punktförmigen Lichtquelle ausblenden, wird mit wachsender Entfernung von der Lichtquelle größer. Man bezeichnet ein solches Lichtstrahlenbündel als *divergent.*

Wir untersuchen nunmehr *die Abhängigkeit des Querschnitts eines Lichtstrahlenbündels von der Entfernung der Lichtquelle von der Meßstelle.* Zu diesem Zweck lassen wir das Licht einer Punktlichtlampe auf einen Schirm fallen, der mit Millimeterpapier überzogen ist (Abb. 68/1). Zwischen die Lampe und den Schirm stellen wir eine Blende mit quadratischem Ausschnitt so auf, daß auf dem Schirm gerade vier Quadrate beleuchtet werden. Der Abstand der Lichtquelle vom Schirm betrage 20 cm.

Vergrößern wir diesen Abstand auf 40 cm, so wächst die erhellte Fläche auf 16 Quadrate, also auf das Vierfache der ursprünglichen Größe. Bei dreifacher Entfernung von der Lichtquelle werden 36 Quadrate, mithin das Neunfache der Ausgangsfläche, beleuchtet.

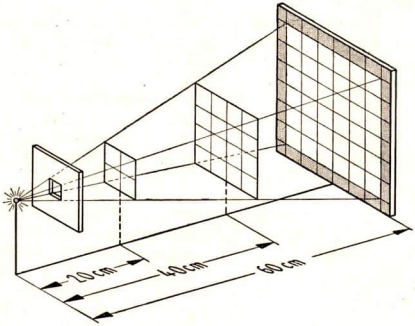


Abb. 68/1. Divergente geradlinige Ausbreitung des Lichtes im Raum. Die Stellung der quadratischen Blende bleibt unverändert. Der Schirm wird der Reihe nach auf eine Entfernung von 20 cm, 40 cm, 60 cm von der Lichtquelle gebracht. Die letzte Stellung ist in der Abbildung wiedergegeben.

Die Versuchsreihe läßt sich in gleicher Weise weiter fortsetzen. Aus den Ergebnissen der Versuchsreihe und aus vielen anderen Versuchen folgt:

Der Querschnitt F eines abgegrenzten, von einer punktförmigen Lichtquelle ausgehenden Lichtstrahlenbündels ist proportional dem Quadrat des Abstandes a von der Lichtquelle.

$$F \sim a^2.$$

Läßt man Sonnenlicht durch eine Blende ins Zimmer fallen und untersucht den Querschnitt des herausgeblendeten Strahlenbündels in verschiedenen Entfernungen von der Blende, so findet man, daß er überall gleich groß ist. Man spricht in einem solchen Falle von einem *parallelen Strahlenbündel.* In Wirklichkeit ist das Strahlenbündel nur angenähert parallel. Die Abweichung ist jedoch infolge der großen Entfernung der Sonne von der Erde so gering, daß sie vernachlässigt werden kann.

4. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Wir wissen bereits von der Grundschule her (LB 7, § 1,6), daß *Olaf Römer*[1] als erster die Lichtausbreitung als einen zeitlichen Vorgang erkannte. Er errechnete die Lichtgeschwindigkeit auf Grund astronomischer Beobachtungen zu rund $3 \cdot 10^5$ km/s. *Hippolyte Louis Fizeau*[2] hat 1849 zum ersten Male die Geschwindigkeit des Lichtes mittels irdischer Lichtquellen an einer Meßstrecke von 8,66 km bestimmt. Er kam zu dem gleichen Ergebnis wie Olaf Römer.

Dem französischen Physiker *Léon Foucault*[3] gelang es, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Laboratorium zu ermitteln.

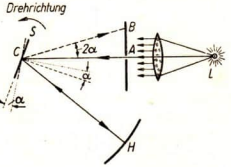


Abb. 69/1. Foucaultsches Verfahren zur Messung der Lichtgeschwindigkeit

Das durch den Spalt A hindurchgehende Bündel paralleler Lichtstrahlen wird durch den um C drehbaren Spiegel S auf den festen Hohlspiegel H gelenkt und dort in sich zurückgeworfen. Infolge der Drehung des Spiegels entsteht das um den Winkel 2α seitlich verschobene Bild des Spaltes A in B.

Durch eine schmale Spaltöffnung A läßt man parallele Lichtstrahlen auf einen um C drehbaren Spiegel S in C auffallen (Abb. 69/1). Der Spiegel reflektiert in der gezeichneten Stellung die Strahlen in Richtung auf den Hohlspiegel H, dessen Krümmungsmittelpunkt in C liegt. Sie werden vom Hohlspiegel H in sich zurückgeworfen und treffen wieder auf den Spiegel S. Solange dieser Spiegel seine Lage nicht ändert, entsteht das Bild des Spaltes in A. Rotiert jedoch der Spiegel S, so treffen die vom Hohlspiegel H reflektierten Strahlen den Spiegel S in einer etwas anderen Stellung als beim Hingang. Hat sich der Spiegel S dabei um den kleinen Winkel α gedreht, so erscheint das Bild des Spaltes gegenüber der ursprünglichen Reflexionsrichtung in einer um den Winkel 2α abgelenkten Richtung in B. Aus dem Winkel α und der Drehzahl des Spiegels kann man die Zeit t berechnen, in der das Licht die Strecke $2r$ durchläuft, wobei r der Krümmungsradius des Hohlspiegels ist. Die Lichtgeschwindigkeit c ergibt sich dann aus der Gleichung

$$c = \frac{2r}{t}.$$

Auf diese Weise fand Foucault als Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes den Wert von rund $3 \cdot 10^5$ km/s.

Die Bedeutung dieses Verfahrens besteht darin, daß zwischen den Hohlspiegel H und den Spiegel S ein anderes Medium als Luft gebracht werden kann. So konnte Foucault unmittelbar die *Lichtgeschwindigkeit im Wasser* mit rund

---

[1] Olaf Römer (1644–1710), dänischer Astronom. Er berechnete 1675 die Lichtgeschwindigkeit aus der Verfinsterung der Jupitermonde und legte die Ergebnisse seiner Forschung 1676 der Pariser Akademie vor.

[2] Hippolyte Louis Fizeau (1819–1896), Professor der Physik in Paris, hat bedeutende optische Untersuchungen durchgeführt.

[3] Léon Foucault (1819–1868), war ursprünglich Mediziner, wurde später Professor der Physik in Paris und Mitglied der Akademie in Paris. Er veröffentlichte 1862 seine Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.

225000 km/s und in *Glas* mit rund 200000 km/s ermitteln und damit zeigen, daß die Lichtgeschwindigkeit in den einzelnen Medien verschieden groß ist.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in Luft beträgt (299 793,1 ± 0,25) km/s.

Auch die *Lichtgeschwindigkeit im Vakuum* ist sehr genau bestimmt worden. Sie beträgt (299796 ± 4) km/s und weicht demnach von der Lichtgeschwindigkeit in Luft nicht wesentlich ab.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Geben Sie Beispiele für selbstleuchtende und beleuchtete Himmelskörper an!
2. Wie hängt die Lichtaussendung von der Temperatur der Lichtquelle ab?
3. Nennen Sie aus der Erfahrung Vorgänge, aus denen die geradlinige Ausbreitung des Lichtes hervorgeht!
4. Beschreiben Sie die Ihnen bekannten Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit!
5. In welcher Zeit durchläuft das Licht eine Strecke von der Länge des Breitenkreises Ihres Wohnortes?

§ 19. Die Reflexion des Lichtes

1. Lichtdurchlässigkeit der Körper. Fällt auf einen Körper Licht, so wird der eine Teil des Lichtes reflektiert, der andere Teil dringt in den Körper ein. Je nach dem Stoff, aus dem der Körper besteht, und je nach der Dicke der zu durchdringenden Schicht erfährt der eindringende Teil des Lichtes eine verschieden starke Schwächung, die man als *Absorption* bezeichnet. Wie wir von der Grundschule her wissen, unterscheidet man *durchsichtige, durchscheinende* und *lichtundurchlässige Körper*. Zwischen absoluter Durchsichtigkeit und absoluter Lichtundurchlässigkeit gibt es viele Zwischenstufen. Bei der Verwendung des Begriffes „absolute Durchsichtigkeit" ist zu beachten, daß es sich um einen Grenzfall handelt, den es in Wirklichkeit nicht gibt.

Eine dünne Wasserschicht ist lichtdurchlässig. Wir wissen aber aus Beobachtungen von Tauchern, daß in größeren Meerestiefen, etwa von 300 m Tiefe an, volle Dunkelheit herrscht. Sehr dicke Wasserschichten sind demnach für Licht undurchlässig. Andererseits sind sehr dünne Schichten auch dann lichtdurchlässig, wenn sie aus Stoffen bestehen, die man für gewöhnlich als lichtundurchlässig bezeichnet. So sind beispielsweise Goldfolien mit einer Stärke von 1 μ durchscheinend.

Betrachtet man solche dünne Schichten durch ein Mikroskop, so geben sie häufig wertvolle Aufschlüsse über ihren inneren Aufbau und über ihre Zusammensetzung sowie ihr verschiedenes Verhalten gegenüber dem Licht. Man stellt für mikroskopische Untersuchungen von Mineralien, anatomischen und biologischen Präparaten solche dünne Schichten mittels besonderer Geräte her und bezeichnet sie als *Dünnschliffe*. Diese haben im allgemeinen eine Dicke von weniger als 0,025 mm.

2. Regelmäßige Reflexion – Das Reflexionsgesetz. Durch Versuche ist festgestellt worden, daß das Licht von glatten Flächen vorwiegend in einer Rich-

tung reflektiert wird. Man spricht in diesem Falle von einer *regelmäßigen Reflexion.* Einzelheiten über die Reflexion sind uns bereits von der Grundschule her bekannt (LB 7, § 2). Das **Reflexionsgesetz** wird hier noch einmal wiedergegeben:

Wird ein Lichtstrahl an einem Spiegel reflektiert, so liegen der einfallende Strahl, der reflektierte Strahl und das Einfallslot in einer Ebene. Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

3. Diffuse Reflexion. Ist die Oberfläche eines Körpers rauh, so wird das auf ihn fallende Licht nach allen Seiten reflektiert, es wird *zerstreut.* Man bezeichnet diese Reflexion als *diffuse Reflexion.* Sie wird beispielsweise bei der *indirekten Beleuchtung* von Räumen ausgenutzt. Dabei richtet man die Lichtquelle gegen die hellen Wände und die Decke des Raumes, von denen das Licht diffus reflektiert wird. Durch diese Art der Beleuchtung erreicht man eine gleichmäßige Helligkeit im ganzen Raum und vermeidet jede Blendwirkung sowie scharfe Schatten.

4. Das optische Bild beim ebenen Spiegel. Schon in der Grundschule haben wir an Hand von Versuchen folgende Tatsachen festgestellt:

a) Am ebenen Spiegel entstehen nur virtuelle Bilder.

b) Das Bild eines Gegenstandes erscheint am ebenen Spiegel in derselben Entfernung hinter dem Spiegel, in der sich der Gegenstand davor befindet. Bild und Gegenstand liegen symmetrisch zum Spiegel; sie haben die gleiche Größe und Gestalt. Ihre Seiten erscheinen vertauscht.

Im folgenden soll mathematisch gezeigt werden, daß alle von einem Punkt ausgehenden Strahlen, die auf einen ebenen Spiegel treffen, so reflektiert werden, daß sie von einem hinter dem Spiegel gelegenen Punkte herzukommen scheinen. Man bezeichnet diesen Punkt als das Bild der Lichtquelle. Es läßt sich beweisen, daß Bild und Gegenstand symmetrisch zum Spiegel liegen. Wir betrachten den von der Lichtquelle L ausgehenden Strahl, der in B senkrecht auf die Spiegelfläche trifft und in sich selbst zurückgeworfen wird (Abb. **71**/1). Man bezeichnet einen solchen Strahl als *Hauptstrahl.* Außer dem Hauptstrahl greifen wir aus dem Lichtstrahlenbündel noch einen beliebigen anderen Strahl heraus, der in A reflektiert wird. Die rückwärtige Verlängerung des reflektierten Strahles schneidet die Verlängerung des Hauptstrahles in L'.

Nach dem Reflexionsgesetz ist $\alpha_1 = \alpha_2$, mithin auch $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$; denn es ist $\varepsilon_1 = 90° - \alpha_1$, $\varepsilon_2 = 90° - \alpha_2$. Da $\varepsilon_2 = \varepsilon$ ist, gilt auch $\varepsilon = \varepsilon_1$. Ferner ist

$$\sphericalangle LBA = \sphericalangle L'BA = 90°.$$

$\overline{AB}$ ist sich selbst gleich. Die Dreiecke LAB und $L'AB$ sind demnach kongruent. Es ist mithin auch

$$\overline{LB} = \overline{L'B}.$$

Da die Strecken $\overline{LB}$ und $\overline{L'B}$ von der Lage des Einfallspunktes A unabhängig sind, gilt diese

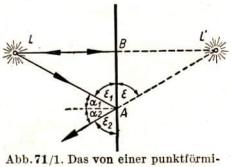


Abb. **71**/1. Das von einer punktförmigen Lichtquelle L ausgehende Lichtbündel verläuft nach der Reflexion so, als ob es von dem symmetrisch hinter dem Spiegel gelegenen Punkt L', dem optischen Bild der Lichtquelle, herkäme.

Beziehung für alle von der Lichtquelle L auf den Spiegel auffallenden Strahlen. Sie gilt auch für alle Punkte eines Körpers, von denen Lichtstrahlen ausgehen.

5. Anwendungen des ebenen Spiegels. Von den überaus zahlreichen technischen Geräten, bei denen ebene Spiegel verwendet werden, können hier nur wenige erwähnt werden. Vom volkseigenen Carl-Zeiss-Werk in Jena wurde der in Abb. **72**/1 dargestellte *Coelostat* entwickelt. Er wird sowohl für astronomische Beobachtungen als auch für Sternaufnahmen verwendet. Das von dem zu beobachtenden Himmelskörper kommende Licht fällt auf den Spiegel *1* und wird von diesem so reflektiert, daß es auf den Spiegel *2* trifft. Dieser Spiegel reflektiert das Licht in die optische Achse eines in der Nähe aufgestellten Fernrohres. Mittels eines Motors werden die Spiegel so gedreht, daß die Erddrehung für die Beobachtung ausgeschaltet wird. Das Bild des Himmelskörpers erscheint dann im Fernrohr immer an der gleichen Stelle des Gesichtsfeldes.

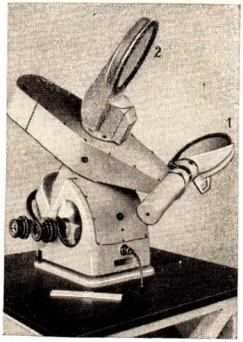


Abb. **72/1.** Jensch-Coelostat 300, hergestellt vom volkseigenen Carl-Zeiss-Werk in Jena

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Standortbestimmung von Schiffen ist der *Spiegelsextant* (Abb. **72**/2 und **72**/3). Er dient zum Messen von Sternhöhen. Aus ihnen kann man auf den Standort des Schiffes schließen. Um den Mittelpunkt eines Metallrahmens, der die Form eines Kreissektors mit einem Mittelpunktswinkel von etwas über 60° hat, dreht sich ein Metallarm (Abb. **72/3**). Sein freies Ende, das mit einem Nonius versehen ist, bewegt sich über einer in Grade geteilten Kreisskala. Der Arm trägt über seinem Drehpunkt den Spiegel A, dessen Ebene in Richtung des Armes liegt. Ihm gegenüber ist auf einem Schenkel des Sektors eine Glasscheibe B befestigt, die in ihrem unteren Teil eine Spiegelbelegung besitzt. Der Spiegel ist so angebracht, daß er parallel zum Spiegel A liegt, wenn der bewegliche Arm auf den Nullpunkt

Abb. **72/2.** Spiegelsextant

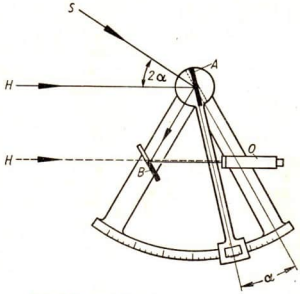


Abb. **72/3.** Strahlengang beim Spiegelsextanten

der Kreisteilung eingestellt ist. Am anderen Schenkel des Sektors ist eine Visiereinrichtung O angebracht. Sie besteht aus einer Scheibe mit einem kleinen Loch, einem *Diopter*[1], oder einem Fernrohr.

Visiert man in der Nullstellung durch O und die unbelegte Hälfte von B nach einem Punkt H des Horizonts, so sieht man dicht daneben in der belegten Hälfte von B nochmals den Punkt H infolge der Reflexion am Spiegel A. Man dreht den Arm so weit, bis man neben dem direkt gesehenen Punkt des Horizonts im Spiegel B den zu beobachtenden Stern sieht. Wurde der Arm um den Winkel α gedreht, so beträgt der Sehwinkel 2α. Der Sehwinkel kann unmittelbar an der Kreisteilung abgelesen werden, da auf dieser die doppelten Werte der Winkel angegeben sind, um die der Arm gedreht wird.

Werden zwei ebene Spiegel unter einem spitzen Winkel zusammengesetzt, so erhält man einen *Winkelspiegel.* Abb. **73/1** zeigt schematisch zwei Spiegel S_1 und S_2, die einen Winkel von 45° bilden. Ein Lichtstrahl fällt in A auf den Spiegel S_1 und bildet mit dem Einfallslot den Winkel α. Er wird unter dem gleichen Winkel reflektiert und trifft den Spiegel S_2 in B unter dem Einfallswinkel β. Nach erfolgter Reflexion bildet er mit dem auf S_1 einfallenden Strahl in C den Winkel δ, der ein Außenwinkel des Dreiecks ABC ist. Daraus folgt

$$\delta = 2\alpha + 2\beta = 2(\alpha + \beta).$$

Nun ist aber $\alpha = 90° - \varepsilon$

und $\beta = 90° - \gamma$,

mithin $\alpha + \beta = 180° - (\varepsilon + \gamma)$.

Andererseits ist auch der von den beiden Spiegeln eingeschlossene Winkel

$$180° - (\varepsilon + \gamma) = 45°.$$

Daraus folgt $\alpha + \beta = 45°$,

und somit $\delta = 2(\alpha + \beta) = 90°$.

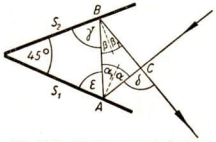
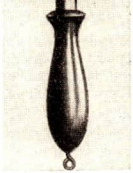


Abb. **73/1.** Strahlengang bei einem Winkelspiegel, dessen Teilspiegel unter 45° gegeneinander geneigt sind. Der auf den Winkelspiegel fallende Strahl wird an den Spiegeln S_1 und S_2 so reflektiert, daß er senkrecht zum einfallenden Strahl austritt.

Die beiden in den Winkelspiegel ein- und austretenden Strahlen stehen aufeinander senkrecht. Wegen dieser Eigenschaft benutzt man beim Feldmessen den Winkelspiegel von 45° zum Abstecken von rechten Winkeln (Abb. **73/2**).



a) Ansicht des Winkelspiegels

b) Winkelspiegel im Gebrauch

Abb. **73/2.** 45°-Winkelspiegel zum Feldmessen
Er wird verwendet zum Abstecken eines rechten Winkels.

[1] diá (griech.) = durch, optér (griech.) = Späher

Fällt ein Lichtstrahl auf einen Winkelspiegel von 90°, so stehen die Einfallslote senkrecht aufeinander. Folglich ist

$$\alpha + \beta = 90°.$$

Daraus ergibt sich eine Gesamtablenkung von

$$\delta = 2\,(\alpha + \beta) = 180°,$$

wenn die vom einfallenden und vom austretenden Strahl gebildete Ebene auf der Schnittkante der Spiegel senkrecht steht.

Soll die Gesamtablenkung auch bei beliebig einfallendem Strahl 180° betragen, so muß man einen *Dreifachspiegel* oder *Tripelspiegel* verwenden (Abb. **74/1**). Man versteht darunter einen räumlichen Winkelspiegel, der aus drei paarweise aufeinander senkrecht stehenden Spiegeln zusammengesetzt ist. Tripelspiegel werden als *Rückstrahler* an Fahrzeugen, an Warnschildern der Eisenbahn und an Straßenverkehrsschildern verwendet. Bei diesen Rückstrahlern sind in die Oberfläche Vertiefungen eingeprägt, die die Form von Würfelecken haben und als Tripelspiegel wirken. Das auf die Rückstrahler fallende Licht der Fahrzeuge wird in die gleiche Richtung zurückgeworfen, aus der es gekommen ist.

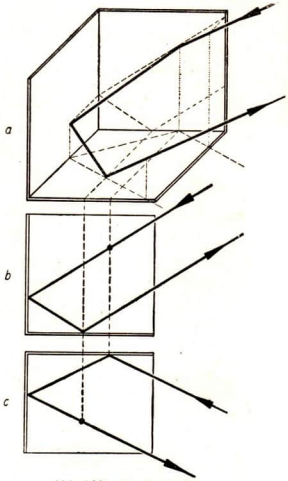


Abb. 74/1. Tripelspiegel
Der reflektierte Strahl verläuft parallel zum einfallenden Strahl.
a) Gesamtansicht, b) Aufriß, c) Grundriß

6. Fragen und Aufgaben:

1. Nennen Sie Beispiele für die verschiedene Lichtdurchlässigkeit von Körpern!
2. Was versteht man unter regelmäßiger, was unter diffuser Reflexion?
3. Nennen Sie praktische Anwendungen der diffusen Reflexion!
4. Welche Gesetze gelten für die Reflexion des Lichtes an einem ebenen Spiegel?
5. Schildern Sie die Bildentstehung beim ebenen Spiegel!
6. Wie groß muß ein an einer senkrechten Wand hängender Spiegel mindestens sein, damit eine davorstehende Person sich vollständig darin sehen kann, ohne ihre Stellung zu ändern? Wie hoch muß der Spiegel angebracht sein und wo muß die Person stehen? Fertigen Sie eine maßstäbliche Zeichnung an!
7. Stellen Sie zwei verschieden große ebene Spiegel in senkrechter Lage mit einander zugekehrten Spiegelflächen parallel zueinander auf und dazwischen eine brennende Kerze! Erklären Sie die Mehrfachspiegelung! Wie ändert sich die Lage der Bilder, wenn die Spiegel etwas gegeneinander gedreht werden?
8. Wie erfolgt die Reflexion am Winkelspiegel des Feldmessers?
9. Ein ebener Spiegel ist unter 45° gegen die Horizontale geneigt. Zeichnen Sie den Strahlengang eines senkrecht vor dem Spiegel aufgestellten Gegenstandes zum Auge eines Beobachters, der das Bild des Gegenstandes sieht!
10. Ein Winkelspiegel besteht aus zwei unter 60° gegeneinander geneigten ebenen Spiegeln. Es ist zu beweisen, daß ein in den Spiegel einfallender Lichtstrahl mit dem austretenden Strahl einen Winkel von 120° bildet! (Beweis wie beim Winkelspiegel für 45°)

§ 20. Die Reflexion des Lichtes an gekrümmten Spiegeln

1. Hohlspiegel (Konkavspiegel). Ein *Hohlspiegel* oder *Konkavspiegel* ist ein Teil einer Kugelfläche, die auf der Innenseite spiegelnd ist. Den Mittelpunkt O der spiegelnden Fläche bezeichnet man als den *optischen Mittelpunkt.* Der Mittelpunkt der Kugel, aus der man sich den Spiegel herausgeschnitten denken kann, ist der *Krümmungsmittelpunkt* M. Die durch den Krümmungsmittelpunkt M und den optischen Mittelpunkt O gehende Gerade heißt die *optische Achse.* Auf ihr liegt in der Mitte zwischen Spiegel und Krümmungsmittelpunkt der *Brennpunkt* F. Den Winkel φ, den ein vom Krümmungsmittelpunkt M zum äußersten Rande des Spiegels verlaufender Strahl mit der optischen Achse bildet, nennt man den *Öffnungswinkel des Spiegels* (Abb. **75**/1).

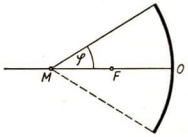


Abb. 75/1. Der Öffnungswinkel eines Hohlspiegels

Von der Grundschule her ist uns über die Reflexion von Lichtstrahlen am Hohlspiegel folgendes bekannt:

a) Parallel zur optischen Achse auf einen Hohlspiegel fallende Lichtstrahlen werden so reflektiert, daß sie sich in einem Punkt der optischen Achse, dem Brennpunkt, schneiden.

b) Vom Brennpunkt eines Hohlspiegels ausgehende Strahlen (Brennpunktsstrahlen) werden von diesem so reflektiert, daß sie parallel zur optischen Achse austreten.

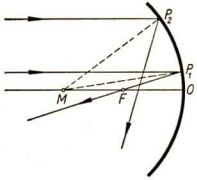


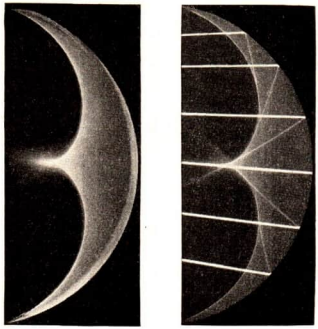
Abb. 75/2
Achsenparallele Strahlen am Hohlspiegel
Achsennahe Strahlen schneiden die optische Achse nach der Reflexion im Brennpunkt, achsenferne Strahlen zwischen Brennpunkt und optischem Mittelpunkt.

Diese Aussagen gelten mit guter Annäherung jedoch nur für Hohlspiegel mit kleinem Öffnungswinkel. Lassen wir beispielsweise zwei achsenparallele Lichtstrahlen auf einen Hohlspiegel mit großem Öffnungswinkel fallen, so haben die beiden reflektierten Strahlen im allgemeinen nicht den gleichen Schnittpunkt mit der optischen Achse (Abb. **75**/2). Nur der achsennahe Strahl wird so reflektiert, daß er durch den Brennpunkt geht. Der achsenferne Strahl dagegen schneidet nach der Reflexion die optische Achse zwischen dem Brennpunkt und dem optischen Mittelpunkt.

Die Vereinigung der reflektierten Strahlen im Brennpunkt ist um so genauer, je kleiner die Öffnung des Hohlspiegels ist. Bei Hohlspiegeln großer Öffnung umhüllen die reflektierten Strahlen eine krumme Fläche, die *Brennfläche.* Sie hat an der Stelle des Brennpunktes eine Spitze. Legt man einen Ring, dessen Innenfläche poliert ist, auf eine weiße Unterlage, so beobachtet man beim Einfall von parallelen Lichtstrahlen im Innern des Ringes eine helle Linie, die nahezu die Form einer 3 zeigt. Die Spitze dieser 3 ist der Brennpunkt. Die eben beschriebene Figur stellt den Schnitt der Brennfläche mit der Unterlage dar. Man nennt

sie die *Katakaustik*[1] (Abb. **76**/1 a). Läßt man mehrere achsenparallele Lichtstrahlen auf einen Hohlspiegel fallen, so umhüllen die reflektierten Strahlen die Katakaustik als Tangenten (Abb. **76**/1 b).

Bei einem *Parabolspiegel* werden alle achsenparallelen Strahlen nach der Reflexion im Brennpunkt vereinigt (Abb. **76**/2). Die Form dieses Spiegels entsteht durch Rotation einer Parabel um ihre Achse. Der Spiegel ist ein *Rotationsparaboloid*.



a b

Abb. **76**/1. Katakaustik

a) Entstehung der Katakaustik beim Einfall eines Strahlenbündels in einen Hohlspiegel mit großem Öffnungswinkel

b) Verlauf einzelner Strahlen beim Erzeugen einer Katakaustik. Die Katakaustik wird von den reflektierten Strahlen umhüllt.

2. Die Abbildung beim Hohlspiegel – Die Hohlspiegelgleichung. Bei einem Hohlspiegel mit kleinem Öffnungswinkel schneiden zwei von einem Punkt der optischen Achse ausgehende Strahlen nach der Reflexion mit großer Annäherung die optische Achse im gleichen Punkt. Bei Hohlspiegeln mit großem Öffnungswinkel trifft das nur für achsennahe Strahlen zu. Achsenferne Strahlen, die von einem Punkt der Achse herkommen, schneiden sich nach der Reflexion nicht wieder in einem Punkt (Abb. **76**/3).

Ein von dem Achsenpunkt A ausgehendes achsennahes Strahlenbündel bildet A im Achsenpunkt A' annähernd punktförmig ab.

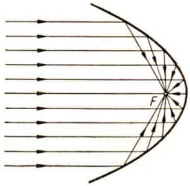


Abb. **76**/2. Parabolspiegel

Parallel zur optischen Achse auftreffende Strahlen vereinigen sich auch bei großem Öffnungswinkel in dem Brennpunkt F.

Beschränkt man sich bei der Abbildung auf achsennahe Strahlen, so kann man eine mathematische Beziehung zwischen der Gegenstandsweite s, der Bildweite s' und dem Krümmungsradius r herleiten. Unter der *Gegenstandsweite* versteht man den Abstand des Gegenstandes vom optischen Mittelpunkt, unter der *Bildweite* die Entfernung des Bildes vom optischen Mittelpunkt.

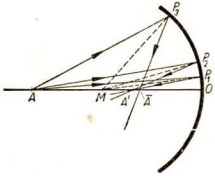


Abb. **76**/3. Die Reflexion von achsennahen und achsenfernen Strahlen am Hohlspiegel

AP_1 und AP_2 sind als achsennahe Strahlen anzusehen. Sie schneiden nach der Reflexion die optische Achse im gleichen Punkt A'. AP_3 ist nicht achsennahe. Sein reflektierter Strahl geht durch den Achsenpunkt $\bar{A}$.

[1] katá (griech.) = nieder, herab
kaustikós (griech.) = brennend

In Abb. 77/1 trifft ein vom Achsenpunkt A ausgehender Strahl den Spiegel in P, wo er nach dem Reflexionsgesetz reflektiert wird. Im Punkte A' schneidet er den von A in Richtung der optischen Achse verlaufenden Strahl, der vom Hohlspiegel in sich zurückgeworfen wird. A' ist das reelle Bild von A. Unter der Voraussetzung, daß AP und PA' achsennahe Strahlen sind, liegt A' so, daß sich die auf der Achse liegenden Strecken $\overline{AM}$ und $\overline{A'M}$ annähernd wie $\overline{AO}$ und $\overline{A'O}$ verhalten. Man kann sich davon durch Nachmessen an einer in großem Maßstab angefertigten Zeichnung leicht überzeugen. Es ist

$$\overline{AO} : \overline{A'O} = \overline{AM} : \overline{A'M}.$$

$\overline{AO}$ ist aber gleich der Gegenstandsweite s, $\overline{A'O}$ gleich der Bildweite s'. Ferner ist $\overline{MO} = \overline{MP} = r$. Die Proportion nimmt daher die Form an:

$$s : s' = (s - r) : (r - s').$$

Durch Multiplikation mit $s'(r - s')$ erhält man

$$sr - ss' = ss' - s'r$$

oder

$$s'r + sr = 2ss'.$$

Dividiert man durch $ss'r$, so ergibt sich:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}.$$

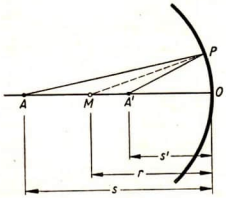


Abb. 77/1. Der Lichtpunkt A wird in A' abgebildet.
s Gegenstandsweite, s' Bildweite, r Krümmungsradius
Die Formelzeichen s und s' sind ebenso wie die im folgenden verwendeten Formelzeichen y und y' genormt und dem DIN-Blatt 1335 entnommen.

Da die Brennweite f gleich dem halben Krümmungsradius r ist, erhält man die Gleichung

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}.$$

Man nennt diese Gleichung die *Hohlspiegelgleichung*. Sie gilt für achsennahe Gegenstände unter Beschränkung auf enge Bündel achsennaher Strahlen. Durch Auflösen der Hohlspiegelgleichung nach s, s' oder f kann man eine der drei Größen berechnen, wenn die beiden anderen bekannt sind.

Beispiel: Vor einen Hohlspiegel mit dem Krümmungsradius $r = 20$ cm stellen wir in der Entfernung $s = 60$ cm einen leuchtenden Gegenstand. Aus der Hohlspiegelgleichung ergibt sich als Bildweite

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f} = \frac{10 \cdot 60}{60 - 10}\,\text{cm} = 12\ \text{cm}.$$

Bringt man im Abstande von 12 cm vom Hohlspiegel einen Schirm in den Strahlengang der reflektierten Strahlen, so erhält man tatsächlich ein scharfes Bild des Gegenstandes.

Die Hohlspiegelgleichung kann auch dann angewandt werden, wenn sich der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite befindet, das heißt, wenn das Bild virtuell ist. In diesem Falle ist die Bildweite mit negativem Vorzeichen

einzusetzen. In der folgenden Tabelle sind die charakteristischen Lagen von Gegenstand und Bild zusammengefaßt:

Bildentstehung an einem Hohlspiegel

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite $s > 2f$	**zwischen einfacher und doppelter Brennweite** $f < s' < 2f$	**reell**	**umgekehrt**	**verkleinert**
im Krümmungsmittelpunkt $s = 2f$	**im Krümmungsmittelpunkt** $s' = 2f$	**reell**	**umgekehrt**	**ebenso groß wie der Gegenstand**
zwischen doppelter und einfacher Brennweite $2f > s > f$	**außerhalb der doppelten Brennweite** $s' > 2f$	**reell**	**umgekehrt**	**vergrößert**
innerhalb der einfachen Brennweite $s < f$	**hinter dem Spiegel** s' **negativ**	**virtuell**	**aufrecht**	**vergrößert**

Da der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist, ändert sich bei einer Reflexion am Strahlengang nichts, wenn man den einfallenden mit dem reflektierten Lichtstrahl vertauscht. Daraus folgt:

Der Lichtweg ist umkehrbar.

Somit können bei reeller Bildentstehung am Hohlspiegel Gegenstand und Bild miteinander vertauscht werden.

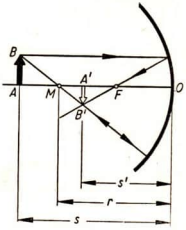


Abb. 78/1. Bildkonstruktion am Hohlspiegel mittels eines Parallelstrahles und eines Mittelpunktsstrahles

3. Größe des Bildes. Wir wählen als Gegenstand eine auf der optischen Achse in A senkrecht stehende Strecke $\overline{AB}$ (Abb. 78/1). Das optische Bild des Punktes B findet man zeichnerisch unter Benutzung eines Parallelstrahls und eines Mittelpunktsstrahls. Der Schnittpunkt B' der reflektierten Strahlen ist das Bild des Punktes B. Der zwischen der *Gegenstandsgröße* $\overline{AB} = y$ und der *Bildgröße* $\overline{A'B'} = y'$ bestehende Zusammenhang ergibt sich aus folgenden Überlegungen. Die Dreiecke

ABM und $A'B'M$ sind ähnlich, da sie in zwei Winkeln übereinstimmen (vgl. Abb. 78/1). Folglich gilt die Proportion:

$$\overline{AB} : \overline{A'B'} = \overline{AM} : \overline{A'M'}.$$

Da $\overline{AB} = y$ und $\overline{A'B'} = y'$ ist, kann man auch schreiben

$$y : y' = (s - r) : (r - s').$$

Bei der Ableitung der Hohlspiegelgleichung ergab sich

$$(s - r) : (r - s') = s : s'.$$

Somit erhält man

$$\boldsymbol{y : y' = s : s'.}$$

Bei der Bildentstehung am Hohlspiegel verhält sich die Gegenstandsgröße zur Bildgröße wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

4. Konvexspiegel. Kugelspiegel, deren Außenflächen spiegeln, heißen *Konvexspiegel.* Die Bezeichnungen Krümmungsmittelpunkt, optischer Mittelpunkt, optische Achse behalten die gleiche Bedeutung wie beim Konkavspiegel. An Stelle des Brennpunktes tritt der *Zerstreuungspunkt.* Läßt man auf einen Konvexspiegel parallele Lichtstrahlen fallen, so beobachtet man, daß die reflektierten Strahlen auseinanderlaufen. Sie scheinen von einem Punkt F, dem Zerstreuungspunkt, herzukommen (Abb. 79/1). Punkt F liegt hinter dem Spiegel und halbiert den Krümmungshalbmesser $\overline{MO}$. Man bezeichnet F auch als *negativen Brennpunkt* und die nach ihm hinzielenden Strahlen als Brennpunktsstrahlen. Für den Verlauf der Strahlen gelten die entsprechenden Gesetze wie für den Hohlspiegel. Die Bildkonstruktion erfolgt ebenso wie beim Hohlspiegel (Abb. 79/2).

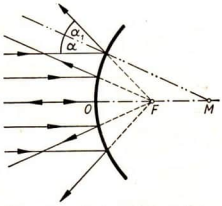


Abb. 79/1. Reflexion achsenparalleler Strahlen am Konvexspiegel

Die reflektierten Strahlen scheinen von einem hinter dem Spiegel liegenden Punkt F, dem Zerstreuungspunkt, herzukommen.

Von einem vor dem Konvexspiegel befindlichen Gegenstand entsteht stets ein virtuelles, aufrechtes und verkleinertes Bild, das hinter dem Spiegel liegt.

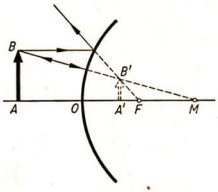


Abb. 79/2. Bildkonstruktion beim Konvexspiegel

O optischer Mittelpunkt, M Krümmungsmittelpunkt, F Zerstreuungspunkt, $\overline{AB}$ Gegenstand, $\overline{A'B'}$ virtuelles Bild

5. Fragen und Aufgaben:

1. Bilden Sie eine brennende Kerze mittels eines Hohlspiegels bei verschiedener Gegenstandsweite ab! Prüfen Sie die Ergebnisse durch Konstruktion des Bildes nach!

2. Was versteht man unter der Katakaustik? Wie entsteht sie?

3. In welcher Entfernung vom Hohlspiegel muß sich das Gesicht befinden, wenn ein vergrößertes, aufrecht stehendes Bild des Gesichts entstehen soll?
4. Wie kann man die Brennweite und die Krümmung eines Hohlspiegels bestimmen?
5. Die Brennweite eines Hohlspiegels ist $f = 20$ cm. In welcher Entfernung befindet sich ein Gegenstand, wenn dessen virtuelles Bild doppelt so groß erscheint wie der Gegenstand?
6. Auf der Achse eines Hohlspiegels mit dem Krümmungsradius $r = 6$ cm steht in einer Entfernung von $s = 10$ cm ein $y = 1{,}4$ cm hoher Gegenstand. Konstruieren Sie das Bild dieses Gegenstandes und bestätigen Sie die Richtigkeit der Konstruktion durch Rechnung!
7. Inwiefern gilt die Hohlspiegelgleichung $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$ auch für den Konvexspiegel?
8. Weshalb liefert der Konvexspiegel nur virtuelle Bilder?
9. Warum verwendet man Konvexspiegel als Rückblickspiegel am Auto?

§ 21. Die Brechung des Lichtes

1. Die Brechung des Lichtes beim Übergang in ein anderes Medium. Durch Versuche mit der optischen Scheibe wurde bereits im 7. Schuljahr festgestellt, daß beim Auftreffen von Lichtstrahlen auf die Grenzfläche zweier Medien ein Teil des Lichtes reflektiert wird. Der andere Teil des Lichtes dringt in das zweite Medium ein und wird dabei gebrochen. Den von dem gebrochenen Strahl mit dem Einfallslot gebildeten Winkel lernten wir als Brechungswinkel kennen (Abb. 80/1). Bei der Brechung bezeichnet man in Übereinstimmung mit der in § 8, 2 eingeführten Begriffsbildung das Medium, in dem das Licht die größere Ausbreitungsgeschwindigkeit hat, als das *optisch dünnere Medium*, das Medium mit der kleineren Ausbreitungsgeschwindigkeit als das *optisch dichtere Medium*. Die optische Dichte eines Mediums ist keineswegs mit seiner stofflichen Dichte identisch.

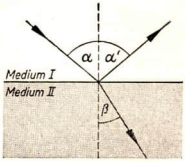


Abb. 80/1. Einfallswinkel und Brechungswinkel
Beim Übergang von Luft in Wasser oder in Glas ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel.

Von der Grundschule her sind uns folgende Versuchsergebnisse bekannt:

a) Der einfallende Strahl, das Einfallslot und der gebrochene Strahl liegen in einer Ebene.

b) Beim Übergang aus einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium werden die Lichtstrahlen zum Einfallslot hin gebrochen ($\alpha > \beta$), beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium werden sie vom Einfallslot weg gebrochen ($\alpha < \beta$). Die Ablenkung ist um so größer, je größer der Einfallswinkel ist; sie wird Null, wenn der Lichtstrahl senkrecht auftrifft.

2. Das Brechungsgesetz. Zur Ermittlung des zahlenmäßigen Zusammenhanges zwischen dem Einfalls- und dem Brechungswinkel wiederholen wir einen uns von der Grundschule her bekannten Versuch mit der optischen Scheibe (vgl. LB 7, § 4,2) und werten ihn quantitativ aus. Ändert man den Einfallswinkel von 10° zu 10°, so erhält man die in der nachstehenden Tabelle angegebenen Brechungswinkel (Abb. 81/1).

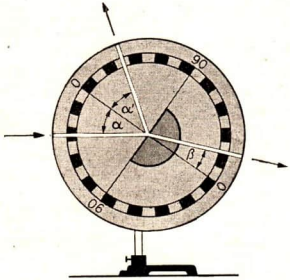


Abb. 81/1. Brechung und Reflexion des Lichtes an einem Halbzylinder aus Glas

α Einfallswinkel, β Brechungswinkel

Lichtbrechung beim Übergang von Luft in Glas

Einfallswinkel (α) in Luft	Brechungswinkel (β) in Glas	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\sin\alpha$	$\sin\beta$	$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$
0,0°	0,0°				
10,0°	6,5°	1,54	0,17	0,11	1,55
20,0°	13,0°	1,54	0,34	0,22	1,55
30,0°	19,5°	1,54	0,50	0,33	1,51
40,0°	25,4°	1,57	0,64	0,43	1,49
50,0°	30,7°	1,63	0,77	0,51	1,51
60,0°	35,3°	1,70	0,87	0,58	1,50
70,0°	38,8°	1,80	0,94	0,63	1,49
80,0°	41,0°	1,95	0,98	0,66	1,48
90,0°	41,8°	2,15	1,00	0,67	1,49

Da mit größer werdendem Einfallswinkel auch der Brechungswinkel größer wird, liegt die Vermutung nahe, daß der Brechungswinkel dem Einfallswinkel proportional ist. Bildet man jedoch den Quotienten aus α und β, so stellt man fest, daß er nicht konstant ist (vgl. 3. Spalte der Tabelle). Geht man aber vom Einfallswinkel α und vom Brechungswinkel β zu den Sinuswerten dieser Winkel über und bildet den Quotienten aus den Sinuswerten, so erhält man annähernd konstante Werte (vgl. 6. Spalte der Tabelle). Wir folgern daraus, daß die Sinuswerte des Einfalls- und des Brechungswinkels einander proportional sind:

$$\sin\alpha \sim \sin\beta .$$

Man kann dafür auch schreiben

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n .$$

Die Richtigkeit dieser Gleichung ist durch viele sehr genau durchgeführte Versuche bestätigt worden. Die Konstante n bezeichnet man als das *Brechungsverhältnis*. Es ist von den beiden Medien abhängig, an deren Grenzfläche die

Brechung stattfindet. Diese Zusammenhänge wurden bereits um das Jahr 1618 von dem holländischen Physiker *Snell van Royen*[1] erkannt. Sie werden durch das nach ihm benannte *Snelliussche Brechungsgesetz* wiedergegeben:

Bei der Brechung eines Lichtstrahles ist das Verhältnis des Sinuswertes des Einfallswinkels zum Sinuswert des Brechungswinkels konstant.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n\,.$$

Beim Übergang eines Lichtstrahles von Luft in Glas ergibt sich für das Brechungsverhältnis der Mittelwert

$$n_{\mathrm{LG}} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \approx 1{,}50 = \frac{3}{2}\,.$$

Der Wert n_{LG} gilt nur näherungsweise, da er stark von der Zusammensetzung des Glases abhängig ist.

Führt man die entsprechenden Messungen für den Übergang des Lichtes von Luft in Wasser aus, so erhält man als Brechungsverhältnis den Wert $n_{\mathrm{LW}} \approx \frac{4}{3}$.

Der französische Physiker *Foucault* fand, daß das *Brechungsverhältnis gleich dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten* in beiden Medien ist. Beim Übergang von Licht aus einem Medium in ein anderes gilt die Gleichung

$$n = \frac{c_1}{c_2}\,,$$

worin c_1 die Geschwindigkeit des Lichtes im ersten Medium und c_2 die Geschwindigkeit im zweiten Medium ist. Das gleiche Gesetz haben wir bereits in der Wellenlehre für die Brechung von Wellen kennengelernt (vgl. § 8,2). Die Übereinstimmung dieser Gesetze ist dadurch zu erklären, daß sich auch das Licht wellenförmig ausbreitet. Hier genügt es, die Abb. 34/2 sinngemäß auf ein parallelstrahliges Lichtbündel anzuwenden.

Wir betrachten den Längsschnitt durch ein solches Bündel und markieren durch je einen Querstrich die Stellen, an denen die Randstrahlen *I* und *II* die Trennfläche durchsetzen (Abb. 82/1). Während der Randstrahl *I* im dünneren Medium die Strecke $\overline{CB}$ mit der Geschwindigkeit c_1 in der Zeit t zurücklegt, durchläuft der Randstrahl *II* im optisch dichteren Medium die Strecke $\overline{AD}$ mit der Geschwindigkeit c_2 in der gleichen Zeit. Es ist

$$\overline{CB} = c_1 \cdot t \quad \text{und} \quad \overline{AD} = c_2 \cdot t\,.$$

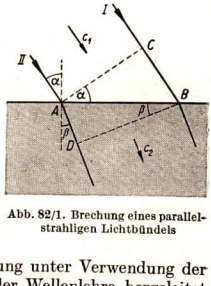


Abb. 82/1. Brechung eines parallelstrahligen Lichtbündels

Hieraus ergibt sich die oben angegebene Gleichung unter Verwendung der Sinuswerte auf dieselbe Weise, wie sie bereits in der Wellenlehre hergeleitet worden ist (vgl. S. 34).

[1] Willibrord Snell van Royen, latinisiert Snellius (1591–1626), Professor der Physik in Leyden (Holland). Er fand das Brechungsgesetz um 1620. Es wurde aber erst nach seinem Tode durch den französischen Philosophen und Naturforscher René Descartes veröffentlicht.

3. Totale Reflexion. Fällt ein Lichtstrahl aus einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres, so wird er vom Einfallslot weg gebrochen (Abb. 83/1). Bezeichnet man den im dichteren Medium liegenden Einfallswinkel mit α' und den im dünneren Medium liegenden Brechungswinkel mit β', so gilt jetzt

$$\frac{\sin\alpha'}{\sin\beta'} = \frac{1}{n}$$

oder

$$n \cdot \sin\alpha' = \sin\beta'.$$

Der größte Wert, den β' annehmen kann, ist 90° (Abb. 83/2). Da $\sin 90°$ den Wert 1 hat, muß

$$n \cdot \sin\alpha' \leqq 1$$

sein.

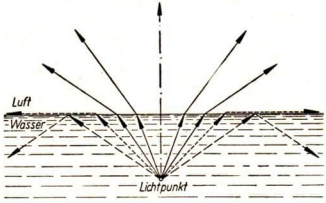


Abb. 83/1. Brechung und totale Reflexion an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft

Wird α' so groß gewählt, daß

$$n \cdot \sin\alpha' > 1$$

wird, so wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche nicht mehr gebrochen, sondern vollständig reflektiert. Man bezeichnet diese Reflexion als *totale Reflexion.* Sie wurde 1604 von *Kepler* zum ersten Mal beobachtet. Der größte Wert, den der Einfallswinkel annehmen kann, ohne daß totale Reflexion eintritt, heißt *Grenzwinkel der totalen Reflexion.* Er wird im folgenden mit $\bar{\alpha}$ bezeichnet. Er ergibt sich aus der Gleichung

$$\sin\bar{\alpha} = \frac{1}{n}.$$

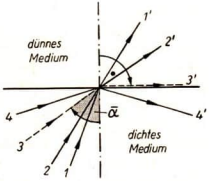


Abb. 83/2. Brechung von Lichtstrahlen beim Übergang aus dem dichteren ins dünnere Medium. Der Strahl *3* verläuft nach der Brechung streifend an der Grenzfläche der beiden Medien, der Strahl *4* wird total reflektiert.

Beispiele:

Das Brechungsverhältnis für den Übergang des Lichtes von Luft in Wasser ist $n_{WL} \approx \frac{4}{3}$. 2/3

Folglich gilt für den Grenzwinkel $\bar{\alpha}_{WL}$

$$\sin\bar{\alpha}_{WL} \approx \frac{3}{4}.$$

Bruchfehler

Mithin ist $\bar{\alpha}_{WL} \approx 48{,}6°$.

Entsprechend ist für den Übergang des Lichtes von Glas in Luft

$$\sin\bar{\alpha}_{GL} \approx \frac{2}{3}.$$

$$\bar{\alpha}_{GL} \approx 42°.$$

Die totale Reflexion wird bei den *total reflektierenden Prismen* ausgenutzt, die man in vielen optischen Geräten verwendet, um die Richtung eines Lichtstrahls um 90° oder um 180° zu ändern (Abb. 83/3 a und b). Ein total reflektierendes Prisma ist ein gerades Glasprisma, dessen Grundfläche ein rechtwinkliges, gleichschenkliges Dreieck ist.

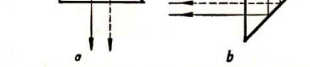


Abb. 83/3. Totalreflektierendes Prisma
Die Reflexion findet statt
a) an der Hypotenusenfläche,
b) an den Kathetenflächen.

4. Lichtdurchgang durch eine planparallele Platte. Fällt der Lichtstrahl auf eine *planparallele Glasplatte*, so erfährt er sowohl beim Übergang von Luft in Glas als auch beim Übergang von Glas in Luft eine Brechung (Abb. 84/1). Aus der Parallelität der Trennflächen folgt die Gleichheit der Winkel α_1 und α_2 sowie der Winkel β_1 und β_2. *Der gebrochene Strahl wird nur parallel zu sich selbst verschoben.* Die Größe der Parallelverschiebung d ist von der Dicke der Platte und vom Einfallswinkel abhängig.

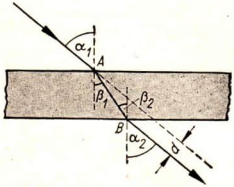


Abb. 84/1. Lichtdurchgang durch eine planparallele Platte
Übergang von Luft in Glas: α_1 Einfallswinkel, β_1 Brechungswinkel
Übergang von Glas in Luft: β_1 Einfallswinkel, α_2 Brechungswinkel

5. Lichtdurchgang durch ein Glasprisma. Wir benutzen ein Glasprisma, dessen Grundfläche ein gleichseitiges Dreieck ist. Die beiden Seitenflächen, durch die das Licht ein- und austritt, heißen die *brechenden Flächen*, ihre Schnittkante heißt die *brechende Kante*, und der Winkel ε, den die brechenden Flächen miteinander bilden, der *brechende Winkel*.

Man läßt einen Lichtstrahl, den man durch Vorschalten eines Farbfilters einfarbig gemacht hat, so auf ein Prisma fallen, daß er in einer zur brechenden Kante senkrechten Ebene durch das Prisma hindurchgeht. Der Lichtstrahl wird zweimal gebrochen und erfährt eine Gesamtablenkung um den Winkel δ (Abb. 84/2).

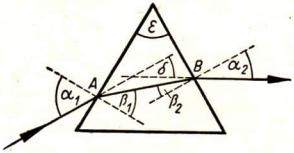


Abb. 84/2. Strahlengang beim Prisma. α_1 und β_1 Einfalls- und Brechungswinkel beim Übergang von Luft in Glas, β_2 und α_2 Einfalls- und Brechungswinkel beim Austritt in Luft, ε brechender Winkel, δ Gesamtablenkung

Ändert man durch Drehen des Prismas den Einfallswinkel, so findet man, daß die Ablenkung bei symmetrischem Durchgang des Lichtes durch das Prisma ihren geringsten Betrag, ihr Minimum, erreicht (Abb. 84/3).

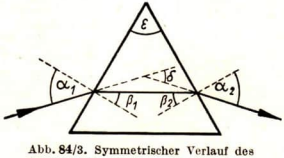


Abb. 84/3. Symmetrischer Verlauf des Strahles beim Minimum der Ablenkung (Bezeichnungen wie bei Abbildung 84/2)

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Beim Durchgang durch das Prisma wird ein einfarbiger Lichtstrahl stets von der brechenden Kante fort gebrochen.

Das Minimum der Ablenkung tritt bei symmetrischem Durchgang des Lichtes durch das Prisma ein.

6. Die atmosphärische Strahlenbrechung. Ein von einem Himmelskörper ausgehender Lichtstrahl, der schräg auf die Erdoberfläche trifft, muß auf weite Strecken die Atmosphäre durch-

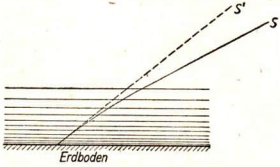


Abb. 84/4. Zeichnung zur Veranschaulichung der atmosphärischen Strahlenbrechung

dringen, bevor er zur Erde gelangt (Abb. 84/4). Auf seinem Wege durchläuft er Luftschichten von stetig zunehmender Dichte. Er wird dabei zum Einfallslot hin gebrochen. Daher ist seine Bahn innerhalb der Atmosphäre eine schwach gekrümmte Linie, deren Neigung zur Erde hin allmählich zunimmt. Da unser Auge eine Lichtquelle in der rückwärtigen Verlängerung der das Auge treffenden Lichtstrahlen sucht, so erscheint dem Beobachter das Gestirn nicht in der Richtung nach S, sondern in der Richtung nach S', also höher als es in Wirklichkeit steht. Diese scheinbare Hebung des Gestirns tritt besonders bei horizontnahen Gestirnen hervor. Auf dieselbe Ursache ist die *scheinbare Hebung des Meereshorizontes*, der Kimm, zurückzuführen.

Eine Erscheinung, die auf der totalen Reflexion beruht, kann man an heißen Tagen beobachten, wenn man im Kraftwagen auf einer Asphaltstraße fährt. Durch die von der Asphaltdecke ausgehende Wärmestrahlung werden die unmittelbar auf der Straße liegenden Luftschichten stark erwärmt und sind infolgedessen optisch dünner als die darüberliegenden Luftschichten. Das entgegengesetzt der Blickrichtung ganz flach einfallende Licht des blauen Himmels wird an den Grenzschichten zwischen optisch dichterer und optisch dünnerer Luft vom Einfallslot weg gebrochen und bei genügend großem Einfallswinkel total reflektiert (Abb. 85/1). Der ursprünglich schräg abwärts gerichtete Strahl wird nach der totalen Reflexion schräg aufwärts zurückgeworfen und gelangt dadurch in das Auge des Beobachters. Dieser glaubt, vor sich auf der Straße eine schimmernde Wasserfläche zu sehen, die beim Näherkommen immer weiter hinausrückt. In gleicher Weise sind die Luftspiegelungen an der Küste und in der Wüste zu erklären, die man als *Fata Morgana* bezeichnet.

Abb. 85/1. Luftspiegelung auf der Landstraße. Der Fahrer sieht bei × scheinbar eine Wasserfläche.

Warme Luft ist optisch dünner als kalte. Daher werden Lichtstrahlen, die in erwärmte Luftschichten gelangen, wie sie sich beispielsweise über Schornsteinen, über einer von der Sonne bestrahlten Sandfläche oder vor dem offenen Fenster eines warmen Zimmers im Winter bilden können, gebrochen und von ihrer Richtung abgelenkt. Da die aufsteigenden Luftströme fortlaufend ihre Lage und ihre Dichte ändern, ändert sich auch dauernd der Brechungswinkel. Daher erscheinen die hinter den warmen Luftmassen liegenden Gegenstände in *zitternder Bewegung*. Auch das *Flimmern* der Fixsterne beruht auf der durch die verschiedene Dichte der Luftschichten verursachten Brechung der Lichtstrahlen. Diese Luftunruhe erschwert astronomische Arbeiten erheblich. Sternwarten werden daher nach Möglichkeit dort angelegt, wo die klimatischen Verhältnisse solche Luftunruhen nur selten entstehen lassen.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Wie unterscheidet sich ein optisch dichteres von einem optisch dünneren Medium?
2. Was versteht man unter dem Brechungsverhältnis zweier Medien? In welcher Beziehung steht hierzu das Brechungsverhältnis beim Übergang in umgekehrter Richtung?
3. Unter welcher Bedingung tritt totale Reflexion ein?
4. Wie sieht für einen Taucher die Wasseroberfläche aus?

5. Bei schräger Draufsicht scheint ein im Wasser befindlicher Gegenstand höher zu stehen, als er in Wirklichkeit steht. Erklären Sie diese Täuschung!
6. In welchen beiden Fällen findet beim Übergang eines Lichtstrahles von einem Medium zum anderen keine Brechung statt?
7. Warum erscheint die Sonne kurze Zeit nach dem Aufgang und vor dem Untergang als Ellipse?
8. Beschweren Sie ein Reagenzglas mit einem Metallstückchen und stellen Sie es schräg in ein mit Wasser gefülltes Becherglas! Warum erscheint der im Wasser befindliche Teil des Reagenzglases spiegelnd, wie mit Quecksilber gefüllt, wenn man das Reagenzglas schräg von oben betrachtet?
9. Konstruieren Sie den Grenzstrahl der totalen Reflexion für den Übergang des Lichtes von Glas in Luft ($n_{LG} \approx \frac{3}{2}$)!
10. Bestimmen Sie durch Zeichnung den Verlauf eines Lichtstrahles durch ein Flintglasprisma ($n = 1{,}7, \varepsilon = 60°$) für den Einfallswinkel $\alpha = 30°$! Wie groß ist die Totalablenkung?
11. Wie groß ist das Minimum der Ablenkung für ein Kronglasprisma ($n = 1{,}5$), wenn der brechende Winkel $\varepsilon = 45°$ beträgt?

§ 22. Die Zerlegung des Lichtes

1. Das Spektrum. Bei der Untersuchung des Lichtdurchganges durch ein Prisma hatten wir einfarbiges Licht verwendet. Nunmehr beleuchten wir einen schmalen Spalt durch eine starke, weiß leuchtende Lichtquelle und bilden den Spalt durch eine Linse auf einen Schirm ab (Abb. 86/1). Bringen wir in den

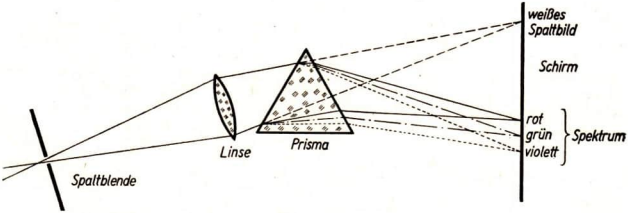


Abb. 86/1. Draufsicht auf die Versuchsanordnung zur Erzeugung eines Spektrums

Strahlengang dicht hinter die Linse ein Glasprisma, so wird das Licht von der brechenden Kante weg abgelenkt. Dabei wird es zu einem breiten farbigen Streifen auseinandergezogen, den man als **Spektrum** bezeichnet. Das am wenigsten abgelenkte Ende des Spektrums ist rot, das am stärksten abgelenkte Ende violett gefärbt. Die verschiedenen Farben des Spektrums sind nicht scharf voneinander getrennt, sondern gehen allmählich ineinander über. Man nennt diese Farben *Spektralfarben. Isaak Newton* unterschied *sieben Grundfarben: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo* und *Violett.* Heute beschränkt man sich meist auf *sechs Grundfarben: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau* und *Violett.* Ersetzt man den schmalen

Spalt durch einen genügend breiten, so entsteht an Stelle des Spektrums ein weißes Spaltbild, bei dem nur die seitlichen Ränder leicht gefärbt sind, und zwar auf der einen Seite rötlichgelb, auf der anderen Seite blauviolett.

Stellt man hinter das Prisma in den Strahlengang eine große Linse und vereinigt dadurch die aus dem Prisma austretenden Strahlen, so erhält man wieder ein weißes Spaltbild. Daraus folgt:

Weißes Licht ist zusammengesetztes Licht. Man kann es in die Spektralfarben zerlegen. Die Spektralfarben sind Grundfarben, die sich nicht weiter zerlegen lassen.

Die Entstehung des Spektrums ist darauf zurückzuführen, daß das Brechungsverhältnis für die Spektralfarben verschieden groß ist. Es nimmt von Rot über Grün nach Violett zu. Ein Spektrum ist nichts anderes als eine lückenlose Folge von verschiedenfarbigen Spaltbildern. Es ist um so reiner, je enger der Spalt ist.

Verwendet man in der in Abb. 86/1 dargestellten Versuchsanordnung Prismen, die zwar den gleichen brechenden Winkel haben, aber aus verschiedenen Stoffen bestehen, etwa ein *Kronglasprisma*, ein *Flintglasprisma* und ein mit *Schwefelkohlenstoff gefülltes Hohlglasprisma*, so erhält man Spektren verschiedener Breite. Daraus folgt, daß die verschiedenen Medien je nach ihrer Zusammensetzung für die gleichen Farben verschiedene Brechungsverhältnisse haben. Außerdem ist die Differenz der Brechungsverhältnisse für Rot und Violett bei verschiedenen Medien verschieden groß. Man bezeichnet diese Differenz als die *Dispersion* des Lichtes. Sie ist von dem Stoff abhängig, aus dem das Prisma besteht. In der folgenden Tabelle sind einige Dispersionswerte angegeben.

Brechungsverhältnisse und Dispersion einiger Medien

Medium	Rot (n_r)	Violett (n_v)	Dispersion ($n_v - n_r$)
Kronglas	1,51	1,53	0,02
Flintglas	1,73	1,81	0,08
Schwefelkohlenstoff	1,61	1,70	0,09

Die spektrale Zerlegbarkeit des Sonnenlichtes durch ein Prisma wurde Ende des 17. Jahrhunderts von dem englischen Physiker *Isaak Newton*[1] entdeckt.

2. Achromatisches und geradsichtiges Prisma. Setzt man zwei Prismen aus verschiedenen Stoffen und mit verschieden großen brechenden Winkeln zusammen, so kann man erreichen, daß zwar der weiße Lichtstrahl abgelenkt, die Farbenzerlegung aber nicht wirksam wird. Man braucht nur ein Kronglasprisma mit einem Flintglasprisma zusammenzufügen, dessen brechende Winkel in bestimmter Weise aufeinander abgestimmt sind, z. B. Kronglas 80°,

[1] Isaak Newton (1643–1727), Professor in Cambridge. Er ist einer der bedeutendsten Physiker und Mathematiker. Seine Forschungen erstreckten sich vorzugsweise auf die Optik und die Mechanik, aber auch auf die Mathematik. Er fand die Grundgesetze der Mechanik (vgl. LB 9, S. 64 u. ff.).

Flintglas 33°. Abbildung 88/1 zeigt den Strahlengang in einer solchen *Prismenkombination*. Man nennt eine Zusammenstellung dieser Art ein *achromatisches Prisma*.

Im Gegensatz hierzu gibt es Prismenkombinationen, durch die das Licht zwar in Spektralfarben zerlegt, aber nicht aus seiner Richtung abgelenkt wird. In Abb. 88/2 ist schematisch ein zweiteiliges *Geradsichtprisma* dargestellt, das aus einem Kronglasprisma und einem Flintglasprisma besteht. In *Handspektroskopen* (vgl. Abb. 118/1) verwendet man meist dreiteilige Geradsichtprismen, die aus zwei Kronglasprismen und einem Flintglasprisma zusammengesetzt sind. Noch wirksamer sind fünfteilige Geradsichtprismen, in denen drei Kronglasprismen mit zwei rechtwinkligen Flintglasprismen vereinigt sind. Man erhält ein Spektrum, ohne daß eine Ablenkung stattfindet.

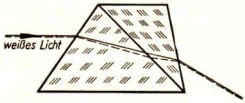


Abb. 88/1. Achromatisches Prisma
Es tritt insgesamt eine Ablenkung, aber keine Farbtrennung ein. Denn die spektral zerlegten Strahlen des Lichtbündels treten parallel aus und mischen sich zu einem weißen Lichtbündel.

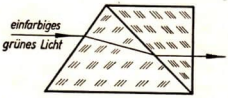
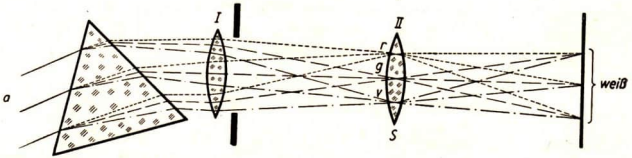


Abb. 88/2. Zweiteiliges Geradsichtprisma
Es ist nur für eine Farbe geradsichtig, alle anderen Farben werden abgelenkt.

3. Misch- und Ergänzungsfarben. Wir ändern den im 1. Abschnitt angegebenen Versuch dadurch ab, daß wir das Lichtbündel parallelstrahlig durch das Prisma hindurchtreten lassen. Durch eine dicht hinter das Prisma gestellte Linse *I* mit kurzer Brennweite werden die Strahlen bei *S* zu einem Spektrum gesammelt. Dicht hinter die Linse *I* stellen wir eine Irisblende. Bringt man an die Stelle *S* eine große Sammellinse *II*, so werden durch diese sämtliche Farben zu Weiß vereinigt. Auf dem Schirm entsteht ein weißes Bild der Irisblende (Abb. 88/3a).



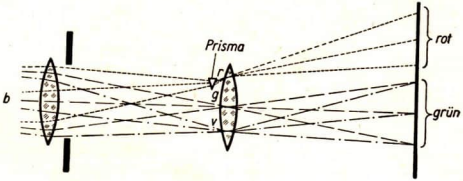


Abb. 88/3. Die spektrale Zerlegung des Lichtes
a) Die Spektralfarben werden durch die Linse *II* zu Weiß vereinigt.
b) Aus dem Spektrum einer weiß leuchtenden Lichtquelle wird durch ein kleines Prisma spektralreines Rot abgelenkt. Der Rest wird zur Mischfarbe Grün vereinigt.

Bringt man dicht vor der Linse *II* in den roten Teil des Spektrums ein schmales Prisma, so werden die roten Lichtstrahlen seitlich abgelenkt (Abb. 88/3b). Es entstehen auf dem Schirm zwei Bilder der Irisblende, ein rotes und ein grünes (siehe Spektraltafel). Die grüne Farbe ergibt sich aus der Mischung der nicht abgelenkten Spektralfarben.

Durch Aufziehen der Irisblende kann man die beiden farbigen Kreisbilder vergrößern, so daß sie sich schließlich zum Teil überschneiden. Dadurch werden beide Farben zu Weiß vereinigt. Man nennt deshalb die beiden Farben Rot und Grün *Ergänzungs-* oder *Komplementärfarben.* Blendet man nacheinander schmale Bereiche des Spektrums heraus, so findet man die in der nachstehenden Tabelle angegebenen Komplementärfarben:

Komplementärfarben der sechs Grundfarben

Ausgeblendete Farbe (Grundfarbe)	Rot	Orange	Gelb	Grün	Blau	Violett
Entstehende Mischfarbe	Grün	Violett	Blau	Rot	Gelb	Orange

Man erkennt aus dieser Zusammenstellung, daß jede in der Tabelle angegebene Farbe einmal als reine Spektralfarbe (obere Reihe) und einmal als Mischfarbe (untere Reihe) vorkommt.

4. Fragen:

1. Wie verhält sich weißes Licht beim Durchgang durch ein Prisma?
2. Weshalb erhält man kein Spektrum, wenn der zwischen der Lichtquelle und dem Prisma stehende Spalt zu breit ist?
3. Was versteht man unter einem achromatischen Prisma?
4. Wie ist das geradsichtige Prisma gebaut?
5. Was sind Misch- und Ergänzungsfarben?

§ 23. Linsen und Linsenbilder

1. Herstellung von Linsen. *Optische Linsen* sind durchsichtige, von zwei gewölbten Flächen begrenzte Glaskörper. Sie müssen bei der Herstellung frei von jeder Kristallbildung und ohne innere Spannung erstarren.

Die ersten in Deutschland hergestellten Linsen bestanden aus *Flintglas*, einer Schmelze von reinem Sand und Pottasche unter Zusatz von Bleinitrat. Durch diesen Zusatz wird das Brechungsvermögen wesentlich erhöht. Auch *Kronglas* wurde zur Herstellung von Linsen verwendet. Diese Glassorte besteht aus 70,4% reinem Sand, 10,3% Kalk und 19,3% Pottasche.

In der Deutschen Demokratischen Republik werden in den bekannten volkseigenen Glaswerken Schott und Genossen in Jena für optische Zwecke Gläser

hergestellt, die sehr günstige Brechungsverhältnisse aufweisen. Diese Gläser sind nicht ausschließlich Silikate, sondern enthalten auch Phosphate und Borate verschiedener Zusammensetzung. In den optischen Werken werden die spannungsfreien Glasstücke in Muffelöfen erweicht und in Formen gepreßt. Anschließend läßt man sie langsam abkühlen. Die erkalteten Rohlinge werden nochmals auf Spannungsfreiheit geprüft. Die in Ordnung befundenen Linsen werden sodann entweder von Hand oder maschinell geschliffen und schließlich poliert (Abb. 90/1).

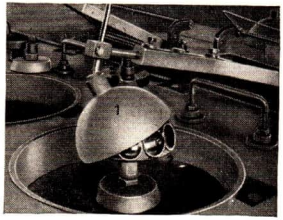


Abb. 90/1. Das Schleifen von Linsen
Die Linsen sind auf halbkugelförmige Tragkörper (2) gekittet. Sie sind von halbkugelförmigen Stahlschalen (1) überdeckt, deren Krümmungsradius dem der fertigen Linse entspricht, und werden durch mit Wasser verdünnten Schmirgel geschliffen und poliert.

2. Linsenformen. Man unterscheidet zwei Gruppen von Linsen:

1. die **Konvexlinsen.** Bei ihnen ist die Mitte dicker als der Rand.
2. die **Konkavlinsen.** Bei ihnen ist die Mitte dünner als der Rand.

Je nachdem wie die beiden Begrenzungsflächen beschaffen sind, unterscheidet man *Bikonvex-*, *Plankonvex-*, *Konkavkonvexlinsen* und *Bikonkav-*, *Plankonkav-* und *Konvexkonkavlinsen* (Abb. 90/2). Die durch die Mittelpunkte der begrenzenden Kugelflächen gehende Gerade heißt *optische Achse* der Linse. Den auf ihr liegenden Mittelpunkt des Linsenkörpers bezeichnet man als *optischen Mittelpunkt.*

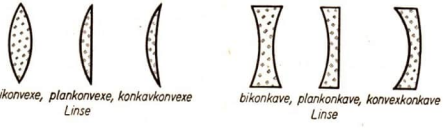


Abb. 90/2
Die wichtigsten Linsenformen

3. Konvexlinsen. Es ist uns von der Grundschule her bereits bekannt, daß achsenparallele Lichtstrahlen durch *Konvexlinsen* in einem Punkte, dem *Brennpunkt*, gesammelt werden. Man nennt diese Linsen daher auch *Sammellinsen.* Jede Konvexlinse hat zwei symmetrisch zum optischen Mittelpunkt gelegene Brennpunkte F und F'.

Wie bei den sphärischen Spiegeln unterscheidet man bei der Linse drei *Hauptstrahlen*, den *Mittelpunktsstrahl*, den *Brennpunktsstrahl* und den *Parallelstrahl* (vgl. LB 7, § 5, 2). Wie man mit Hilfe der Hauptstrahlen die Bildentstehung an einer Sammellinse zeichnerisch konstruiert, haben wir bereits auf der Grundschule kennengelernt (vgl. dazu LB 7, § 5, 3). Hier werden durch Abb. 91/1 die wichtigsten Fälle der Bildkonstruktion noch einmal wiedergegeben. Die in den Teilbildern a, b, c dargestellten Bildkonstruktionen beziehen sich auf reelle

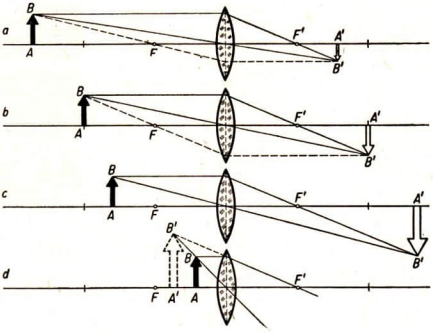


Abb. 91/1. Die Konstruktion von Linsenbildern
a) Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite
b) Gegenstand in der doppelten Brennweite
c) Gegenstand zwischen der doppelten und der einfachen Brennweite
d) Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite
F, F' Brennpunkte, $\overline{AB}$ Gegenstand, $\overline{A'B'}$ Bild

Bilder, Teilbild d gibt die Bildkonstruktion für ein virtuelles Bild wieder. Aus Abbildung **91/2** ist der Strahlengang bei der Entstehung eines virtuellen Bildes ersichtlich. Rückt der Gegenstand in den Brennpunkt der Linse, so werden die Lichtstrahlen durch die Linse so gebrochen, daß sie diese als Parallelstrahlen verlassen. Man erhält daher kein Bild.

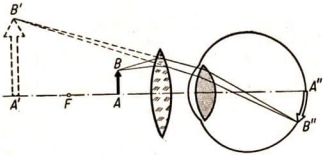


Abb. 91/2. Strahlengang beim Entstehen eines virtuellen Bildes an einer Sammellinse
F, F' Brennpunkte, $\overline{AB}$ Gegenstand, $\overline{A'B'}$ virtuelles Bild

4. Die Linsengleichung für eine Konvexlinse. Die Abbildung **91/3** zeigt schematisch den Verlauf des Mittelpunktsstrahles und des Parallelstrahles bei der Bildentstehung an einer Konvexlinse. Den Abstand des Gegenstandes von dem optischen Mittelpunkt der Linse, die *Gegenstandsweite*, bezeichnet man mit s, die Entfernung des Bildes von der Linse, die *Bildweite*, mit s' und den Abstand des Brennpunktes von der Linse, die *Brennweite*, mit f. Die *Gegenstandsgröße* ist $\overline{AB} = y$, die *Bildgröße* $\overline{A'B'} = y'$ (vgl. § 20, 3).

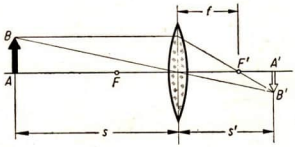


Abb. 91/3. Herleitung der Beziehung zwischen Gegenstandsgröße und Bildgröße
F und F' Brennpunkte, f Brennweite, $\overline{AB}$ Gegenstandsgröße, s Gegenstandsweite, $\overline{A'B'}$ Bildgröße, s' Bildweite

Den Mittelpunktsstrahl und die optische Achse kann man geome-

trisch als zwei Strahlen auffassen, die von zwei Parallelen, dem Gegenstand und dem Bild, geschnitten werden. Daher gilt die Proportion:

$$y : y' = s : s'.$$

Die Gegenstandsgröße verhält sich zur Bildgröße wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

Da man auch den aus der Linse austretenden Brennpunktsstrahl sowie die optische Achse geometrisch als Strahlen auffassen kann, die von zwei Parallelen geschnitten werden, gilt auch die Proportion

$$y : y' = f : (s' - f).$$

Aus beiden Gleichungen folgt:

$$\frac{s}{s'} = \frac{f}{s' - f}$$

oder

$$s s' - s f = s' f,$$

$$s' f + s f = s s'.$$

Dividiert man beide Seiten der Gleichung durch $s s' f$, so erhält man die *Linsengleichung für eine Konvexlinse*

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}.$$

Beispiel:

Durch eine Sammellinse wird von einem 80 cm von der Mittelebene der Linse entfernten Gegenstand auf einem 20 cm hinter der Linse stehenden Schirm ein Bild erzeugt. Hieraus ergibt sich die Brennweite nach der Gleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{80} + \frac{1}{20} = \frac{1}{80} + \frac{4}{80} = \frac{5}{80} = \frac{1}{16},$$

mithin

$$f = 16 \text{ cm}.$$

Die Zusammenhänge zwischen der Gegenstandsweite und der Bildweite sowie zwischen der Gegenstandsgröße und der Bildgröße sind in der auf der folgenden Seite stehenden Tabelle zusammengestellt.

5. Konkavlinsen (Zerstreuungslinsen). Durch *Konkavlinsen* werden achsenparallele Lichtstrahlen zerstreut; sie treten divergent aus der Linse aus (Abb. 92/1). Die Konkavlinsen nennt man wegen dieser Eigenschaft auch *Zerstreuungslinsen.* Die von der Linse gebrochenen Strahlen scheinen von einem Punkte F herzukommen, der auf derselben Seite der Linse liegt wie die ankommenden parallelen Lichtstrahlen. Der Punkt F heißt der *scheinbare Brennpunkt* oder der *Zerstreuungspunkt.* Man ordnet den Zerstreuungslinsen eine negative Brennweite zu. Jede Konkavlinse hat zwei symmetrisch zum optischen Mittelpunkt gelegene Zerstreuungspunkte F und F'.

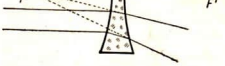


Abb. 92/1. Achsenparallele Lichtstrahlen werden durch eine Konkavlinse zerstreut.

Bildentstehung an einer Konvexlinse

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite $s > 2f$	**auf der anderen Seite der Linse zwischen einfacher und doppelter Brennweite** $f < s' < 2f$	**reell**	**umgekehrt**	**verkleinert** $y' < y$
in der doppelten Brennweite $s = 2f$	**auf der anderen Seite der Linse ebenfalls in der doppelten Brennweite** $s' = 2f$	**reell**	**umgekehrt**	**ebenso groß wie der Gegenstand** $y' = y$
zwischen der doppelten und einfachen Brennweite $2f > s > f$	**auf der anderen Seite der Linse außerhalb der doppelten Brennweite** $s' > 2f$	**reell**	**umgekehrt**	**vergrößert** $y' > y$
innerhalb der einfachen Brennweite $s < f$	**auf derselben Seite der Linse** $s' > s$	**virtuell**	**aufrecht**	**vergrößert** $y' > y$

An einer Zerstreuungslinse entstehen nur virtuelle Bilder. Diese liegen auf derselben Seite der Linse wie der Gegenstand. Sie sind verkleinert und stehen aufrecht.

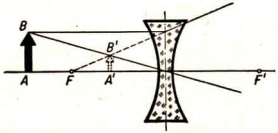


Abb. 93/1. Konstruktion eines virtuellen Bildes bei einer Zerstreuungslinse
F und F' Zerstreuungspunkte
$\overline{AB}$ Gegenstand, $\overline{A'B'}$ virtuelles Bild

Abb. 93/1 zeigt die Bildkonstruktion an einer Konkavlinse.

6. Brechkraft der Linsen und Linsensysteme. Eine Linse ist durch ihre Brennweite gekennzeichnet. Häufig gibt man jedoch nicht die Brennweite selbst an, sondern den reziproken Wert der in Metern gemessenen Brennweite. Man bezeichnet diesen Wert als die *Brechkraft der Linse* (Formelzeichen D).

$$D = \frac{1}{f}.$$

Die Einheit der Brechkraft ist die **Dioptrie** (dptr). So hat eine Linse mit einer Brennweite von 0,25 m eine Brechkraft von $\frac{1}{0{,}25}$ dptr = 4 dptr.

Die Brechkraft von Konvexlinsen ist positiv und die Brechkraft von Konkavlinsen negativ.

Zusammengesetzte Linsen wirken wie eine einfache Linse, deren Brechkraft gleich der Summe der Brechkräfte der einzelnen Linsen ist. Es gilt bei unmittelbarer Berührung der Linsen, wie hier ohne Beweis mitgeteilt wird, die Gleichung

$$D = D_1 + D_2.$$

Hierin sind D_1 und D_2 die Brechkräfte der einzelnen Linsen, D die Brechkraft der Linsenkombination (Abb. 94/1). Ersetzt man die Brechkräfte D, D_1 und D_2 durch die Brennweiten f, f_1 und f_2, so erhält man

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}.$$

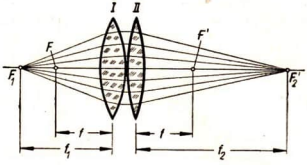


Abb. 94/1
Brennweite zusammengesetzter Linsen

F_1 Brennpunkt der Linse I, f_1 Brennweite der Linse I, F_2 Brennpunkt der Linse II, f_2 Brennweite der Linse II, F und F' Brennpunkte des Linsensystems, f Brennweite des Linsensystems

7. Fragen und Aufgaben:

1. Wie lautet die Linsengleichung?
2. Welche Folgerung kann man aus der Linsengleichung der Konvexlinsen hinsichtlich Ort und Art des Bildes ziehen?
3. Errechnen Sie die Brennweite einer Konvexlinse aus der Gegenstandsweite $s = 50$ cm und der zugehörigen Bildweite $s' = 150$ cm!
4. Ein leuchtender Körper soll durch eine Bikonvexlinse von 50 cm Brennweite in doppelter Größe abgebildet werden. In welcher Entfernung von der Linse muß er aufgestellt werden? Prüfen Sie das Ergebnis durch Zeichnung im Maßstab 1 : 10!
5. Was versteht man unter der Brechkraft einer Linse?
6. Wie groß ist die Brechkraft
   a) der in Aufgabe 3 gegebenen Linse,
   b) der im Rechenbeispiel des Abschnitts 4 verwandten Linse?
7. Ein Kondensor besteht aus zwei gleichen Plankonvexlinsen. Die Brennweiten beider Linsen seien gleich groß:
   $$f_1 = f_2.$$
   Wie groß ist die Brennweite f des Kondensorlinsensystems?

§ 24. Die Linsenfehler und ihre Beseitigung

1. Allgemeines über Linsenfehler. Bei der Abbildung von Gegenständen durch eine sphärische Linse weisen die entstehenden Bilder bisweilen Unschärfen und Abweichungen auf. Man bezeichnet diese Bildmängel in der Umgangssprache als *Linsenfehler*. Doch muß man beachten, daß sie nicht durch eine fehlerhafte Beschaffenheit der Linsen veranlaßt werden. Ihre Ursache ist darin zu suchen, daß die Linsengleichung nicht uneingeschränkt anwendbar ist (vgl. § 23,4). Sie gilt für eine Linse ohne Einschränkung nur, wenn es sich um eine dünne Linse mit kleinem Öffnungswinkel handelt, wenn ausschließlich achsennahe Strahlen einfarbigen Lichtes verwendet werden und wenn kleine, achsennahe Gegenstände abgebildet werden. Die Linsengleichung ist mithin nur eine Näherungsgleichung.

2. Die sphärische Aberration. Man läßt ein Bündel paralleler Lichtstrahlen, das man durch ein vorgesetztes Farbfilter einfarbig gemacht hat, auf eine Blende mit fünf waagerechten Spalten fallen. Hinter der Blende stellt man eine weiße Papptafel so auf, daß das aus der Blende austretende Licht an ihr entlangstreift. Hält man in den Strahlengang eine Linse mit kurzer Brennweite, so erkennt man, daß sich die *Strahlen nicht in einem Punkt schneiden.* Der Schnittpunkt der Randstrahlen liegt näher an der Linse als der Schnittpunkt achsennaher Strahlen (Abb. 95/1). Diese Abweichung von der Vereinigung aller Parallelstrahlen in einem Punkt der optischen Achse bezeichnet man als *sphärische Aberration.* Sie ist abhängig von der Brennweite der Linse. Verwendet man eine Linse mit langer Brennweite, so ist der Abbildungsfehler kleiner als bei einer Linse mit kurzer Brennweite (Abb. 95/2).

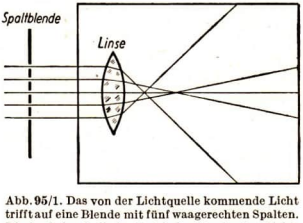


Abb. 95/1. Das von der Lichtquelle kommende Licht trifft auf eine Blende mit fünf waagerechten Spalten. Die fünf durch die Spalte hindurchtretenden Lichtstreifen zeigen auf der Scheibe den Strahlengang vor und hinter der Linse.

Will man einen Gegenstand scharf abbilden, so muß man dafür sorgen, daß die Randstrahlen abgeblendet werden. Das erreicht man dadurch, daß man dicht hinter die Linse in den Gang der Lichtstrahlen eine Irisblende stellt. Das Bild wird um so schärfer, je kleiner man den Durchmesser der Irisblende wählt. Allerdings wird das Bild dabei immer lichtschwächer.

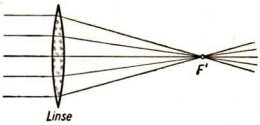


Abb. 95/2. Verlauf der Lichtstrahlen bei der Verwendung einer Linse mit langer Brennweite

3. Die chromatische Aberration. Wir erzeugen durch eine punktförmige, weiß strahlende Lichtquelle mittels einer Konvexlinse einen Lichtkegel, den wir wie bei dem in Abschnitt 2 angegebenen Versuch streifend auf einen weißen Pappschirm fallen lassen. Wir beobachten am Lichtkegel einen *violett gefärbten Kern* und eine *rötlich gefärbte Spitze.* Diese Färbung des Lichtkegels rührt daher, daß das auf die Linse auffallende weiße Licht spektral zerlegt wird, weil die einzelnen Farben verschieden stark gebrochen werden (Abb. 95/3). Man nennt diesen Abbildungsfehler *chromatische Aberration.*

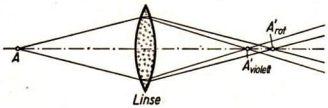


Abb. 95/3. Chromatische Aberration. Der violette Bestandteil des von der Lichtquelle A ausgehenden weißen Lichtes erzeugt den Bildpunkt $A'_{violett}$, der rote den weiter entfernten Bildpunkt A'_{rot}.

Man kann die chromatische Aberration noch deutlicher dadurch nachweisen, daß man in den Strahlengang einmal ein violettes Filter und dann ein rotes Filter einsetzt. Auf diese Weise erhält man zwei verschiedene Bildpunkte, und zwar liegt das mittels violetter

Lichtstrahlen erzeugte Bild der Lichtquelle näher an der Linse als das mittels der roten Strahlen erzeugte. Die Beseitigung dieses Mangels erreicht man durch Kombination einer *Sammellinse aus Kronglas* und einer *Zerstreuungslinse aus Flintglas*. Man bezeichnet diese *Linsenkombination* als einen *Achromat* (Abb. 96/1).

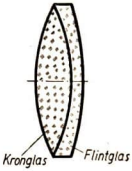


Abb. 96/1
Achromatische Linse

4. Bildfeldwölbung. Wir beleuchten eine Mattscheibe, auf die ein schwarzer zentraler Punkt und mehrere schwarze konzentrische Kreise aufgetragen sind, mit parallelem Licht. Durch eine Linse bilden wir die Mattscheibe auf einem weit entfernt stehenden Schirm so ab, daß ein Bild des vollen Kreises entsteht (Abb. 96/2). Nähert man den Schirm allmählich der Linse, so erscheinen nacheinander scharfe Bilder der einzelnen konzentrischen Kreise, von innen nach außen aufeinander folgend. Das Bild des in der Mitte liegenden vollen Kreises ist immer undeutlicher zu erkennen.

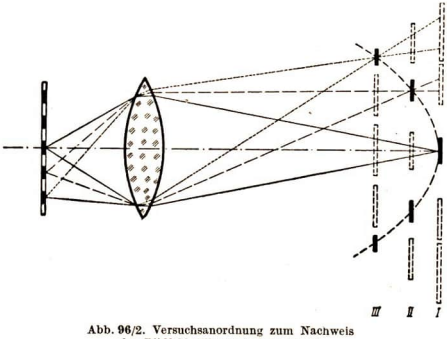


Abb. 96/2. Versuchsanordnung zum Nachweis der Bildfeldwölbung (schematisch)

Aus dem Versuch folgt, daß das mittels einer Linse erzeugte Bild eines ebenen Gegenstandes auf einer gewölbten Fläche liegt. Diesen Abbildungsfehler nennt man *Bildfeldwölbung*. Seine Beseitigung erfolgt durch eine von *Carl August Steinheil*[1] 1866 erfundene Linsenkombination von Konvex- und Konkavlinsen, die man als *Aplanat* bezeichnet.

5. Astigmatismus. Wir befestigen an einem Stativ eine in einem Linsenhalter gefaßte Bikonvexlinse mit einer Brennweite von etwa 200 mm drehbar vor einer punktförmigen Lichtquelle. Zuerst stellt man die Linse so auf, daß ihre optische Achse mit der der Lampe zusammenfällt. Durch eine Blende werden die Randstrahlen abgeblendet. Die senkrecht stehende Linse wird so weit längs der optischen Achse verschoben, bis die Lichtquelle auf einem etwa 2 m entfernt stehenden Schirm scharf abgebildet wird (Abb. 97/1a). Nunmehr neigt man die Linse um etwa 15° durch Drehung des Linsenhalters; man erhält dann kein scharfes Bild der Lichtquelle mehr. Verschiebt

[1] Carl August Steinheil (1801–1870), deutscher Astronom und Physiker. Er baute große Fernrohre für Sternwarten. Weiterhin schuf er Telegraphenanlagen in Deutschland, Österreich und in der Schweiz.

man den Bildschirm auf die Linse zu, so erscheint an einer bestimmten Stelle ein *langer, senkrecht stehender, scharf begrenzter Strich* (*II* in Abb. **97**/1). Dieser Strich ist im Grundriß nur als Punkt zu erkennen. Beim Näherrücken des Schirmes findet man weiter eine Stelle, an der ein *kurzer, waagerechter Strich* mit scharfen Rändern auf dem Schirm erscheint (*III* in Abb. **97**/1). Zwischen diesen Grenzen gibt es keine Stelle, an der eine scharfe Abbildung der Lichtquelle auf dem Schirm zu beobachten ist.

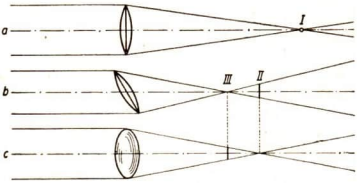


Abb. **97**/1. Versuchsanordnung zur Darstellung des Astigmatismus (schematisch)

a) Durchgang des Strahlenbündels durch eine zentrierte Linse: Lage des Bildes bei *I*
b) und c) Durchgang des Strahlenbündels durch eine geneigte Linse:
b) Aufriß, senkrechter Lichtstreifen bei *II*
c) Grundriß, waagerechter Lichtstreifen bei *III*

Die Ursache für diese Erscheinungen liegt in dem Umstand, daß die Lichtquelle infolge der Neigung der Linse weit außerhalb der optischen Achse der Linse liegt. Die Lichtquelle wird nicht mehr punktförmig, sondern verzerrt abgebildet. Am Zustandekommen des in Stellung *II* beobachteten vertikalen Lichtstreifens sind vorzugsweise Lichtstrahlen beteiligt, die in einer vertikal durch die Linse verlaufenden Ebene liegen. Der in Stellung *III* beobachtete waagerechte Strich entsteht vorwiegend durch Strahlen, die die Linse in einer waagerechten Ebene durchsetzen.

Man bezeichnet diesen Abbildungsfehler als *Astigmatismus*. Ersetzt man die Linse durch eine Linsenkombination, die von diesem Fehler frei ist, so erhält man bis zu einem Neigungswinkel von 45° scharfe Abbildungen der Lichtquelle. Derartige Linsenkombinationen nennt man *Anastigmate*.

6. Die Koma. Führt man den in Abschnitt 5 angegebenen Versuch unter Verwendung der Randstrahlen durch, so erhält man auf dem Schirm statt gerader, heller Striche mehr oder weniger *verschlungene Linien* (Abb. **97**/2). Man bezeichnet diese Erscheinung als *Koma*, weil die entstehenden Figuren eine gewisse Ähnlichkeit mit Kometschweifen haben. Die Koma wird durch Verkleinern der Blendenöffnung verringert.

Abb. **97**/2. Entstehung der Koma durch Randstrahlen bei schiefem Strahleneinfall

7. Korrigierte Linsensysteme. Die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Abbildungsfehler der Linse sind nicht Fehler, die auf den Schliff der Linse zurückzuführen sind. Seitdem optische Geräte gebaut werden, hat man daran gearbeitet, die Abbildungsfehler zu beseitigen. In Deutschland war

Josef Fraunhofer
(1787—1826)

Ernst Abbe (1840—1905)

es *Josef Fraunhofer*[1], der am Anfang des 19. Jahrhunderts diese Fehler durch Verwendung verschiedener Glassorten mit verschiedenen Brechungsverhältnissen und durch Linsenkombinationen zu beseitigen suchte. Es gelang ihm auf Grund von Versuchen, durch Kombination von Flint- und Kronglaslinsen die ersten lichtstarken achromatischen Linsensysteme herzustellen. Später schuf der Jenaer Physiker *Ernst Abbe*[2] die theoretischen Grundlagen für die Herstellung von Linsen. Zusammen mit *Otto Schott* entwickelte er neue Glassorten mit kleinen Brechungsverhältnissen, aber großem Zerstreuungsvermögen. Dadurch wurden die Grundlagen für den Bau hochwertiger Linsensysteme geschaffen, bei denen sämtliche Linsenfehler beseitigt sind.

Unsere *volkseigene optische Industrie*, in erster Linie das *Carl-Zeiss-Werk* in Jena und die *Rathenower Optischen Werke (ROW)*, hat in den vergangenen Jahren große Erfolge errungen. Es wurden lichtstarke Objektive für photographische Kameras und Mikroskope geschaffen, die wichtige Erzeugnisse für den Export darstellen. Die Abbildung 98/1 zeigt als Beispiel ein *Biotar*, das vom Carl-Zeiss-Werk hergestellt wird. Das Biotar ist ein lichtstarkes Objektiv, das sich besonders für Landschafts- und Porträtaufnahmen eignet. Für technische Aufnahmen ver-

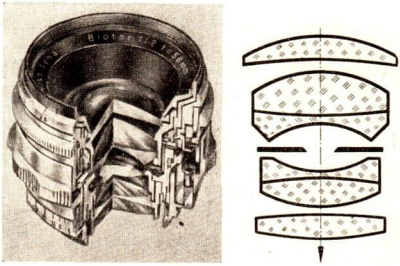


Abb. 98/1. Schnitt durch ein Biotar, daneben schematisch die Anordnung der Linsen

[1] Josef Fraunhofer (1787–1826) entwickelte sich durch Selbststudium vom Glasarbeiter zu einem der bedeutendsten Physiker seiner Zeit, der die Wissenschaft um eine große Zahl wichtiger Erkenntnisse erweiterte. Hinsichtlich der Verbesserung optischer Geräte erwies sich Fraunhofer als bahnbrechender Erfinder. 1823 wurde er Professor in München.

[2] Ernst Abbe (1840–1905), Professor der Physik in Jena, leitete jahrelang das Carl-Zeiss-Werk. Er war ein Wissenschaftler von überragender Bedeutung auf dem Gebiet der Optik.

wendet man meist ein *Tessar*. In Abbildung 99/1 ist schematisch die Anordnung der Linsen in einem Tessar wiedergegeben.

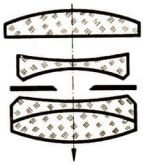


Abb. 99/1. Anordnung der Linsen in einem Tessar (schematisch)

Fällt auf eine Linse Licht, so wird ein Teil dieses Lichtes an der Oberfläche der Linse reflektiert, so daß nicht das gesamte auffallende Licht die Linse durchdringt. Infolgedessen bedeutet die Reflexion einen Lichtverlust. Um ihn weitgehend zu vermindern, entwickelten die im Carl-Zeiss-Werk tätigen Wissenschaftler und Arbeiter den *T-Belag*. Diesen Belag erhält man durch Aufdampfen einer hauchdünnen Schicht eines Stoffes mit geringerer Brechkraft, als sie das Glas der Linsen besitzt.

Gut korrigierte Linsensysteme werden auch bei Mikroskopen verwendet, damit man bei starker Vergrößerung einwandfreie Bilder erhält. So zeigt Abbildung 99/2 ein hochwertiges *Mikroskopobjektiv*.

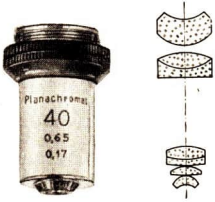


Abb. 99/2. Mikroskopobjektiv, daneben schematisch die Anordnung der Linsen

8. Fragen:

1. Auf welchen Ursachen beruht die sphärische Aberration einer Linse?
2. Auf welche Ursachen ist die chromatische Aberration einer Linse zurückzuführen?
3. Wie kommt die Bildwölbung zustande?
4. Was versteht man unter Astigmatismus? Erläutern Sie sein Entstehen!

§ 25. Der Sehvorgang im Auge

1. Das optische System des Auges. Ein in das *Auge* eintretender Lichtstrahl durchdringt die *Hornhaut*, die *vordere Augenkammer*, die *Kristallinse* und den *Glaskörper* (Abb. 99/3). Diese optisch wirksamen Teile des Auges sind von annähernd kugelförmigen Flächen begrenzt. Die Brechungsverhältnisse beim Übergang von einem zum anderen Medium sind verschieden groß. Insgesamt *wirken die brechenden Teile des Auges wie eine kombinierte Sammellinse*.

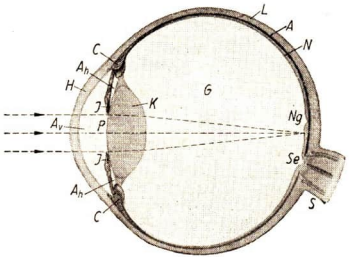


Abb. 99/3. Waagerechter Schnitt durch das rechte Auge. *L* Lederhaut, *H* durchsichtige Hornhaut, *A* Aderhaut, *I* Iris, *P* Pupille, *N* Netzhaut, *S* Sehnerv, *Se* Sehnervende, *Ng* Netzhautgrube, *K* Kristallinse, A_v und A_h vordere und hintere Augenkammer, *C* Ciliarmuskel, *G* Glaskörper

Diese erzeugt verkleinerte, umgekehrte und reelle Bilder auf der Netzhaut. Vor der Kristallinse befindet sich die *Regenbogenhaut*, die als selbsttätige Blende das Auge vor zu starkem Lichteinfall schützt.

2. Nahpunkt und Fernpunkt. — Die Akkommodation. Beim Auge ist die Bildweite unveränderlich. Daß man trotzdem Gegenstände in den verschiedensten Entfernungen deutlich sehen kann, beruht auf der Veränderlichkeit der Krümmung der Kristallinse. Man bezeichnet diese Anpassungsfähigkeit des Auges als *Akkommodation*. In der *Akkommodationsruhe* ist das Auge auf den *Fernpunkt* eingestellt. Man versteht darunter den am weitesten entfernten Punkt, in dem sich ein Gegenstand befindet, wenn ihn das Auge gerade noch scharf sieht. Der dem Auge am nächsten liegende Punkt, den die Augenlinse bei *stärkster Akkommodation* noch scharf abbildet, ist der *Nahpunkt*.

3. Korrektur des optischen Systems des Auges. Durch Verwendung von Linsen ist es den Menschen gelungen, das optische System des Auges zu korrigieren, wenn es mit Fehlern behaftet sein sollte. Diese Korrektur erfolgt durch *Brillen*. Bei *Weitsichtigen* entsteht das Bild eines nahen Gegenstandes hinter der Netzhaut. Sie tragen *Brillen mit konvexen Gläsern* (Abb. **100**/1 a). Bei *Kurzsichtigen* vereinigt die Augenlinse die von entfernten Gegenständen kommenden Lichtstrahlen schon vor der Netzhaut zu einem Bilde. Die Kurzsichtigen gleichen diesen Mangel durch *Brillen mit konkaven Gläsern* aus (Abb. **100**/1 b). Eine weitere Korrektur erfordert häufig der Astigmatismus, der durch einen Wölbungsfehler der Hornhaut oder der Linse verursacht wird. Dieser Mangel kann sowohl bei normalsichtigen wie bei kurz- und weitsichtigen Augen auftreten. Er läßt sich durch Brillengläser korrigieren, die zylindrisch geschliffen sind.

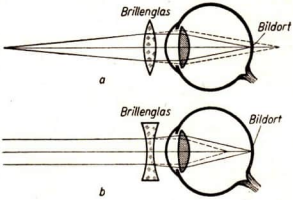


Abb. **100**/1. Ausgleich der Weit- und Kurzsichtigkeit durch Brillen (schematisch)

a) Strahlengang im weitsichtigen Auge beim Betrachten eines nahen Gegenstandes

b) Strahlengang im kurzsichtigen Auge beim Betrachten eines entfernten Gegenstandes

gestrichelte Linien: Strahlengang ohne Brillenglas
ausgezogene Linien: Strahlengang mit Brillenglas

4. Sehwinkel. Wie groß uns ein Gegenstand erscheint, hängt wesentlich von der Größe seines Netzhautbildes in unserem Auge ab. Dieses ist durch die Größe des *Sehwinkels* α bedingt (Abb. **100**/2).

Je größer ein betrachteter Gegenstand ist, desto größer ist bei gleicher Entfernung vom Auge der Sehwinkel, und je größer der Sehwinkel ist, desto größer ist auch das Netzhaut-

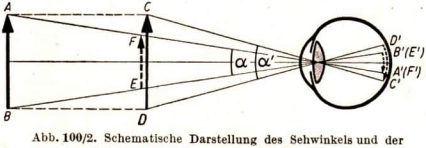


Abb. **100**/2. Schematische Darstellung des Sehwinkels und der absoluten Größe eines Gegenstandes. $\overline{AB}$, $\overline{EF}$, $\overline{CD}$ Gegenstände, $\overline{A'B'}$, $\overline{E'F'}$, $\overline{C'D'}$ Netzhautbilder, α, α' Sehwinkel

bild. Je mehr sich ein Gegenstand dem Auge des Beschauers nähert, um so größer wird der Sehwinkel. Je weiter sich der Gegenstand vom Auge entfernt, desto kleiner wird der Sehwinkel. Man kann infolgedessen nur dann auf die wahre Größe eines Gegenstandes schließen, wenn man seine Entfernung vom Auge kennt.

Bei einem normalen Auge muß ein Gegenstand mindestens einen Sehwinkel von 1′ haben, wenn er getrennt von seiner Umgebung wahrgenommen werden soll. Das Netzhautbild des Gegenstandes hat dann eine Ausdehnung von 0,0114 mm.

5. Das Augenmodell. Bei vielen Versuchen und beim Betrachten des Strahlenverlaufs in optischen Geräten für Fern- und Nahbeobachtung ist es zweckmäßig, auch den Verlauf der Lichtstrahlen im Auge zu verfolgen. Wir stellen zu diesem Zweck das Auge durch ein *Augenmodell* dar. Es besteht aus einer Sammellinse kurzer Brennweite und einer Mattscheibe als Netzhaut. Bei ihm erfolgt die Anpassung an die Gegenstandsweite nicht wie beim wirklichen Auge durch die Veränderung der Linsenkrümmung, sondern durch das Verschieben der Mattscheibe (Abb. **101**/1). In allen folgenden Abbildungen, in denen das Auge in die Darstellungen mit einbezogen wird, wird das Augenmodell nach Art von Abbildung **101**/2 schematisch wiedergegeben.

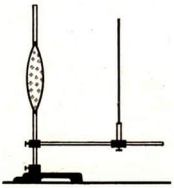


Abb. **101**/1. Augenmodell links die Sammellinse, rechts die verschiebbare Mattscheibe

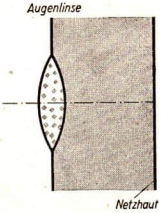


Abb. **101**/2 Schematische Zeichnung des Augenmodells

6. Fragen und Aufgaben:

1. Beschreiben Sie das optische System des Auges!
2. Was versteht man unter Akkommodation? Wie kommt sie zustande?
3. Wie verläuft der Strahlengang beim kurzsichtigen Auge? Wie verläuft er beim weitsichtigen Auge?
4. Wie korrigiert man kurzsichtige und weitsichtige Augenlinsen?
5. Warum scheinen Eisenbahnschienen in der Ferne zusammenzulaufen?
6. Warum können Kurzsichtige mit unbewaffnetem Auge Einzelheiten eines Bildes bisweilen besser erkennen als Normalsichtige?

VI. Optische Instrumente

§ 26. Geräte für Bildaufnahme und Bildwiedergabe

1. Die photographische Kamera. Man unterscheidet bei *photographischen Kameras* die *Plattenkamera* und die *Rollfilmkamera*. Eine besondere Ausführungsform der Rollfilmkamera ist die *Kleinbildkamera*. Der Bau der Platten- sowie der Rollfilmkamera ist bereits in LB 7, § 7 mit genügender Ausführlichkeit beschrieben worden. Im folgenden wird nur auf die Kleinbildkamera näher eingegangen. In LB 7 war als Beispiel eine *Praktika* der volkseigenen Kamerawerkstätten Dresden abgebildet. Hier wird die *Exakta Varex* des Ihagee Kamerawerkes Dresden wiedergegeben (Abb. **102**/1).

Abb. **102/1.** Moderne Kleinbildkamera Modell Exakta Varex des Ihagee Kamerawerkes, Dresden

Bei der Kleinbildkamera wird als Aufnahmematerial normaler *Kinofilm* mit einer Breite von 35 mm verwendet. Die Bildgröße selbst beträgt entweder 24 × 24 mm oder 24 × 36 mm. Die Bilder werden nachträglich vergrößert. Der Film ist im Gehäuse zwischen zwei Spulen ausgespannt und wird durch eine Platte an das *Bildfenster* gedrückt, so daß er sich in einer senkrecht zur optischen Achse des Objektivs stehenden Ebene befindet. Bei einer Kleinbildaufnahme kommt es ganz besonders darauf an, daß das Bild frei von Bildfehlern ist. Eine Kleinbildkamera wird deshalb immer mit einem *hochwertigen Objektiv* ausgestattet.

Beim Photographieren muß man die Möglichkeit haben, den Bildausschnitt zu beobachten, der auf dem Film entsteht. Aus diesem Grunde ist in die Kleinbildkamera entweder ein gut konstruierter *Sucher* oder eine *Spiegelreflexeinrichtung* eingebaut. Bei einfachen Suchern verlaufen die optischen Achsen des Objektivs und des Suchers parallel zueinander. Bei geringer Gegenstandsweite tritt infolgedessen eine Bildverschiebung zwischen dem Sucherbild und dem Filmbild auf. Man bezeichnet diese Bildabweichung als *Parallaxenfehler*. Unseren Wissenschaftlern ist es gelungen, eine Spiegelreflexeinrichtung zu entwickeln, bei der kein Parallaxenfehler auftritt (Abb. **103**/1). Die durch das *Objektiv* in die Kamera einfallenden Lichtstrahlen werden durch einen

unter 45° *geneigten Spiegel* auf eine *Mattscheibe* geworfen. Diese bildet die untere Begrenzungsfläche einer in dem sogenannten *Lichtschacht* befindlichen Plankonvexlinse, durch die man das Mattscheibenbild betrachtet. Die Entfernung Objektiv — Spiegel — Mattscheibe ist ebenso groß wie die Entfernung Objektiv — Film. Durch Verstellen des Objektivs erhält man ein Mattscheibenbild von der gleichen Schärfe wie das auf dem Film entstehende Negativbild. Betätigt man den Auslöseknopf des Verschlusses, so wird durch eine Feder zunächst der Spiegel gegen die Mattscheibe geklappt und dadurch das Gehäuse der Kamera lichtdicht abgeschlossen. Dann öffnet sich der Verschluß, so daß die Lichtstrahlen auf den Film fallen. Es entsteht auf ihm ein scharfes Bild.

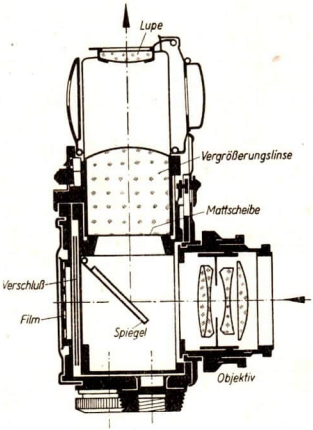


Abb. 103/1. Schnitt durch den Spiegelreflexsucher einer Exakta Varex

Das Mattscheibenbild steht zwar aufrecht, ist aber seitenverkehrt (Abb. 103/2). Man erhält ein seitenrichtiges Bild, wenn man an Stelle der *Plankonvexlinse* ein *Dachkantprisma* verwendet. Bei der Exakta Varex kann das Dachkantprisma nach Bedarf gegen die Plankonvexlinse ausgewechselt werden. Bei der *Contax S*, einer hochentwickelten Kleinbildkamera des volkseigenen Zeiss-Ikon-Werkes Dresden, ist das Dachkantprisma fest eingebaut (Abb. 103/3).

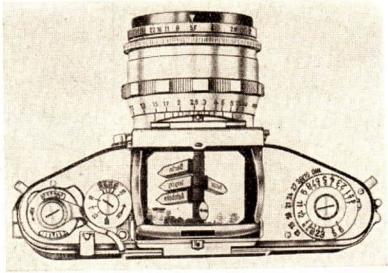


Abb. 103/2
Blick in den Lichtschacht der Exakta Varex

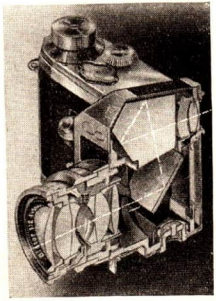


Abb. 103/3
Schnitt durch eine Contax S mit eingezeichnetem Strahlengang

Für besondere Zwecke sind Spezialobjektive geschaffen worden. So verwendet man Objektive mit langer Brennweite als *Teleobjektive* (Abb. **104**/1). Sie bilden Einzelheiten trotz großer Gegenstandsweite größer ab als Objektive mit kleiner Brennweite. Man verwendet Teleobjektive häufig für die Aufnahme von Tieren in freier Natur, da derartige Aufnahmen meist nur aus größerer Entfernung möglich sind.

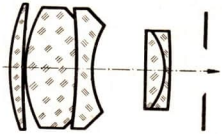


Abb. **104**/1. Zeiss-Teleobjektiv. Durch günstige Linsenanordnung ist trotz der langen Brennweite die Fassung verhältnismäßig kurz gehalten. Darunter schematisch die Anordnung der Linsen

2. Bildwerfer. Zur Projektion durchsichtiger Bilder verwendet man *Diaskope*. Das aus einer starken, punktförmigen Lichtquelle austretende Strahlenbündel wird durch den *Kondensor* schwach konvergent gemacht. Der Kondensor besteht in der Regel aus zwei plankonvexen Linsen, deren konvexe Begrenzungsflächen einander zugekehrt sind. Die Lichtquelle befindet sich etwa im Brennpunkt der ersten Kondensorlinse (Abb. **104**/2). Dicht hinter der zweiten Kondensorlinse befindet sich das Glasbild, das *Diapositiv*, das durch den Kondensor voll ausgeleuchtet wird. Die aus dem Glasbild austretenden Lichtstrahlen durchlaufen das Objektiv, das das Diapositiv auf einen Wandschirm abbildet.

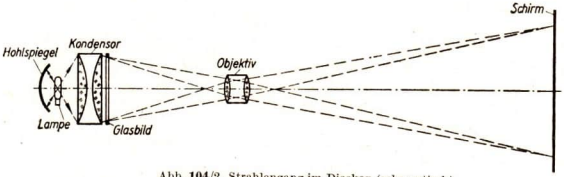


Abb. **104**/2. Strahlengang im Diaskop (schematisch)
Der Einfachheit halber sind nur die Randstrahlen gezeichnet.

Als Lichtquelle für Diaskope verwendet man heute vorwiegend *röhrenförmige Spezialglühlampen* (Abb. **104**/3). Die Röhrenform ist gewählt worden, damit man die Lampe dem Kondensor stark nähern kann, da der Kondensor eine sehr kurze Brennweite hat. Hinter der Lampe ist ein Hohlspiegel so

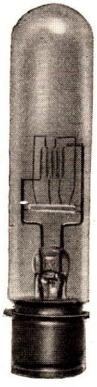


Abb. **104**/3. Röhrenförmige Spezialglühlampe

Die Röhrenform ermöglicht es, mit der Lichtquelle dicht an den Kondensor heranzurücken, so daß ein großer Teil der Lichtstrahlen ausgenutzt wird.

aufgestellt, daß das von ihm erzeugte Bild der Lichtquelle mit dieser zusammenfällt. Der Spiegel wirkt als *Reflektor* und verstärkt auf diese Weise die Lichtausbeute.

Abbildung **105**/1 zeigt einen sehr lichtstarken *Kleinbildwerfer*, der erst in jüngster Zeit von dem volkseigenen Werk Optik Carl Zeiss Jena entwickelt worden ist. Sowohl das Objektiv als auch der Kondensor bestehen aus je einer Linsenkombination.

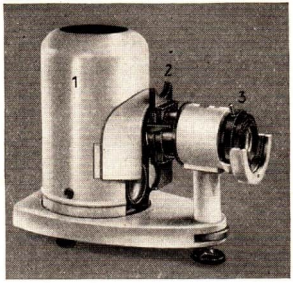


Abb. **105**/1. Kleinbildwerfer des Carl-Zeiss-Werkes Jena in der Gesamtansicht Leistungsaufnahme 375 Watt
1 Lampengehäuse, *2* Fallschacht für Diapositive, *3* Objektiv

Will man undurchsichtige Gegenstände projizieren, so verwendet man ein *Episkop*. Bei diesem wird der Gegenstand, zum Beispiel die Seite eines Buches, mit Hilfe einer starken Lichtquelle beleuchtet. Als Kondensor wird nur eine Linse verwendet, die das aus der Lichtquelle austretende Licht zu einem nahezu parallelen Strahlenbündel sammelt, so daß die gesamte Bildfläche des zu projizierenden Gegenstandes gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Doch gibt es auch Geräte, bei denen an Stelle des Kondensors ein oder zwei Hohlspiegel verwendet werden (Abb. **105**/2). Ein Teil des von dem Gegenstand reflektierten Lichtes wird mittels eines Spiegels so abgelenkt, daß es in das Objektiv gelangt. Die entstehenden Bilder sind gegenüber den vom Diaskop erzeugten Bildern wesentlich lichtschwächer. Dies liegt daran, daß nur ein geringer Teil des von dem Gegenstand reflektierten Lichtes in das Objektiv gelangt und somit für die Bildentstehung ausgenutzt werden kann.

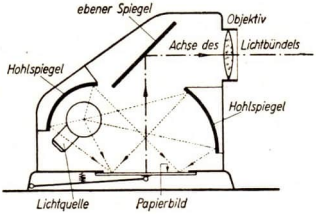


Abb. **105**/2. Schnitt durch ein Hohlspiegelepiskop mit eingezeichnetem Strahlengang (stark schematisiert) Das zu projizierende Papierbild wird durch einen federnden Tisch von unten gegen eine im Bodenausschnitt befindliche Glasplatte angedrückt.

3. Filmaufnahme- und Filmvorführgeräte. Werden von einem Bewegungsvorgang auf einem Film mehrere Aufnahmen gemacht, so erhält man Reihenbilder. Zum Herstellen derartiger Reihenbilder werden besondere Aufnahmegeräte verwendet, die man *Kinokameras* nennt. Bei ihnen wird in Verbindung mit einem Motor oder einem Uhrwerk der Film ruckartig an dem Bildfenster vorbeibewegt. Jedesmal wenn sich der Film gerade in Ruhe befindet, wird der Verschluß geöffnet und das vor dem Bildfenster befindliche Stück des Filmes belichtet. Sobald der Verschluß wieder geschlossen ist, rückt der Film um eine Bildbreite weiter.

Bildaufnahmegeräte werden gebaut für Filmbreiten von 8 mm, 16 mm und 35 mm. Abbildung **106**/1 zeigt ein Aufnahmegerät für eine Negativbreite von 35 mm.

Zur Vorführung von Reihenbildern sind Geräte entwickelt worden, die in ihrem Aufbau den Diaskopen ähneln. An Stelle des Glasbildes wird ein Diapositivfilm ruckweise am Bildfenster vorbeibewegt. Während der Bewegung des Filmes wird der Lichtstrahl abgeblendet. Der Strahlengang in einem *Kinoprojektor* ist in Abb. **106**/2 schematisch dargestellt.

Abb. **106**/3 zeigt eine von dem volkseigenen Zeiss-Ikon-Werk in Dresden hergestellte *Theatermaschine*, die in Lichtspielhäusern fest eingebaut wird. Bei derartigen Vorführgeräten verwendet man als Lichtquelle eine Bogenlampe, um auch bei großer Bildgröße ein lichtstarkes Bild zu erhalten. Bei transportablen Kinogeräten sind wie in Diaskopen Spezialglühlampen in Gebrauch.

Normalerweise erfolgen bei Filmaufnahmen 24 Aufnahmen je Sekunde. Bei der Vorführung wird der Film mit

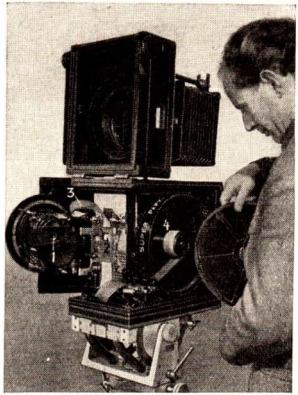


Abb. **106**/1. Aufnahmegerät für Reihenbilder
1 Objektiv, *2* Aufnahmefenster, *3* Filmband, *4* Aufwickelkassette

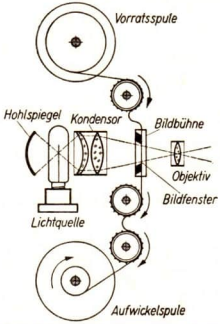


Abb. **106**/2. Schematische Darstellung des Strahlenganges und Filmlaufes in einem Kinoprojektor

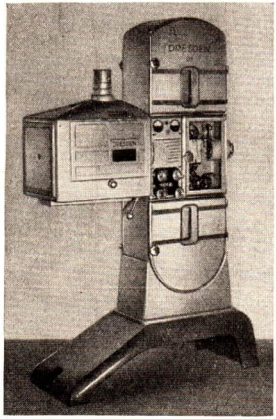


Abb. **106**/3. Theatermaschine, hergestellt vom volkseigenen Zeiss-Ikon-Werk in Dresden

der gleichen Geschwindigkeit wie bei der Aufnahme bewegt. Werden jedoch von einem Bewegungsvorgang in einer Sekunde beispielsweise 240 Aufnahmen gemacht und diese dann in 10 Sekunden vorgeführt, so werden die in Wirklichkeit sehr rasch verlaufenden Vorgänge stark verlangsamt. Man bezeichnet derartige Aufnahmen als *Zeitdehnungsaufnahmen* oder im übertragenen Sinne als *Zeitlupenaufnahmen*. Diese verwendet man beim Sport, bei medizinischen Untersuchungen u. ä., wenn man schnell ablaufende Vorgänge genau verfolgen will. Macht man dagegen beispielsweise 24 Aufnahmen im Abstand von je einer Stunde und führt sie dann in einer Sekunde vor, so kann man sehr langsam ablaufende Vorgänge beschleunigen. Auf diese Weise läßt sich beispielsweise das Aufblühen einer Blume deutlich zeigen. Man spricht in diesem Falle von *Zeitrafferaufnahmen*.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Schildern Sie den Strahlengang in einer Spiegelreflexkamera!
2. Welche Bedeutung hat die Blende im photographischen Apparat?
3. Beschreiben Sie den Strahlengang in einem Diaskop und in einem Episkop!
4. Warum kann man beim Episkop die einfache Kondensorlinse durch einen Hohlspiegel ersetzen?
5. Warum müssen die beim Episkop benutzten Spiegel auf der Oberfläche versilbert sein?
6. Ein Diapositiv mit einer Größe von 8,5 × 10 cm soll, auf 8 m Entfernung projiziert, eine Schirmbildbreite von 2 m ergeben. Welche Brennweite muß das Objektiv besitzen?
7. Welche Brennweite muß das Objektiv des Episkopes besitzen, wenn es auf dieselbe Entfernung wie in Aufgabe 6 ein 16 × 16 cm großes Bild auf die gleiche Schirmbreite von 2 m abbilden soll?

§ 27. Optische Geräte zur Nahbeobachtung

1. Die Lupe. Wenn man Einzelheiten eines Gegenstandes genau erkennen will, bringt man ihn möglichst nahe an das Auge heran. Hierdurch wird der Sehwinkel und damit das Netzhautbild vergrößert (vgl. § 25, 2 u. 4). Reicht diese Vergrößerung des Sehwinkels nicht aus, so benutzt man eine Konvexlinse als *Lupe*. Man hält sie so zwischen den Gegenstand und das Auge, daß sich der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite der Lupe befindet. Auf diese Weise erhält man ein virtuelles, aufrechtes, vergrößertes Bild des Gegenstandes. Abb. 107/1 zeigt schematisch den Strahlengang an einer Lupe. Statt des Auges wird

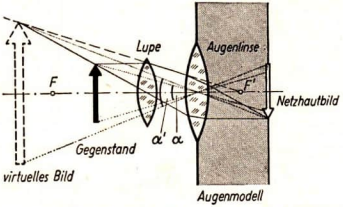


Abb. 107/1. Veranschaulichung der Lupenwirkung

Die Lupe bildet den innerhalb ihrer Brennweite befindlichen kleinen Gegenstand virtuell, vergrößert und aufrecht im Nahpunkt ab. Der Sehwinkel α wird auf den Winkel α' vergrößert.

in der Zeichnung das Augenmodell wiedergegeben. Durch die Lupe wird der Sehwinkel α auf den Winkel α' vergrößert.

2. Das monokulare Mikroskop. Ist die Vergrößerung einer Lupe nicht ausreichend, so betrachtet man den Gegenstand durch ein *Mikroskop*. Das optische System des Mikroskops besteht aus einem *Objektiv* und einem *Okular*. Das Objektiv ist ein Linsensystem mit kleiner Brennweite (vgl. Abb. **99**/2), das als Sammellinse wirkt und ein reelles, vergrößertes Bild des Gegenstandes erzeugt (Abb. **108**/1). Dieses Bild entsteht innerhalb der einfachen Brennweite des Okulars, das als Lupe wirkt. Das Auge sieht ein stark vergrößertes, virtuelles Bild des Gegenstandes. Infolge der kurzen Brennweite des Objektivs muß das Objekt sehr nahe an das Objektiv herangebracht werden. Dadurch wird gleichzeitig erreicht, daß ein großer Teil des vom Objekt ausgehenden Lichtes in das Objektiv gelangt und ein helles Bild entsteht.

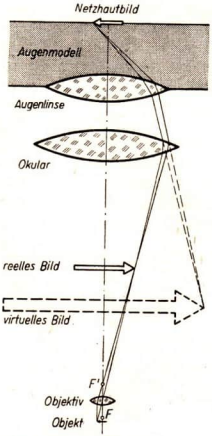


Abb. 108/1. Veranschaulichung des Strahlenganges im Mikroskop (schematisch). Das Bild ist nicht maßgetreu gezeichnet.
F und *F'* Brennpunkte des Objektivs

Beim Mikroskop sind das Objektiv und das Okular fest in einem *Tubus* vereinigt. Dies hat zur Voraussetzung, daß das reelle Bild des Objektes immer an derselben Stelle entsteht. Durch diese Anordnung wird erreicht, daß die Vergrößerung immer unverändert bleibt. Die Scharfeinstellung des Bildes wird dadurch vorgenommen, daß der ganze Tubus verschoben wird. Der Tubus ist zu diesem Zwecke mit einem Schraubentrieb ausgestattet, der mit einer Feineinstellung versehen ist. Auf diese Weise wird die zur konstanten Bildweite gehörige Gegenstandsweite eingestellt.

In leistungsfähigen Mikroskopen wird zum Vergrößern des Gesichtsfeldes das aus zwei Plankonvexlinsen zusammengesetzte *Huygenssche Doppelokular* verwendet (Abb. **108**/2). Die von dem Objektiv herkommenden Lichtstrahlen werden vor ihrer Vereinigung zu dem Bild $\overline{A'B'}$ von der ersten Linse des Okulars, der *Feldlinse*, so in ihrer Richtung geändert, daß das Bild $\overline{A''B''}$ entsteht. Dieses Bild wird durch die zweite Linse, die *Hauptlinse*, betrachtet. Das Auge sieht das stark vergrößerte, virtuelle Bild $\overline{A'''B'''}$.

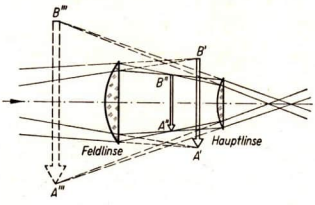


Abb. 108/2. Huygenssches Doppelokular
Die Feldlinse lenkt die nach $\overline{A'B'}$ gerichteten Strahlen so ab, daß das Bild $\overline{A''B''}$ entsteht. Durch die Hauptlinse sieht man das stark vergrößerte Bild $\overline{A'''B'''}$.

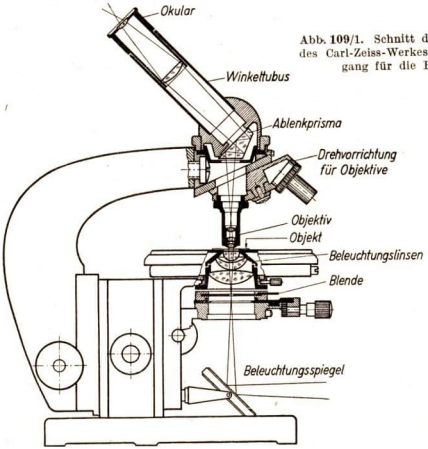


Abb. **109/1.** Schnitt durch das monokulare Mikroskop des Carl-Zeiss-Werkes mit eingezeichnetem Strahlengang für die Begrenzung des Sehfeldes

Abb. **109/2.** Ablenkprisma eines Mikroskopes mit Winkeltubus

Die Abbildung **109/1** zeigt den Schnitt durch ein *monokulares Mikroskop*, das von dem Carl-Zeiss-Werk entwickelt worden ist (vgl. LB 7, § 10,2, Abb. **71**). Es besitzt einen *gewinkelten Tubus*, der das Beobachten im Sitzen ermöglicht und dadurch die Arbeit wesentlich erleichtert. In dem in dem Tubus eingebauten kugeligen Gehäuse befindet sich ein *Ablenkprisma*, von dessen geschliffenen Flächen das Lichtbündel in den schräg gestellten Tubus geworfen wird (Abb. **109/2**).

3. Moderne Mikroskope für Wissenschaft und Technik. Eine weitere Entwicklung stellt das *binokulare Mikroskop* dar, das insbesondere für Forschungsarbeiten verwendet wird (Abb. **109/3**). Es ist mit einer Aufteilungsvorrichtung ausgestattet, die hinter das Ablenkprisma in den Strahlengang eingefügt ist. Diese Vorrichtung besteht aus zwei Aufteilungsprismen, von denen das eine eine halbdurchlässige, spiegelnde Fläche enthält. Dadurch wird das Lichtbündel in zwei getrennte Strahlenbündel zerlegt, die die beiden Tuben parallel durchlaufen (Abb. **110/1**). Es entstehen zwei getrennte, gleich große Bilder, die gesondert durch Okulare betrachtet werden.

Abb. **109/3.** Binokulares Forschungsmikroskop des Carl-Zeiss-Werkes Jena VEB, Typ Lu Wd E

Mittels einer besonderen Drehvorrichtung, des *Revolvers*, kann man die Objektive auswechseln und dadurch verschiedene Vergrößerungen einstellen.

Man untersucht durchsichtige Gegenstände wie dünne Membranen, dünne Flüssigkeitsschichten oder Dünnschliffe fester Körper im durchfallenden Licht. Zu diesem Zweck wird das von einer seitlich stehenden Lichtquelle kommende Licht durch einen Spiegel in die Richtung der optischen Achse gelenkt. Es durchläuft einen unter dem Objekttisch angebrachten Kondensor, durchdringt das Objekt und gelangt in das Objektiv.

Die Untersuchung der Oberfläche undurchsichtiger Körper, beispielsweise geschliffener oder polierter Metallflächen, nimmt man im auffallenden Licht vor. Der von einer starken Lichtquelle herkommende Lichtstrahl fällt auf eine in den Tubus eingebaute Glasplatte. Diese bildet mit der optischen Achse einen Winkel von 45° und lenkt das Licht parallel zur optischen Achse ab, so daß es durch das Objektiv hindurchgeht und auf das Objekt trifft. Von diesem wird das Licht wieder reflektiert und gelangt durch das Objektiv in das Okular (Abb. **110/2**).

Abbildung **110/3** zeigt das große vom Carl-Zeiss-Werk entwickelte *Metallmikroskop Neophot*. Dieses Mikroskop ist zur Durchführung photographischer Aufnahmen mit einer Kamera ausgestattet. Sein optischer Aufbau

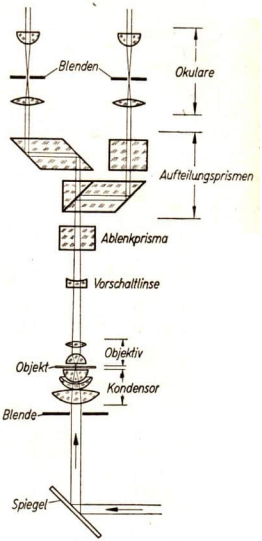


Abb. 110/1
Strahlenverlauf in einem binokularen Mikroskop (stark schematisiert)

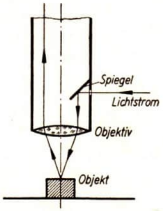


Abb. **110/2**. Senkrechte Auflichtbeleuchtung (schematisch). Im Tubus des Mikroskops befindet sich eine unter 45° geneigte Glasplatte, auf die der Lichtstrom der Lichtquelle aus seitlicher Richtung auftrifft.

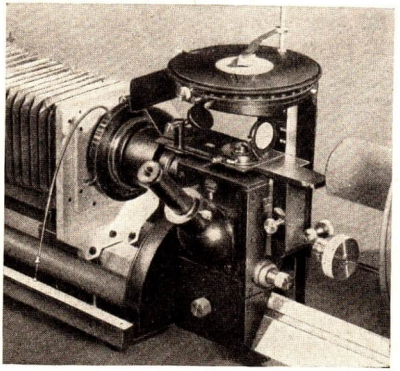


Abb. **110/3**. Großes Metallmikroskop des Carl-Zeiss-Werkes, Jena. Die Lichtquelle, das monokulare Mikroskop und die lange Balgenkamera mit Spiegelreflexeinrichtung sind voneinander getrennt auf der optischen Bank angeordnet.

ist der gleiche wie bei den oben beschriebenen Mikroskopen. Die Aufnahmen erfolgen im reflektierten Licht.

Für Präzisionsmessungen von Ganghöhen, Flankenwinkeln, Längen, Dicken wird das *Universal-Meßmikroskop* verwendet (Abb. **111**/1). Der Meßfehler beträgt bei Längenmessungen $\pm 1\,\mu$, bei Winkelmessungen $\pm 1'$.

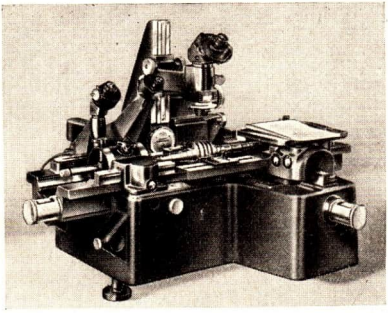


Abb. **111**/1. Universal-Meßmikroskop des Carl-Zeiss-Werkes

Das binokulare Mikroskop, das Metallmikroskop und das Universal-Meßmikroskop, das mit dem Gütezeichen I ausgezeichnet worden ist, sind Beispiele für die Präzisionsarbeit der Ingenieure und Arbeiter in unserer volkseigenen optischen und feinmechanischen Industrie. Diese Geräte helfen unseren Wissenschaftlern, neue Erkenntnisse zu gewinnen. Sie haben aber auch eine große Bedeutung für den Export.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Beschreiben Sie den Strahlengang an einer als Lupe verwendeten Konvexlinse!
2. Bestimmen Sie die Vergrößerung einer Lupe, indem Sie diese vor ein in der deutlichen Sehweite liegendes Millimeterpapier halten und die Breite eines in der Lupe sichtbaren Streifens mit der Millimeterteilung vergleichen! Die Vergrößerung ist dann das Verhältnis der beiden Meßwerte.
3. Beschreiben Sie den Strahlengang in einem monokularen Mikroskop!
4. Beschreiben Sie den Strahlengang in einem binokularen Mikroskop!
5. Wie kann man die Oberfläche undurchsichtiger Körper mikroskopisch untersuchen?
6. Welche Bedeutung kommt dem Huygensschen Doppelokular zu? Wie verläuft in ihm der Strahlengang?

§ 28. Optische Geräte zur Fernbeobachtung

1. Das Keplersche Fernrohr. Der optische Teil der *Fernrohre* besteht wie bei den Mikroskopen aus einem Objektiv und einem Okular. Das Objektiv ist ein Linsensystem, das als Sammellinse mit großer Brennweite wirkt. Es entwirft ein reelles, umgekehrtes und verkleinertes Bild dicht hinter dem Objektivbrennpunkt. Man betrachtet dieses Bild durch das Okular, eine als Lupe wirkende Konvexlinse, und erhält ein reelles Bild auf der Netzhaut des Auges

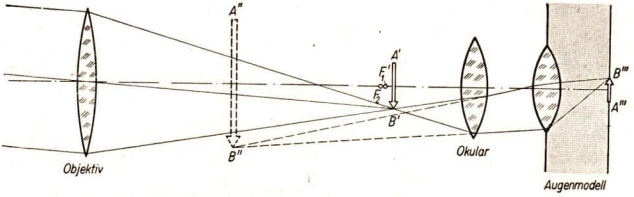


Abb. 112/1. Strahlengang in einem Keplerschen Fernrohr
F_1' Brennpunkt des Objektivs, F_2 Brennpunkt des Okulars, $\overline{A'B'}$ reelles Zwischenbild, $\overline{A''B''}$ virtuelles Bild, $\overline{A'''B'''}$ Netzhautbild

(Abb. 112/1). Objektiv und Okular sind miteinander durch einen Tubus verbunden. Sie liegen so zueinander, daß der Brennpunkt des Objektivs fast mit dem Brennpunkt des Okulars zusammenfällt. *Die Tubuslänge des Keplerschen Fernrohrs ist somit annähernd gleich der Summe der Brennweiten des Objektivs und des Okulars:*

$$l \approx f_1 + f_2.$$

Bei den Fernrohren der oben beschriebenen Art entstehen umgekehrte und seitenvertauschte Bilder. Man gebraucht sie aus diesem Grunde ausschließlich für astronomische Beobachtungen und bei wissenschaftlichen Messungen, da bei diesen Verwendungszwecken die Bildumkehr nicht von Bedeutung ist. Die Konstruktion derartiger Fernrohre wurde im Jahre 1611 von dem deutschen Astronom *Johannes Kepler*[1] angegeben. Man nennt sie infolgedessen *astronomische* oder *Keplersche Fernrohre.* Das Fernrohr hat ein großes Gesichtsfeld und rückt das Objekt dem Beobachter scheinbar näher. Die Entfernung der Fixsterne von der Erde ist aber so groß, daß auch bei den stärksten Fernrohren der Sehwinkel unter 1′ bleibt. Man sieht infolgedessen auch im Fernrohr die Fixsterne nur als Lichtpunkte. Einzelheiten sind nicht zu erkennen. Man erreicht durch das Fernrohr nur eine Verstärkung der Bildhelligkeit. Aus diesem Grunde sieht man bei der Beobachtung mit dem Fernrohr noch Sterne, die mit bloßem Auge nicht erkennbar sind. Mit Hilfe des Fernrohres wird außerdem der Sehwinkel, unter dem man zwei Sterne sieht, vergrößert, so daß die Sternabstände scheinbar größer werden.

Johannes Kepler (1571—1630)

[1] Johannes Kepler (1571–1630), geb. in Magstatt, einem Dorfe bei Weil in Württemberg, von 1600 bis 1612 Mathematiker und Astronom in Prag, der bedeutendste deutsche Astronom des 17. Jahrhunderts. Aus seinen Beobachtungen, Messungen und Berechnungen der Planetenbahnen fand er die nach ihm benannten Keplerschen Gesetze.

Abb. **113**/1 zeigt ein modernes Fernrohr, das im Carl-Zeiss-Werk hergestellt und an die Sternwarte in Stalingrad geliefert wurde.

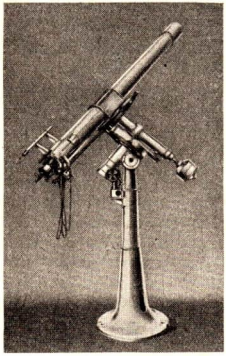


Abb. **113**/1. Fernrohr für die Sternwarte in Stalingrad, hergestellt von dem volkseigenen Carl-Zeiss-Werk in Jena

2. Das Holländische oder Galileische Fernrohr. Das im Jahre 1608 von dem holländischen Brillenschleifer *Lippershey* geschaffene und bald darauf von dem italienischen Physiker und Astronom *Galileo Galilei*[1] nacherfundene *Holländische* oder *Galileische Fernrohr* liefert aufrechte Bilder und ist daher auch für Beobachtungen auf der Erde geeignet (Abb. **113**/2). Beim Galileischen Fernrohr ist das Okular eine Zerstreuungslinse. Sie ist in den Strahlengang noch vor den Brennpunkt des Objektivs gestellt, so daß sie sich innerhalb der einfachen Brennweite des Objektivs befindet. Infolgedessen entsteht kein reelles, sondern ein virtuelles Bild des entfernten Objekts. Die Lichtstrahlen treten divergent aus dem Okular aus, so daß das Netzhautbild die gleiche Lage hat wie bei der Beobachtung ohne Fernrohr. Wir sehen daher den Gegenstand aufrecht. Die Vergrößerung ist jedoch gering und das Gesichtsfeld klein. *Die Länge des Galileischen Fernrohres ist annähernd gleich der Differenz der Brennweiten von Objektiv und Okular:*

$$l \approx f_1 - f_2 .$$

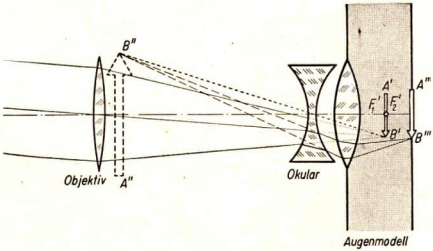


Abb. **113**/2. Strahlengang in einem Galileischen Fernrohr

F_1' Brennpunkt des Objektivs, F_2' Brennpunkt des Okulars, $A'B'$ reelles Bild, $A''B''$ virtuelles Bild, $A'''B'''$ Netzhautbild

3. Prismenfernrohre. Im Jahre 1893 wurde in Jena auf Grund der Arbeiten von *Ernst Abbe* ein brauchbares Fernrohr für Erdbeobachtungen geschaffen, das sich durch Handlichkeit, starke Vergrößerungen und große Bildhelligkeit auszeichnet. Es gleicht in seinem optischen Aufbau dem astronomischen Fernrohr. Die Umkehrung des Bildes wird durch zwei

[1] Galileo Galilei (1564–1642), geb. in Pisa in Italien, Professor in Pisa und in Padua. Er gilt als der Begründer der wissenschaftlichen Physik und machte eine Reihe wichtiger astronomischer Entdeckungen (vgl. auch LB 9, S. 58).

totalreflektierende Prismen bewirkt. Man bezeichnet daher solche Fernrohre als *Prismenfernrohre.*

Die durch das Objektiv hindurchgegangenen Lichtstrahlen werden an den Kathetenflächen des ersten Prismas total reflektiert. Die Richtung der Lichtstrahlen wird um 180° geändert. An den Kathetenflächen des zweiten Prismas erfahren die Lichtstrahlen nochmals eine Richtungsänderung um 180°. Sie verlaufen somit wieder in ihrer ursprünglichen Richtung, wenn sie in das Okular gelangen (Abb. **114**/1). Das erste Prisma bewirkt eine Vertauschung von oben und unten, das zweite Prisma eine Vertauschung von rechts und links. Man sieht infolgedessen durch das Okular ein aufrecht stehendes und seitenrichtiges Bild. Infolge mehrfacher Knickung des Strahlenganges ist die Länge eines Prismenfernrohrs verhältnismäßig kurz.

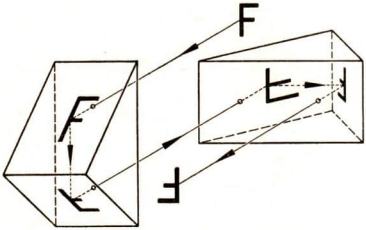


Abb. 114/1. Bildumkehrung durch totalreflektierende Prismen
Die Pfeile bezeichnen den Einfall des Lichtes. Statt eines Bündels von Parallelstrahlen ist nur ein einziger Strahl gezeichnet.

Bei den *Prismenfeldstechern* sind zwei gleichartig gebaute Fernrohre zu einem Gerät vereinigt. Dadurch ist es möglich, mit beiden Augen gleichzeitig zu beobachten. Der Abstand der beiden Okulare ist gleich dem Augenabstand, während der Abstand der Objektive infolge der eingebauten Prismen größer ist. Somit werden die Gegenstände unter einem vergrößerten Augenabstand beobachtet, so daß das räumliche Sehen unterstützt wird.

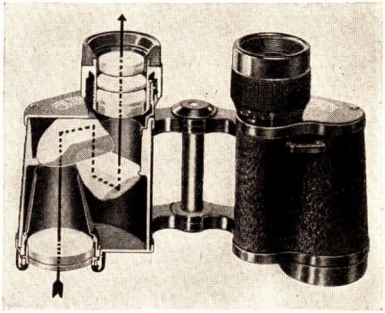


Abb. 114/2. Schnitt durch einen Prismenfeldstecher

Abb. **114**/2 zeigt den Schnitt durch einen Prismenfeldstecher, in den der Strahlengang eingezeichnet ist.

4. Spiegelfernrohre (Reflektoren). Für astronomische Zwecke verwendet man vielfach auch *Spiegelfernrohre* oder *Reflektoren.* Bei diesen ist das Objektiv durch einen Hohlspiegel ersetzt. Die von dem Hohlspiegel reflektierten Strah-

len werden vor ihrer Vereinigung durch ein totalreflektierendes Prisma oder einen Spiegel um 90° abgelenkt. Es entsteht in *B* ein reelles Bild des beobachteten Sternes, das durch ein Okular betrachtet wird (Abb. **115**/1).

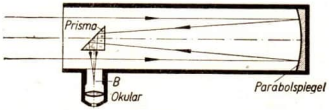
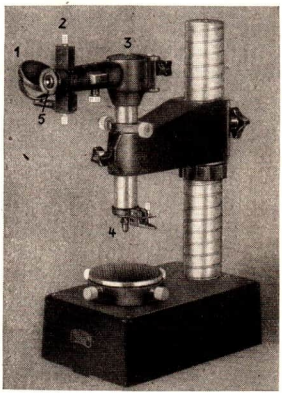


Abb. **115**/1. Strahlengang in einem Spiegelfernrohr (schematisch). Die von einem Gestirn ausgehenden Strahlen werden am Parabolspiegel zurückgeworfen, vor ihrer Vereinigung am Prisma total reflektiert und zur Seite abgelenkt. Das reelle Bild *B* wird durch das Okular wie durch eine Lupe betrachtet.

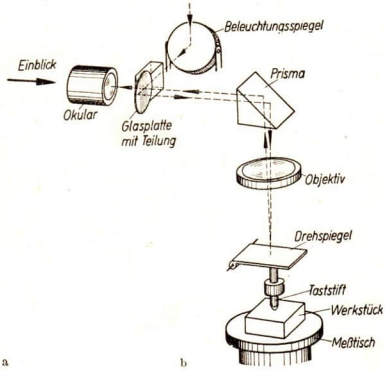
Bei der Bilderzeugung wird das Licht nicht gebrochen und infolgedessen auch nicht spektral zerlegt. Das in einem Reflektor erzeugte Bild ist demnach auch bei großen Öffnungen des Spiegels frei von Farbfehlern, die bei Anwendung von Linsen auftreten können.

Spiegelfernrohre sind bis zu sehr bedeutenden Abmessungen hergestellt worden und haben sich besonders bei der Erforschung der Fixsterne bewährt.

5. Fernrohre für Wissenschaft und Technik. Ein hochwertiges Feinmeßgerät, bei dem ein Fernrohr verwendet wird, ist das *Optimeter* (Abb. **115**/2a und b). Dieses Gerät ermöglicht es, die Dicke von Gegenständen bis auf 1 μ genau zu messen. Ein seitlich in das Gerät eintretendes Lichtbündel beleuchtet eine hinter dem Okular auf einer Glasplatte befindliche Teilung. Von dieser gelangt das Licht durch ein totalreflektierendes Prisma und ein Objektiv auf den im unteren Teil des Gerätes angebrachten drehbaren Spiegel, der mit einem Taststift verbunden ist. Vom Spiegel aus durchläuft das Lichtbündel das Gerät in umgekehrter Richtung bis zum Okular. Wird der Spiegel bei einer Messung durch den Taststift



a



b

Abb. **115**/2. Optimeter des Carl-Zeiss-Werkes Jena VEB
a) Ansicht: *1* Beleuchtungsspiegel, *2* Skala, *3* totalreflektierendes Prisma, *4* Taststift, *5* Okular
b) Strahlengang im Optimeter (schematisch)

etwas geneigt, so verschiebt sich das Bild der Teilung gegenüber einem festen *Index*, der im Okular angebracht ist. Beim Anheben oder Senken des Taststiftes um 1 μ weicht das Teilungsbild um 1 mm aus. Auf diese Weise ist es möglich, die Dicke von Werkstücken und dünnen Folien mit größter Genauigkeit zu messen.

Fernrohre verwendet man vielfach als *Visierrohre*. Sie werden dann meist mit einem *Fadenkreuz* als Visiermarke ausgestattet. Solche Rohre befinden sich beispielsweise an *Winkelmeßgeräten*. Zu diesen gehören unter anderem die *Theodoliten* und die *Nivellierinstrumente*, die für Landvermessungen benutzt werden (Abb. **116**/1).

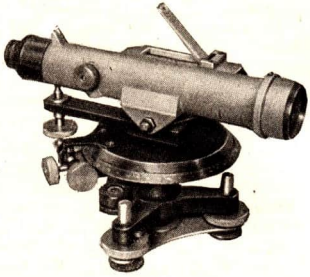


Abb. **116**/1. Nivellierinstrument. Es dient zum Messen von Höhenunterschieden und zum Feststellen von waagerechten Ebenen im Gelände.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Wie verläuft der Strahlengang im astronomischen Fernrohr?
2. Woraus erklärt sich die große Länge des astronomischen Fernrohres?
3. Worin unterscheidet sich das astronomische Fernrohr vom Galileischen?
4. Um welche Strecke ist ein Prismenfernrohr kürzer als ein astronomisches Fernrohr mit fast gleicher optischer Ausstattung?
5. Beschreiben Sie die Wirkungsweise eines Nivellierinstruments!
6. Erläutern Sie den Bau und die Wirkungsweise eines Optimeters!

VII. Lichtemission und -absorption – Photometrie

§ 29. Die Emission des Lichtes

1. Spektralapparat. Zur Untersuchung der spektralen Zusammensetzung des Lichtes benutzt man *Spektralapparate* (Abb. **117**/1). Ihre optische Einrichtung besteht aus dem *Spalt-* oder *Kollimatorrohr*, dem *Prisma* und dem *Beobachtungsfernrohr*. Sie wird ergänzt durch ein *Skalenrohr*. Der Strahlengang in einem Spektralapparat ist in Abb. **117**/2 schematisch dargestellt. Das von der spektral zu untersuchenden Lichtquelle herkommende Lichtbündel tritt durch einen Spalt in das Kollimatorrohr und wird durch eine Linse parallel gerichtet, da der Spalt im Brennpunkt der Linse liegt. Die Lichtstrahlen durchdringen das Prisma und werden in ihre spektralen Bestandteile zerlegt. Das Objektiv des Fernrohres vereinigt die Strahlen zu farbigen Spaltbildern. Sie bilden ein Spektrum, das durch das Okular betrachtet wird.

Abb. **117**/1. Spektralapparat aus dem VEB Labor-Prüfgerätebau Karl-Marx-Stadt

Das dritte Rohr, das sich am Spektralapparat befindet, enthält eine auf eine Glasplatte gezeichnete Vergleichsskala und eine Sammellinse. Wird die Skala beleuchtet, so werden die von ihr ausgehenden Lichtstrahlen durch die Linse parallel gerichtet und treffen auf die Fläche des Prismas, aus der die Strahlen austreten. Von dieser werden sie in das Beobachtungsfernrohr reflektiert, so daß der

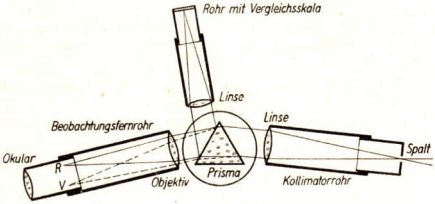


Abb. **117**/2. Strahlengang im Spektralapparat

Beobachter die Skala und das Spektrum gleichzeitig sieht. Dadurch ist es möglich, die Spektren verschiedener Stoffe miteinander zu vergleichen.

Zur schnellen Prüfung der spektralen Zusammensetzung einer Lichtquelle benutzt man *Handspektroskope*, die ein geradsichtiges Prisma enthalten (Abb. 118/1, vgl. auch Abb. 88/2).

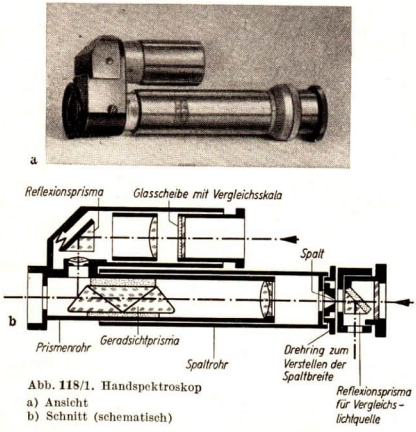


Abb. 118/1. Handspektroskop
a) Ansicht
b) Schnitt (schematisch)

2. Das kontinuierliche Spektrum. Stellt man vor den Spalt eines Spektralapparates eine brennende Stearinkerze, so erzeugt das von den glühenden Rußteilchen ausgehende Licht ein zusammenhängendes, farbiges Lichtband. Ein derartiges Spektrum bezeichnet man als *kontinuierliches Spektrum* (siehe Spektraltafel). Ein solches entsteht auch bei der Zerlegung des Lichtes einer Glühlampe und anderer glühender fester bzw. flüssiger Körper.

Die Spektren glühender fester Körper und glühender Flüssigkeiten sind kontinuierlich.

Wir erzeugen nacheinander die Spektren zweier Glühlampen, von denen die eine bei voller Strombelastung leuchtet, während bei der anderen der hindurchfließende Strom durch einen Vorwiderstand so weit verringert wird, daß die Lampe nur noch die Helligkeit einer Kerzenflamme hat. Wir stellen fest:

1. Das Spektrum der dunkel brennenden Lampe ist viel lichtschwächer als das der hell brennenden.
2. Das Spektrum der schwach leuchtenden Glühlampe erscheint kürzer als das der hellen, da die blauen Spektralfarben fehlen. Infolgedessen leuchtet die dunkel brennende Lampe dunkelrot.

Es ergibt sich das Gesetz:

Die Lichtausstrahlung eines Körpers, seine Emission, nimmt mit steigender Temperatur zu. Bei niedriger Temperatur ist die Emission vorwiegend auf das rote Ende des Spektrums beschränkt; sie erstreckt sich bei zunehmender Temperatur immer mehr zum violetten Ende hin.

3. Linien- und Bandenspektren. Bringt man in eine nichtleuchtende Bunsenflamme ein Natriumsalz, zum Beispiel Kochsalz, so färbt sich die Flamme gelb. Diese Färbung rührt davon her, daß die Kochsalzmoleküle bei hohen Temperaturen in Natrium- und Chloratome aufgespalten und daß die Natriumatome

durch die hohe Temperatur zum Leuchten angeregt werden. Betrachten wir die gelb leuchtende Flamme mit dem Spektralapparat, so sehen wir nur eine schmale *gelbe Linie* (siehe Spektraltafel). Verwenden wir ein stark brechendes Prisma, so können wir bei einem hinreichend schmalen Spalt feststellen, daß diese Linie aus zwei sehr nahe nebeneinanderliegenden gelben Linien besteht. Verdampft man ein *Lithiumsalz*, so werden *zwei rote Linien* sichtbar. *Thalliumsalze ergeben eine grüne Linie, Kaliumsalze zwei rote und eine violette Linie.* Spektren, die nur aus einzelnen Linien bestehen, bezeichnet man als *Linienspektren.* Jede Linie ist das farbige Bild des Spaltes. Eine größere Anzahl von Linien erhält man, wenn man Eisen, Kupfer, Zink oder Aluminium in einer Flamme verdampft.

Auch die mit Gasen gefüllten Röhren, die man elektrisch zum Leuchten erregt, ergeben Linienspektren, die für jedes Gas charakteristisch sind.

Jedes Element emittiert im gas- oder dampfförmigen Zustand Licht von ganz bestimmter Farbe. Es entsteht ein Linienspektrum. Die Farbe und die Lage der Linien sind für das emittierende Element kennzeichnend.

Liegen die Linien eines Emissionsspektrums bandartig in engen Gruppen zusammen, so bezeichnet man ein solches Spektrum als ein *Bandenspektrum* (Abb. **119**/1). Bandenspektren werden nur bei sehr großer Dispersion des Prismas in einzelne Linien aufgelöst.

Abb. **119**/1. Bandenspektrum des Jods

Verdampft man einen Stoff, so können aus der Lage der Spektrallinien die in ihm enthaltenen Elemente eindeutig bestimmt werden. Daher verwendet man die *Spektralanalyse* zum Nachweis von Elementen. Diese Untersuchungsart bietet verschiedene Vorteile: Die Untersuchungen können in kurzer Zeit durchgeführt werden. Es sind nur sehr kleine Mengen des zu analysierenden Stoffes erforderlich. Mit Hilfe der Spektralanalyse sind sehr geringe Mengen eines Elementes sicher nachweisbar. So können beispielsweise noch $3 \cdot 10^{-7}$ mg Natrium und $1 \cdot 10^{-7}$ mg Lithium nachgewiesen werden.

4. Das ultraviolette Spektrum. Erzeugt man auf einer photographischen Platte das Spektrum eines Lichtbogens, so stellt man nach dem Entwickeln der Platte fest, daß sie weit über das sichtbare violette Ende hinaus geschwärzt ist. Eine ähnliche Erscheinung kann man beobachten, wenn man das Spektrum auf einen mit einer fluoreszierenden Substanz, beispielsweise mit Zinksulfid, bestrichenen Schirm fallen läßt. Man sieht auf dem Schirm sowohl das kontinuierliche Spektrum als auch Fluoreszenzerscheinungen an den Stellen des Schirmes, die von unsichtbaren Strahlen getroffen werden. Diese Strahlen liegen jenseits des violetten Endes des Spektrums. Man bezeichnet sie als *ultraviolette Strahlen.* Von Glas und vielen anderen Stoffen werden sie stark absorbiert, Quarz dagegen läßt sie gut hindurchgehen. Man kann infolgedessen die oben beschriebenen Erscheinungen dadurch verstärken, daß man Linsen und Prismen aus Quarz verwendet.

Bei *spektrochemischen Analysen von Metalllegierungen*, wie sie in Industrielaboratorien und Forschungsstätten häufig durchgeführt werden, ist es erforderlich, die Spektren zu photographieren, damit man sie besser auswerten kann. Man verwendet dazu einen *Spektrographen*. Bei diesem entsteht das Spektrum unmittelbar auf einer photographischen Platte. Die Analyse wird stets an Hand von Vergleichsspektren durchgeführt. Man nimmt dazu auf der gleichen Platte das Spektrum des zu untersuchenden Stoffes und das einer Vergleichssubstanz auf. Diese enthält meist mehrere Elemente, so daß überall im Spektralbereich Linien bekannter Lage vorhanden sind.

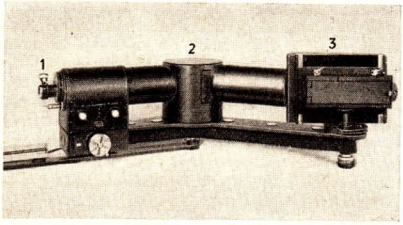


Abb. **120/1**. Spektrograph Q 24 des Carl-Zeiss-Werkes Jena VEB
1 Spalt, *2* Prisma, *3* Kassette für photographische Platten

Die Abbildung **120/1** zeigt den Spektrographen Q 24 des volkseigenen Carl-Zeiss-Werkes in Jena, der in der Hauptsache für die Untersuchung von Emissionsspektren bestimmt ist. Das Prisma und die Linsen bestehen aus Quarz, damit auch der ultraviolette Teil des Spektrums photographisch abgebildet wird. Man bezeichnet daher den Spektrographen Q 24 als einen *UV-Spektrographen*[1].

Die ultravioletten Strahlen üben eine starke *biologische Wirkung* aus. Richtig dosiert wirken sie belebend und heilend auf den menschlichen Körper. Hierauf beruht die Verwendung der Quecksilberbogenlampe als *Höhensonne* bei der klinischen Behandlung. Umgekehrt kann sich eine überstarke Bestrahlung mit ultraviolettem Licht schädigend auswirken. Sie führt bei längerer Anwendung zu Entzündungen und Verbrennungen der Haut. So ist der *Gletscherbrand* eine Folge des ultravioletten Anteils des Sonnenlichtes, der in höheren Lagen stärker wirksam ist als im Tiefland.

5. Das ultrarote Spektrum. Man erzeugt von dem Licht einer Bogenlampe ein Spektrum und führt die geschwärzte Kugel eines in Zehntelgrade geteilten Thermometers langsam aus dem sichtbaren Teil des Spektrums über das Rot in das dunkle Gebiet. Der Quecksilberfaden beginnt im Rot zu steigen. Er erreicht jenseits des Rot seinen höchsten Stand und sinkt dann allmählich wieder.

Es gehen mithin von einer Lichtquelle auch Strahlen aus, die vom Auge selbst nicht wahrgenommen werden und deren Spektrum jenseits des roten Endes des sichtbaren Spektrums liegt. Man nennt sie *ultrarote*, seltener auch *infrarote Strahlen*. Diese Strahlen sind an ihrer *Wärmewirkung* erkennbar. Sie werden von Glas teilweise absorbiert. Die Absorption ist bei Linsen und Prismen aus Flußspat, Steinsalz oder Quarz wesentlich geringer als bei Linsen und Prismen aus Glas. Die Wahl des Stoffes hängt davon ab, welches Gebiet des ultraroten Spektrums untersucht werden soll.

---

[1] UV = technische Kurzbezeichnung für Ultraviolett

6. Fragen und Aufgaben:

1. Beschreiben Sie den Aufbau eines Spektralapparates und den Strahlengang in ihm!
2. Wie ist ein geradsichtiges Spektroskop gebaut?
3. Bei welchen Körpern entsteht ein kontinuierliches Spektrum? Unter welchen Umständen entsteht ein Linienspektrum?
4. Erzeugen Sie Linienspektren von einfachen Salzen und vergleichen Sie die Lage der Linien mit einem kontinuierlichen Spektrum!
5. Welche Bedeutung hat die Spektralanalyse?
6. Was versteht man unter einem Bandenspektrum?
7. Nennen Sie unsichtbare Teile des Spektrums und geben Sie ihre Erzeugung an! Welche Wirkungen üben die unsichtbaren Strahlen aus?

§ 30. Die Absorption des Lichtes

1. Absorptionsspektren. Man erzeugt mittels eines Prismas auf einem weißen Schirm das kontinuierliche Spektrum eines Kohlelichtbogens und hält in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Prisma ein Rotfilter, wie man es für photographische Arbeiten verwendet. Dabei beobachtet man, daß das Spektrum nur noch aus dem roten Teil besteht. Fast alle anderen Farben werden von der roten Glasscheibe *absorbiert*. Das Spektrum, das auf diese Weise entsteht, heißt *Absorptionsspektrum*. Bei der Vereinigung der im Absorptionsspektrum enthaltenen Farben erhält man die Farbe, in der man das Filter im durchscheinenden Licht erblickt. Ein blaues Stück Glas läßt außer den blauen noch einen Teil der roten Spektralfarben durch; es absorbiert mithin Gelb und Grün.

Wir halten ein Stück *Neophanglas* in den Strahlengang. Dieses Glas erscheint in der Durchsicht fast farblos; es ist nur ganz schwach violett gefärbt. Das Spektrum enthält mehrere Absorptionsstellen. Vor allem wird der gelbe Teil des Spektrums absorbiert. Auch hier ergibt die Vereinigung der Farben des Absorptionsspektrums wieder den Farbton des Glases. Neophanglas wird wegen der oben genannten Eigenschaft in guten Sonnenbrillen vielfach verwendet.

Zu den gleichen Ergebnissen gelangt man, wenn man statt eines farbigen Glases gefärbtes Wasser oder ein farbiges Gas in den Strahlengang bringt. Die Lage der Absorptionsstellen ist bei den einzelnen Stoffen verschieden.

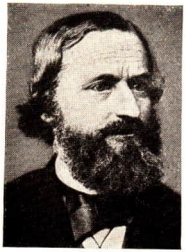
Wir erzeugen noch einmal ein Spektrum des von einer Bogenlampe ausgestrahlten weißen Lichtes. In den Strahlengang bringen wir die Flamme eines Bunsenbrenners, in die wir mit Hilfe eines Löffelchens ein kleines Stückchen Natrium halten. Dieses verdampft und färbt die Flamme intensiv gelb. In dem Augenblick, in dem die Flamme in den Strahlengang kommt, beobachtet man eine tiefschwarze Linie im gelben Teil des Spektrums. Sie liegt an derselben Stelle, an der im Emissionsspektrum des Natriumlichtes die gelbe Linie liegt. Tränkt man einen Asbeststreifen mit einer Strontiumsalzlösung und hält ihn in die Flamme, so tritt eine dunkle Linie an der Stelle im Spektrum auf, an der beim Emissionsspektrum die rote Strontiumlinie liegt. Aus den Versuchen folgt:

Ein Element absorbiert im gasförmigen Zustande diejenigen Farben, die in seinem Emissionsspektrum enthalten sind.

2. Fraunhofersche Linien. Das Sonnenspektrum scheint bei flüchtiger Betrachtung kontinuierlich zu sein. Untersucht man es aber sehr genau, so beobachtet man in diesem Spektrum eine *große Zahl dunkler Linien* von verschiedener Stärke. Sie wurden von *Fraunhofer* 1814 entdeckt und daher später nach ihm genannt. Er fand etwa 700 Linien und bezeichnete die besonders stark hervortretenden Linien mit Buchstaben (siehe Spektraltafel). Heute hat man im Sonnenspektrum bereits mehrere tausend Linien festgestellt.

Die Erklärung für das Entstehen dieser Absorptionslinien wurde erst 1859 durch *Bunsen*[1] und *Kirchhoff*[2] gegeben. Die Strahlung, die aus dem Innern der Sonne kommt, durchdringt die äußere Sonnenhülle und wird dort zum Teil absorbiert. Aus der Lage der dunklen Linien kann man erkennen, welche Stoffe in der durchstrahlten Schicht vorhanden sind. So konnten bereits Bunsen und Kirchhoff feststellen, daß alle auf der Erde vorkommenden Elemente auch auf der Sonne existieren. Aber nicht alle Absorptionslinien des Sonnenspektrums konnten von ihnen gedeutet werden. Man schloß infolgedessen auf unbekannte Elemente. Im Jahre 1868 wurde beispielsweise ein Element auf der Sonne vermutet, das auf der Erde bis dahin noch nicht festgestellt worden war und das man als *Helium* bezeichnete. Erst 1895 konnte sein Vorkommen in der Lufthülle der Erde auf Grund der entsprechenden Emissionslinien nachgewiesen werden.

Robert Wilhelm Bunsen (1811—1899)



Gustav Robert Kirchhoff (1824—1887)

3. Fragen:

1. Wie entsteht ein Absorptionsspektrum?
2. Wie kommen die Farben durchsichtiger Körper zustande?
3. Welche Schlüsse kann man aus dem Vorhandensein der Fraunhoferschen Linien ziehen?
4. Wie kann man spektrographisch nachweisen, daß das Mondlicht reflektiertes Sonnenlicht ist?

---

[1] Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899), ein sehr erfolgreicher deutscher Chemiker, entdeckte zusammen mit Gustav Kirchhoff die Spektralanalyse und schuf dadurch die Grundlage für ein äußerst exaktes und empfindliches Forschungsverfahren.

[2] Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887), ein deutscher Physiker. Seine Forschungen auf dem Gebiet der Strahlungslehre und der Elektrizitätslehre haben zu wichtigen Erkenntnissen geführt.

§ 31. Körperfarben

1. Lichtabsorption und Körperfarben. Wir erzeugen mit Hilfe einer Bogenlampe ein kontinuierliches Spektrum und fangen es auf einem roten Stück Papier auf. Wir beobachten, daß das Papier nur an den Stellen kräftig rot aufleuchtet, an denen es vom roten Teil des Spektrums getroffen wird. Die Stellen, auf die andere Farben des Spektrums fallen, erscheinen schwarz. Wir schließen daraus, daß alle Spektralfarben außer Rot von dem Papier absorbiert werden.

Die Farben, in denen die Körper erscheinen, bezeichnet man im Gegensatz zu den Spektralfarben als *Körperfarben* oder als *Pigmentfarben*[1]. Es ergibt sich:

Körperfarben entstehen dadurch, daß die Körper bestimmte Teile des auftreffenden weißen Lichtes absorbieren, während der Rest des Lichtes hindurchdringt oder reflektiert wird.

Die Körperfarben ergeben sich somit aus dem weißen Licht durch *Fortnahme von Farben*. Auf ähnliche Weise entsteht auch die grüne Farbe durch Mischen von blauen und gelben Pigmenten. Blaue Pigmente absorbieren vorwiegend Rot, Orange, Gelb, gelbe Pigmente dagegen Rot, Blau, Violett. Die einzige Farbkomponente, die von beiden Pigmenten nicht absorbiert wird, ist Grün. Sie wird von beiden Pigmenten gemeinsam reflektiert bzw. hindurchgelassen. Als Mischfarbe von blauen und gelben Pigmenten erscheint daher Grün (Abb. **123**/1).

	Absorbierte Farbbestandteile					
	Rot	Orange	Gelb	Grün	Blau	Violett
gelbes Pigment	▒				▒	▒
blaues Pigment	▒	▒	▒			

Abb. **123**/1. Schematische Darstellung der subtraktiven Mischung blauer und gelber Pigmentfarben zu Grün

Die Entstehung von Mischfarben aus Pigmentfarben ist eine subtraktive Farbmischung.

Versetzt man dagegen einen farbigen Kreisel, der abwechselnd mit blauen und gelben Papierstreifen beklebt ist, in rasche Umdrehungen, so erblickt das Auge eine hellgraue, fast weiß aussehende Farbe. Die Mischfarbe verschiebt sich noch mehr auf das Weiß zu, wenn man den Farbkreisel mit Papiersektoren versieht, die sämtliche Hauptspektralfarben, mithin Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett, aufweisen. Die Wirkung kommt dadurch zustande, daß nicht Farbpigmente, sondern Farbempfindungen gemischt werden. Es geschieht dasselbe wie bei dem in § 22, **3** wiedergegebenen Versuch, bei dem sämtliche Spektralfarben zu Weiß vereinigt werden. Wie bei diesem Versuch überlagern sich auch beim Farbkreisel sämtliche Farbkomponenten zu einer Gesamtfarbe. Man spricht von einer *additiven Farbmischung*. Während aber bei dem oben genannten Versuch die farbigen Lichter selbst gemischt werden und demnach eine *objektive Farbmischung* zustandekommt, haben wir es beim Farbkreisel mit einer Mischung der Farbempfindungen, und demnach mit einer *subjektiven Farbmischung* zu tun.

Die Mischung von Spektralfarben ist eine additive Farbmischung.

---

[1] pigmentum (lat.) = Färbestoff

Ein wichtiges Anwendungsgebiet der Farbmischung ist der *Druck farbiger Bilder*, der überwiegend nach dem Verfahren des *Dreifarbendruckes* durchgeführt wird. Man hat festgestellt, daß sich jeder Farbton aus den drei Grundfarben Rot, Gelb, Blau durch Mischen herstellen läßt. Um ein farbiges Bild zu erhalten, zerlegt man es in die genannten drei Farbkomponenten und druckt unter Verwendung gesonderter Druckplatten der Reihe nach die Pigmentfarben Gelb, Rot, Blau und schließlich noch Schwarz. Infolge subtraktiver Farbmischung entsteht dabei das farbige Gesamtbild.

Große Fortschritte wurden in neuerer Zeit auf dem Gebiet der *Farbenphotographie* erzielt. Das bei uns vorzugsweise angewendete *Agfacolor-Verfahren* arbeitet ebenfalls subtraktiv. Auf dem Film befinden sich drei Schichten, die für blaues, grünes und rotes Licht empfindlich sind. Beim Entwickeln entstehen übereinander drei verschiedenfarbige Bilder, die auf Grund subtraktiver Farbmischung zu einem in den natürlichen Farben erscheinenden Bild verschmelzen.

2. Die Abhängigkeit der Körperfarben von der Lichtzusammensetzung. Bei den bisherigen Betrachtungen wurde als Lichtquelle die Sonne vorausgesetzt. Bei künstlicher Beleuchtung behält ein Körper die gleiche Farbe wie im Sonnenlicht nur dann, wenn die zur Beleuchtung benutzte Lichtquelle ein Spektrum hat, das dem der Sonne ähnlich ist.

Man kann sich von der Veränderung der Körperfarben bei Beleuchtung mit nichtweißem Licht durch folgenden Versuch überzeugen: Man beleuchtet durch eine Glühlampe mit rotem Farbüberzug, beispielsweise eine Dunkelkammerlampe, ein Stück weißes Papier. Es erscheint dunkelrot. Ein grüner Stoff dagegen erscheint im roten Licht betrachtet fast schwarz. Nur rote Stoffe bleiben rot. Solche auffallende Farbänderungen treten zwar bei den modernen Glühlampen nicht auf, doch bleiben auch bei diesen schwache Farbänderungen nicht aus. Es hat sich nämlich erwiesen, daß im Glühlampenspektrum im Verhältnis zum Sonnenspektrum wenig blaues, aber viel rotes Licht enthalten ist. Schon diese Verschiedenheit der Spektren bedingt eine Änderung vieler Körperfarben.

Neuerdings ist es gelungen, in der Entwicklung der Leuchtstoffröhren Lichtquellen herzustellen, deren Licht sich vom Tageslicht kaum unterscheidet. Deshalb werden heute Arbeitsplätze, bei denen es auf die möglichst unveränderte Erhaltung der natürlichen Körperfarben ankommt, sehr häufig mit solchen Leuchtstoffröhren beleuchtet. Näheres über die Leuchtstoffröhre bringt der § 32.

3. Fragen:

1. Welcher Unterschied besteht zwischen Spektralfarben und Körperfarben?
2. Weshalb gibt die Mischung ultramarinblauer und gelber Wasserfarben Grün und nicht Weiß wie bei Spektralfarben?
3. Wie kommen die Farben undurchsichtiger Körper zustande?
4. Warum sehen die Körperfarben bei künstlichem Licht anders aus als bei Tageslicht?
5. Warum benutzt man Gelbfilter beim Photographieren?
6. Die menschliche Haut erscheint in schmutzgrauer, fahler Farbe, wenn sie von einer Bunsenflamme beleuchtet wird, in der ein Natriumsalz verdampft. Auch die meisten Farben anderer Körper erscheinen gänzlich geändert. Geben Sie die Ursache hierfür an!

§ 32. Lichttechnik und Lichtmessung

1. Die Lichterzeugung. Die heute am meisten verwendete Lichtquelle ist die *Glühlampe*. Sie ist ein *Temperaturstrahler*, das heißt, die emittierte Lichtmenge und die Färbung des Lichtes sind von der Temperatur des emittierenden Körpers abhängig. Ein Versuch läßt dies deutlich erkennen. Man schaltet eine Glühlampe über einen veränderlichen Widerstand an das Netz und untersucht das ausgesandte Licht mittels eines Spektroskops. Verringert man allmählich den Widerstand, so beobachtet man, daß die Wolframwendel zu glühen beginnt. Sie hat dabei eine Temperatur von etwa 600° C. Das emittierte Licht ist vorwiegend rot. Bei weiterer Verringerung des Widerstandes steigt die Temperatur der Wendel auf 1200° C, auf 1800° C und schließlich auf 2600° C. Das Licht, das der Glühfaden aussendet, verändert sich dabei von Rotgelb über Gelb zu Weiß. Das Spektrum des ausgesandten Lichtes verbreitert sich von Rot über Gelb, Grün nach Blau hin.

Die Helligkeit des von einer Glühlampe ausgehenden Lichtes nimmt mit der Erhöhung der Temperatur sehr stark zu. Die Farbe des emittierten Lichtes nähert sich dabei immer mehr dem Weiß.

Der Lichtbogen der *Kohlebogenlampe* hat eine Temperatur von etwa 3500° C. Seine Helligkeit ist infolgedessen erheblich größer als die der Glühlampe. Er strahlt hellweiß.

Eine erst in jüngster Zeit entwickelte Lichtquelle ist die *Leuchtstoffröhre* (Abb. **125**/1). Die Innenwand der mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre ist mit einem Überzug aus *Phosphoren* oder *Luminophoren* versehen. Die Phosphore haben nichts mit dem gleichnamigen Element Phosphor zu tun. Man versteht unter Phosphoren und Luminophoren Stoffe, die sichtbares Licht ausstrahlen, sobald sie von ultraviolettem Licht getroffen werden.

Abb. **125**/1. Mit Leuchtstoffröhren bestückte Beleuchtungskörper in einem Vortragssaal

Der elektrisch zur Strahlung angeregte *Quecksilberdampf* ist reich an ultraviolettem Licht, so daß die Phosphore intensiv leuchten. Das Spektrum des von einer Leuchtstoffröhre ausgesandten Lichtes ist ein kontinuierliches Spektrum. Die Stärke der Farben dieses Spektrums ist in weiten Grenzen durch Verwendung von Phosphoren verschiedener Zusammensetzungen beeinflußbar.

Das Leuchten dieser Phosphore hat nichts zu tun mit dem Leuchten des Phosphors und des faulenden Holzes oder mit dem Leuchten der Glühwürmchen oder mit dem Meeresleuchten. Erscheinungen dieser Art entstehen beim Ablauf chemischer Prozesse.

2. Die photometrischen Größen. Die *Beleuchtungstechnik* gründet sich auf Untersuchungen und Messungen, die man zu einem besonderen Gebiet der Physik zusammenfaßt und als **Photometrie** bezeichnet. Sie befaßt sich mit den physikalischen Größen *Leuchtdichte* (Formelzeichen B), *Lichtstärke* (Formelzeichen I), *Lichtstrom* (Formelzeichen Φ) und *Beleuchtungsstärke* (Formelzeichen E). Für diese Größen wurde ein besonderes Maßsystem aufgestellt, das von dem in der Mechanik, Wärmelehre und Elektrizitätslehre verwendeten Maßsystem ganz unabhängig ist. Es gründet sich auf den Begriff der Leuchtdichte.

Bei der Herleitung der genannten Größen werden wir den Begriff des Lichtstromes, den wir schon an anderen Stellen des Buches verwendeten, zunächst rein qualitativ gebrauchen. Doch müssen wir uns darüber klar sein, daß er auch ein quantitativer Begriff ist (vgl. S. 127).

a) Leuchtdichte. *Man versteht unter der Leuchtdichte B eines glühenden Körpers den Quotienten aus der Lichtstärke I und der leuchtenden Fläche F.*

$$B = \frac{I}{F}.$$

Die Einheit der Leuchtdichte ist das **Stilb**[1] (sb). Als Leuchtdichtenormal dient ein glühender Körper von der Temperatur des erstarrenden Platins (2042,5° K). Seine Leuchtdichte wurde auf 60 sb festgesetzt.

b) Lichtstärke. Die Festsetzung der Lichtstärkeeinheit setzt die Kenntnis des Begriffs des *räumlichen Winkels* (Formelzeichen ω) voraus. Man versteht darunter den Raumteil, der dadurch begrenzt wird, daß man vom Mittelpunkt einer Kugel aus eine Kegelfläche durch den Umfang eines auf der Kugel liegenden Kreises legt. Einen ebenen Winkel mißt man bekanntlich durch den von seinen Schenkeln begrenzten Bogen des Einheitskreises, der um den Scheitelpunkt des Winkels gelegt ist. Seine Einheit ist der 2π-te Teil des Einheitskreises und heißt ein **Radiant** (rad). Entsprechend wird ein räumlicher Winkel durch das Flächenstück gemessen, das der den Raumwinkel umhüllende Kegelmantel auf der um den Scheitelpunkt des Raumwinkels gelegten Einheitskugel begrenzt.

Als räumlicher Einheitswinkel gilt der Raumwinkel, der auf der Einheitskugel eine Fläche von 1 cm² begrenzt. Er ist der 4π-te Teil des räumlichen Vollwinkels und heißt **Radiant**[2] (rad²). Der räumliche Winkel ω begrenzt auf der Einheitskugel das Flächenstück ω (Abb. **126**/1). Begrenzt er entsprechend auf der Oberfläche einer Kugel mit dem Radius r die Fläche F, so ist

$$F = \omega \cdot r^2.$$

Die Lichtstärke I einer Lichtquelle ist der Quotient aus dem Lichtstrom Φ und dem Raumwinkel ω, in den die Lichtquelle strahlt.

$$I = \frac{\Phi}{\omega}.$$

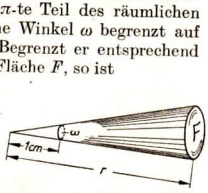


Abb. **126**/1. Auf einer Kugel mit dem Radius 1 begrenzt der räumliche Winkel das Flächenstück ω. Hat die Kugel den Radius r, so ist $F = \omega\, r^2$.

Die Einheit der Lichtstärke wurde 1948 international festgelegt und erhielt den Namen **Candela** (cd). Sie entspricht zahlenmäßig dem Lichtstrom, den

[1] stilbeín (griech.) = glänzen

eine Lichtquelle mit der Leuchtdichte 1 sb aus der Flächeneinheit, mithin aus 1 cm², in den Raumwinkel 1 rad² ausstrahlt.

$$1\ \text{cd} = \frac{1\ \text{sb} \cdot 1\ \text{cm}^2}{1\ \text{rad}^2}.$$

Beispiel: Eine Lichtquelle hat eine Leuchtdichte von 20 sb und eine leuchtende Fläche von 2 cm². Die Lichtquelle strahlt in einen Raumwinkel von 4 rad². Dann beträgt die Lichtstärke $\frac{20\ \text{sb} \cdot 2\ \text{cm}^2}{4\ \text{rad}^2} = 10\ \text{cd}$.

c) Lichtstrom. *Man versteht unter dem Lichtstrom Φ den Quotienten aus der Lichtmenge Q und der Zeit t des Strahlungsvorganges.*

$$\Phi = \frac{Q}{t}.$$

Die Einheit des Lichtstromes ist das **Lumen** (lm). Ein Lichtstrom hat die Stärke 1 lm, wenn eine Lichtquelle die Lichtstärke 1 cd gleichmäßig in den räumlichen Einheitswinkel 1 rad² einstrahlt. Der Lichtstrom Φ ist direkt proportional der Lichtstärke I und dem Raumwinkel ω.

$$\Phi = I \cdot \omega.$$

d) Beleuchtungsstärke. Die Helligkeit einer beleuchteten Fläche ist abhängig von der Stärke des Lichtstromes und der Größe der beleuchteten Fläche. *Man bezeichnet den Quotienten aus dem auf die Fläche fallenden Lichtstrom Φ und der Größe der beleuchteten Fläche F als die Beleuchtungsstärke E.* Es ist

$$E = \frac{\Phi}{F}.$$

Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist das **Lux** (lx). Die Beleuchtungsstärke einer Fläche beträgt 1 lx, wenn der Lichtstrom 1 lm auf eine zur Strahlungsrichtung senkrechte Fläche von 1 m² gestrahlt wird (Abb. **127**/1).

$$1\ \text{lx} = \frac{1\ \text{lm}}{1\ \text{m}^2}.$$

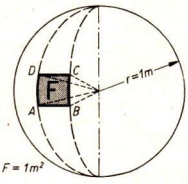


Abb. **127**/1. Lichtkugel mit dem Radius 1 m und dem Raumwinkel 1 rad². Von der im Kugelzentrum befindlichen Lichtquelle mit der Lichtstärke 1 cd geht der Lichtstrom 1 lm aus und fällt auf ein 1 m² großes Flächenstück der Kugel. Diese hat die Beleuchtungsstärke

$$\frac{1\ \text{lm}}{1\ \text{m}^2} = 1\ \text{lx}.$$

Das Flächenstück ist im Verhältnis zum Radius zu klein gezeichnet.

e) Lichtmenge. *Die Lichtmenge ist das Produkt aus Lichtstrom und Zeit.*

$$Q = \Phi \cdot t.$$

3. Das photometrische Entfernungsgesetz. Von einer punktförmigen Lichtquelle L möge ein Lichtstrom Φ in einen von L ausgehenden räumlichen Winkel ω eintreten. Er trifft auf einer um L gelegten Kugel mit dem Radius r_1 die Fläche F_1. Vergrößert sich der Kugelradius auf r_2, so trifft der Lichtstrom die Fläche F_2.

Es ist

$$F_1 = \omega \cdot r_1^2, \quad F_2 = \omega \cdot r_2^2.$$

Nach Abschnitt 2d sind dann die entsprechenden Beleuchtungsstärken

$$E_1 = \frac{\Phi}{F_1} \text{ und } E_2 = \frac{\Phi}{F_2}.$$

Mithin ist

$$E_1 = \frac{\Phi}{\omega \cdot r_1^2} \text{ und } E_2 = \frac{\Phi}{\omega \cdot r_2^2}.$$

Hieraus folgt das von *Johann Heinrich Lambert*[1] aufgestellte *Entfernungsgesetz*

$$\boldsymbol{E_1 : E_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}}$$

oder

$$\boldsymbol{E_1 : E_2 = r_2^2 : r_1^2}.$$

Die Beleuchtungsstärke einer zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes senkrecht stehenden Fläche ist dem Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle umgekehrt proportional.

4. Lichtmessung. Alle Lichtmessungen beruhen auf dem Vergleich von Beleuchtungsstärken und werden mit Geräten durchgeführt, die man *Photometer* nennt. Ein sehr einfaches Photometer ist das *Bunsensche Fettfleckphotometer*. Sein wesentlichster Teil ist ein weißer Papierschirm, in dessen Mitte sich ein Fettfleck befindet. Der Fettfleck reflektiert von dem auffallenden Licht weniger als das übrige Papier, da er lichtdurchlässiger ist als das ungefettete Papier. Er erscheint daher im durchscheinenden Licht heller, im auffallenden Licht dunkler als das ihn umgebende Papier (Abb. 128/1 a und b). Beleuchten wir den Schirm von beiden Seiten mit je einer Lichtquelle L_1 und L_2 (Abb. 128/2), so können wir durch Verändern der Entfernung der einen Lichtquelle vom Schirm erreichen, daß der Fettfleck auf beiden Seiten gleich hell erscheint (Abb. 128/1c). Dann sind die Beleuchtungsstärken auf beiden Seiten des Schirmes gleich groß.

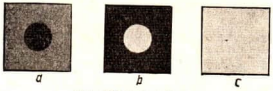


Abb. 128/1. Fettfleck
a) im auffallenden Licht betrachtet
b) im durchscheinenden Licht betrachtet
c) von beiden Seiten gleich stark beleuchtet

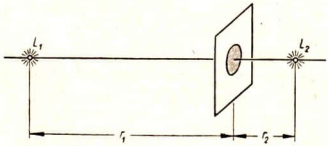


Abb. 128/2. Schema des Fettfleckphotometers
r_1 und r_2 Entfernungen der Lichtquellen L_1 und L_2 vom Fettfleck

Dies führt zu folgender Überlegung: Haben die Lichtquellen L_1 und L_2 die Lichtstärken I_1 und I_2 und befinden sie sich im Abstand r_1 und r_2 vom Fettfleck, so gilt für die Beleuchtungsstärken

$$E_1 = \frac{\Phi_1}{F_1} \text{ und } E_2 = \frac{\Phi_1}{F_2}.$$

Nach Abschnitt 2c ist

$$\Phi_1 = I_1 \cdot \omega_1 \text{ und } \Phi_2 = I_2 \cdot \omega_2 .$$

[1] Johann Heinrich Lambert (1728 geb. in Mülhausen i. Elsaß, 1777 gest. in Berlin), der Begründer der Photometrie. Er unterschied als erster klar zwischen Lichtstärke und Beleuchtungsstärke und stellte die photometrischen Grundgesetze auf.

Ferner ist

$$F_1 = \omega_1 \cdot r_1^2 \quad \text{und} \quad F_2 = \omega_2 \cdot r_2^2.$$

Es ergibt sich

$$E_1 = \frac{I_1 \cdot \omega_1}{\omega_1 \cdot r_1^2} = \frac{I_1}{r_1^2} \quad \text{und} \quad E_2 = \frac{I_2 \cdot \omega_2}{\omega_2 \cdot r_2^2} = \frac{I_2}{r_2^2}.$$

Hat man die Entfernungen r_1 und r_2 so gewählt, daß die Beleuchtungsstärken gleich sind, so ist $E_1 = E_2$. Folglich gilt

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}$$

oder

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Aus dieser Gleichung kann man die Lichtstärke I_2 berechnen, wenn I_1 bekannt ist.

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2}.$$

5. Lichtverteilung. Für die Beleuchtungstechnik ist es oft von großer Wichtigkeit festzustellen, wie groß die Lichtstärke einer Lichtquelle in den verschiedenen Richtungen ist und wie sich die Werte ändern, wenn man die Lichtquelle mit *Armaturen*, wie Schirmen, Mattglaskugeln usw., versieht. Da die Glühlampen im allgemeinen Rotationskörper sind, genügt es, die Lichtverteilung in einer Meridianebene zu bestimmen.

Das Photometer liegt bei der Durchführung der Messung in dieser Ebene. Die Lampe wird um eine zur Ebene senkrecht stehende Achse gedreht. Der Drehwinkel und die Lichtstärke werden gemessen und die Meßergebnisse in ein Polarkoordinatensystem eingetragen (Abb. 129/1).

Aus derartigen Kurven kann man Schlüsse auf die Verwendbarkeit der Lichtquellen ziehen. Man kann auf Grund dieser Ermittlungen Armaturen schaffen, die die Lichtverteilung günstig beeinflussen.

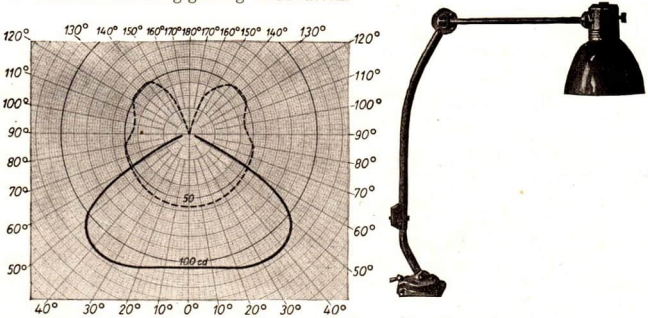


Abb. 129/1. Diagramm der Lichtverteilungskurve einer 60-W-Glühlampe, gestrichelte Linie: Lampe ohne Armatur, ausgezogene Linie: Lampe mit Armatur. Daneben die Leuchte

6. Lichttechnische Daten einiger Lichtquellen. Die folgende Tabelle enthält die wichtigsten elektrischen und lichttechnischen Daten einiger Lichtquellen.

Lichtquelle	Spannung V	Leistung W	Temperatur des Leuchtkörpers °C	Leuchtdichte des Leuchtkörpers sb	Lichtstrom lm	Lichtausbeute lm/W
Wolframlampe ..	220	25	2200	250	240	9,6
Wolframlampe ..	220	60	2340	400	750	12,5
Wolframlampe ..	220	100	2400	600	1400	14,0
Leuchtstoffröhre	220	25	etwa 40	0,5	1150	46,0

Wir ersehen aus der Tabelle:

1. Bei den Glühfadenlampen nimmt die Leuchtdichte mit der Temperatur erheblich zu.
2. Der Lichtstrom der Glühfadenlampe steigt mit zunehmender Temperatur.
3. Die Lichtausbeute der Glühfadenlampe steigt ebenfalls mit wachsender Temperatur.
4. Leuchtstofflampen haben trotz geringer Aufnahme elektrischer Leistung einen großen Lichtstrom und eine große Lichtausbeute.
5. Leuchtstofflampen haben eine geringe Leuchtdichte und sind daher blendungsfrei.

Man erkennt aus der Tabelle, daß der Verbrauch an elektrischer Energie bei Leuchtstoffröhren weit geringer ist als bei Glühfadenlampen. Man spart durch die Verwendung von Leuchtstoffröhren in erheblichem Maße elektrische Energie ein.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Was versteht man unter Leuchtstoffröhren, und wie wirken sie?
2. Welche Aufgaben hat die Photometrie?
3. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Beleuchtungsstärke und dem Lichtstrom?
4. Wie lautet das photometrische Entfernungsgesetz? In welchem Zusammenhang steht es mit der in § 18 gewonnenen Erkenntnis, daß der Querschnitt durch ein divergentes Lichtbündel proportional dem Quadrat der Entfernung ist?
5. Wie erfolgt die Messung der Lichtstärke beim Bunsenschen Fettfleckphotometer?
6. Wie wirkt sich der Farbanstrich einer Fläche auf photometrische Messungen aus? Weshalb müssen Zimmer, in denen photometrische Messungen durchgeführt werden, schwarze Wände haben?
7. Eine 15-W-Lampe befindet sich in einer Entfernung von 1 m vom Fettfleck des Photometers. Auf der anderen Seite des Fettflecks steht eine 60-W-Lampe in einer Entfernung von 2,4 m. Der Fettfleck erscheint unter diesen Umständen, von beiden Seiten her betrachtet, gleich hell. Wieviel mal so groß ist die Lichtstärke der 60-W-Lampe gegenüber der 15-W-Lampe?

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

VIII. Grundbegriffe und Grundgesetze des elektrischen Stromkreises

§ 33. Die elektrische Spannung

1. Nachweis der Spannung. Alle elektrischen Geräte, wie zum Beispiel elektrische Glühlampen, Elektromotoren, eine elektrische Klingel, ein Elektromagnet, funktionieren nur dann, wenn zwischen ihren Anschlußklemmen eine genügend hohe elektrische **Spannung** besteht.

Die Spannung ist ein elektrischer Zustand, der vorhanden sein muß, wenn ein elektrischer Strom entstehen soll.

Einer an das elektrische Netz angeschlossenen Steckdose ist es nicht ohne weiteres anzusehen, ob zwischen ihren Buchsen eine Spannung herrscht oder nicht. Doch äußert sich die elektrische Spannung unter anderem in einer Kraftwirkung auf leicht bewegliche Körper, die mit den Polen einer spannungführenden Steckdose verbunden sind. Wir erinnern uns des Elektroskops, das wir in der Grundschule zum ersten Nachweis der elektrischen Spannung benutzten (vgl. LB 8, § 6,1).

Noch weit überzeugender läßt sich die Kraftwirkung der elektrischen Spannung mit Hilfe einer *Spannungswaage* nachweisen (Abb. **131**/1). Sie ist ein nach Art einer Waage konstruiertes Gerät, bei dem eine Kraftwirkung an den Platten eines mit der Waage verbundenen Kondensators hervorgerufen wird, sobald man an die Platten eine Spannung legt. Der Waagebalken besteht aus einem Aluminiümrohr und ist auf einer Schneide gelagert. Er trägt auf der einen Seite eine sehr dünne kreisförmige Aluminiumscheibe, die im Abstand von wenigen Millimetern einer zweiten Aluminiumscheibe gegenüber-

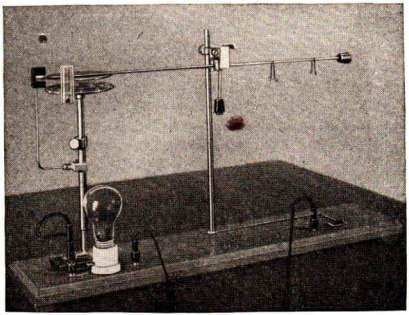


Abb. **131**/1. Modell einer elektrischen Spannungswaage. Die zwischen den Platten wirksame Kraft wird in p bzw. in mp gemessen. Sie dient als Maß für die Spannung.

steht. Beide Aluminiumscheiben bilden zusammen einen *Kondensator* und werden über den Waagebalken bzw. über die Haltestange an das elektrische Netz angeschlossen, wobei als Sicherung die in der Abbildung sichtbare Glühlampe in die eine Zuleitung eingeschaltet wird.

Sobald die beiden Metallplatten unter der Netzspannung stehen, treten anziehende Kräfte zwischen ihnen auf, unter deren Einfluß sich die bewegliche Platte der festen nähert. Eine Berührung wird durch einen an der Haltestange befestigten Anschlag verhindert. Wir erkennen aus dem Versuch:

Körper, zwischen denen eine elektrische Spannung besteht, üben Kräfte aufeinander aus.

Die Glühlampe bleibt bei dem Versuch dunkel. Daraus läßt sich folgern, daß ein Dauerstrom bei dem Versuch nicht entsteht. Die Spannungswaage gehört zu den *statischen Instrumenten*, da beim Gebrauch kein Strom durch sie hindurchfließt. Erst wenn sich die Platten des Kondensators bis zur Berührung nähern, leuchtet die Glühlampe auf, da dann der Stromkreis, in dem sie liegt, geschlossen wird:

In einem geschlossenen Stromkreis verursacht die Spannung einen elektrischen Strom.

2. Spannungsmesser. Zu den statischen Meßgeräten gehört auch das uns schon bekannte *Elektroskop*. Man kann es zu einem Spannungsmesser weiterentwickeln, indem man es mit einer Voltskala versieht. Solche Spannungsmesser nennt man *Elektrometer*. Ein viel benutzter Spannungsmesser ist das *Braunsche Elektrometer*, bei dem das Aluminiumblättchen durch einen auf Spitzen gelagerten Zeiger ersetzt ist (Abb. **132**/1).

Bei allen statischen Spannungsmessern ist das *Meßwerk* gegen das Metallgehäuse sorgfältig isoliert, so daß kein elektrischer Strom durch das Gerät fließen kann.

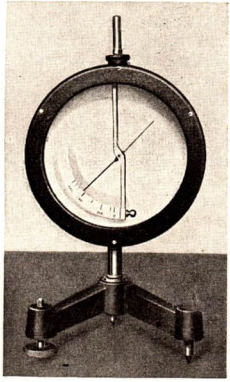


Abb. **132**/1. Braunsches Elektrometer Meßbereich 4 000 V

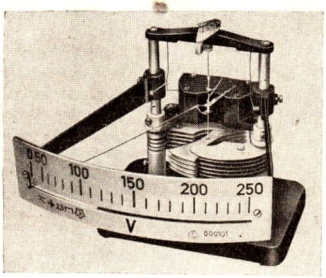


Abb. **132**/2. Statisches Elektrometer, Meßbereich 0 bis 250 V, hergestellt vom RFT-Gerätewerk Karl-Marx-Stadt VEB. Das Meßwerk enthält zwei feststehende Plattensysteme, in deren Zwischenräumen ein drehbares Plattensystem angeordnet ist. Besteht zwischen diesem Plattensystem und den anderen eine Spannung, so dreht sich das bewegliche System etwas in die festen hinein.

Spannungen in der Größenordnung der Netzspannung mißt man statisch mit Geräten, in denen zwei nach Art eines Drehkondensators angeordnete, gegeneinander drehbare Plattensysteme enthalten sind (Abb. **132**/2).

Da der Strom eine Wirkung der elektrischen Spannung ist, kann man auch die Stärke eines Stromes als Maß für die ihn verursachende Spannung ansehen. Hierauf beruhen die *stromführenden Spannungsmesser*, die wir als *Voltmeter* bereits in der Grundschule kennenlernten. Sämtliche Spannungsmesser, sowohl die statischen wie die stromführenden, werden beim Gebrauch zur Meßstelle parallel geschaltet.

3. Die internationale Spannungseinheit. Die *Einheit der Spannung* ist das **Volt** (V). Es trägt seinen Namen nach dem italienischen Physiker *Alessandro Volta*[1].

Von einer physikalischen Maßeinheit ist zu fordern, daß sie unveränderlich und reproduzierbar ist. Ursprünglich wurde die Spannung eines Kupfer-Zink-Elements als Einheit verwendet. Da dieses Element aber der Forderung nach der Unveränderlichkeit der Spannung nicht genügte, wurde ein Spezialelement entwickelt, dessen Spannung praktisch unveränderlich ist, solange kein Strom entnommen wird. Es handelt sich um das *Cadmium-Normalelement*. Dieses enthält in einem H-förmigen Glasgefäß Quecksilber als positiven Pol und eine Cadmium-Quecksilber-Legierung als negativen Pol (Abb. **133**/1). Als Elektrolyt dient eine Cadmiumsulfatlösung (vgl. § 57,4).

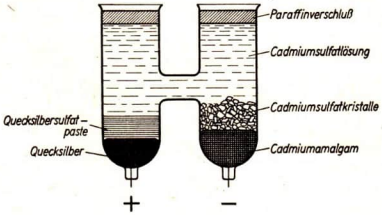


Abb. **133**/1. Cadmium-Normalelement

Eine Spannungsquelle hat die doppelte, die dreifache, die zehnfache Spannung eines zum Vergleich dienenden Elementes, wenn sie an einem Elektrometer oder an einem Voltmeter denselben Ausschlag hervorruft wie zwei, drei, zehn hintereinandergeschaltete Vergleichselemente.

Auf Grund einer internationalen Übereinkunft wurden in den Jahren 1908 bis 1911 in Washington die internationalen elektrischen Einheiten festgelegt, nach denen die elektrischen Meßgeräte aller Länder geeicht werden. Zur Festlegung des Volt wurde folgende Vereinbarung getroffen:

Die Spannung des Cadmium-Normalelements beträgt bei 20° C 1,0183 V, solange ihm keine elektrische Energie entnommen wird.

Zwei aus dem Volt abgeleitete Spannungseinheiten sind das **Kilovolt** (kV) und das **Millivolt** (mV):

$$1\ \text{kV} = 1000\ \text{V},$$
$$1\ \text{mV} = 0{,}001\ \text{V}.$$

[1] Alessandro Volta (1745–1827), Professor der Physik in Pavia. Er schuf mit seinem galvanischen Element die erste Elektrizitätsquelle von angenähert konstanter Spannung.

4. Urspannung und Klemmenspannung. Mißt man die Spannung eines galvanischen Elements zunächst in einem geöffneten und dann im geschlossenen Stromkreis, so ist zu beobachten, daß die Spannung des Elements etwas absinkt, sobald man den Stromkreis schließt.

Die Ursache hierfür liegt in folgenden Zusammenhängen: In jedem galvanischen Element ist eine elektrische Kraft wirksam, die die Elektronen zum negativen Pol hintreibt und so die Spannung hervorruft. Man bezeichnet diese Kraft als die **elektromotorische Kraft,** abgekürzt EMK. Die am offenen Element gemessene Spannung nennt man die **Urspannung.** Sie dient gleichzeitig als Maß für die EMK. Wird an die Klemmen des Elements ein Stromkreis angeschlossen, so geraten die Elektronen in Bewegung. Die Spannung sinkt infolgedessen etwas. Man bezeichnet die Spannung eines geschlossenen Elements als seine **Klemmenspannung.** Sie ist je nach der Strombelastung veränderlich.

Ähnliche Erscheinungen sind an jeder anderen Spannungsquelle, etwa dem Stromversorgungsgerät oder einer Netzsteckdose, festzustellen.

5. Spannungsbereiche — Unfallschutz. Da es für den Menschen gefährlich ist, spannungführende Leiter zu berühren, ist die Ausführungsweise, die Sicherung und die Bedienung elektrischer Anlagen durch gesetzliche Vorschriften geregelt. Nach den festgesetzten Normen unterscheidet man drei Spannungsbereiche:

die Kleinspannung von 0 bis 42 V gegen Erde,
die Niederspannung von 42 bis 250 V gegen Erde,
die Hochspannung über 250 V gegen Erde.

Die obere Grenze der für den Menschen ungefährlichen *Kleinspannungen* beträgt 42 V. Geht die Betriebsspannung einer Anlage darüber hinaus, so sind alle Leitungsteile durch Isolation vor zufälliger Berührung zu schützen. Trotz der strengen Vorschriften zur Sicherung elektrischer Geräte und Leitungsteile ist beim Umgang mit ihnen stets Vorsicht geboten. Wenn ungünstige Umstände vorliegen, beispielsweise das Vorhandensein eines feuchten Steinfußbodens, so

Übersicht über Spannungswerte bei einigen technischen Einrichtungen

Kupfer-Zink-Element (Volta-Element)		1,02	V
Kohle-Zink-Element einer Taschenlampenbatterie		1,50	V
Nickel-Cadmium-Akkumulator		1,25	V
Bleiakkumulator		2	V
Fahrraddynamo		6	V
Kraftwagenbatterie		12	V
Lichtnetz		220	V
Hochspannungsleitungen	bis	400000	V
Hochspannungs-Bandgenerator		5000000	V
Elektrokarren	bis	80	V
Elektrische Straßenbahn		500	V
Zündkerze im Kraftwagenmotor		5000	V
Neon-Leuchtröhre	bis	6000	V
Elektrische Eisenbahnen		15000	V
Röntgenröhren für ärztliche Zwecke	bis	60000	V
" für Werkstoffprüfung		200000	V

kann schon unter 100 V die Berührung spannungführender Leitungen tödlich wirken, besonders wenn der Strom das Herz berührt. Spannungen über 250 V gegen Erde gelten als *Hochspannung*. Für diese sind besondere Sicherheitsmaßnahmen festgelegt.

6. Versuche[1], Fragen und Aufgaben:

1. Fertigen Sie aus einem Tablettenröhrchen, einem Lamettafaden und einem Stanniolstreifen ein einfaches Elektroskop an! Prüfen Sie damit die Netzspannung unter Vorschaltung einer Glühlampe! Leitende Metallteile nicht berühren!
2. Mittels eines Voltmeters ist die Spannung der beiden Pole des Gleichstromnetzes gegen die Erde zu messen!
3. Bestimmen Sie mittels eines Voltmeters die Spannung verschiedener galvanischer Elemente!
   Vergleichen Sie bei einer Taschenlampenbatterie die Spannung einer einzelnen Zelle mit der Gesamtspannung!
4. Welche Spannung hat eine Akkumulatorbatterie, die aus
   a) 6 hintereinandergeschalteten,
   b) 6 parallelgeschalteten
   Akkumulatorzellen mit einer Spannung von je 2 V besteht?

§ 34. Die elektrische Stromstärke

1. Die Wirkungen des elektrischen Stromes. Jeden Vorgang, bei dem Elektronen oder andere elektrisch geladene Teilchen eine Bewegung in derselben Richtung ausführen, nennt man einen **elektrischen Strom.** Man kann einen durch einen Draht fließenden elektrischen Strom niemals unmittelbar beobachten; sein Vorhandensein ist nur an den Wirkungen festzustellen, die er hervorruft. Schon in der Grundschule haben wir als Wirkungen eines elektrischen Stromes die *Wärmewirkung*, die *magnetische Wirkung* und die *chemische Wirkung* kennengelernt. Mit Hilfe der genannten Wirkungen des elektrischen Stromes kann man nicht nur einen Stromfluß als solchen feststellen; sie ermöglichen es auch, die Stärken der Ströme zu vergleichen und sie zu messen.

2. Strommeßgeräte. Wir kennen bereits zwei Arten von Strommessern, die auf der magnetischen Wirkung des Stromes beruhen, das *Drehspulgerät* und das *Dreheisengerät*. Die Drehspulgeräte lassen sich für sehr große Empfindlichkeiten herstellen. Ganz besonders gilt dies für die *Spiegelgalvanometer*, bei denen der Zeiger durch einen Lichtstrahl ersetzt wird. Mit der Drehspule ist ein leichtes Spiegelchen verbunden, das einen von einer Beleuchtungsvorrichtung herkommenden Lichtstrahl auf eine Skala hin ablenkt. Der Ausschlag ist um so größer, je weiter der Abstand der Skala vom Gerät ist.

Erwähnt seien noch die *Hitzdrahtamperemeter*. Sie beruhen auf der Wärmewirkung des elektrischen Stromes. Im Gerät befindet sich ein Silberdraht, der

[1] Die unter 1 und 2 angegebenen Versuche mit der Netzspannung dürfen nur unter Aufsicht des Lehrers vorgenommen werden!

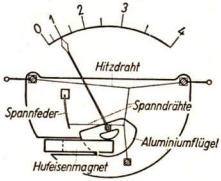


Abb. **136**/1. Meßwerk eines Hitzdrahtgerätes

Schaltzeichen des Hitzdrahtgerätes

vom Strom durchflossen wird (Abb. **136**/1). Der Draht dehnt sich infolge der dabei auftretenden Erwärmung aus. Er ist mit einem Zeiger verbunden, der durch die Längenänderung des Drahtes in Drehung versetzt wird.

Strommeßgeräte sind im Stromkreis mit einem Stromverbraucher stets in Reihe zu schalten.

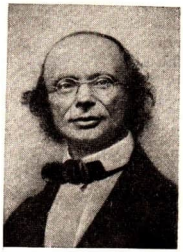
3. Die internationale Einheit der Stromstärke. Die *Einheit der Stromstärke* ist das **Ampere** (A). Sie wurde von den bekannten deutschen Naturwissenschaftlern *Karl Friedrich Gauß*[1] und *Wilhelm Eduard Weber*[2], die beide in der Mitte des vorigen Jahrhunderts an der Universität Göttingen als Forscher tätig waren, in Anlehnung an die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes festgelegt. Ihren Namen erhielt sie nach dem französischen Physiker *André Marie Ampère*[3]. Heute ist sie auf Grund der internationalen Maßvereinbarung durch die chemische Wirkung des Stromes definiert. Es wurde festgesetzt:

Ein Ampere (A) ist die Stärke eines Stromes, der aus einer wäßrigen Silbernitratlösung in einer Sekunde 1,118 mg Silber ausscheidet.

Karl Friedrich Gauß
(1777—1855)

Ein Strom hat die Stärke von 3 A, von 10 A, von $\frac{1}{5}$ A, wenn er in einer Sekunde die dreifache, die zehnfache, den fünften Teil der Silbermenge ausscheidet wie ein Strom von der Stärke 1 A. Der tausendste Teil eines Ampere wird als Einheit für sehr schwache Ströme verwendet. Er heißt ein **Milliampere** (mA).

$$1\ \text{mA} = 0{,}001\ \text{A}.$$



Wilhelm Eduard Weber
(1804—1891)

[1] Karl Friedrich Gauß (1777–1855), einer der bedeutendsten Mathematiker und Naturwissenschaftler des 19. Jahrhunderts. Er war von 1807 an Direktor der Sternwarte in Göttingen und schuf zusammen mit Wilhelm Eduard Weber die Grundlagen für das absolute Maßsystem.

[2] Wilhelm Eduard Weber (1804–1891), ein hervorragender deutscher Physiker, insbesondere bekannt durch seine erdmagnetischen Forschungen. Er wurde 1837 wegen seines energischen Einspruchs gegen den Verfassungsbruch des Königs von Hannover gemaßregelt und aus dem Amte entlassen.

[3] André Marie Ampère (1775–1836), Professor in Paris. Er erforschte die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

Einige Beispiele für die in der Technik verwendeten Stromstärken
Sämtliche Angaben sind Näherungswerte.

Bandgenerator (Schulmodell)	10^{-5} A
Verstärkerröhre eines Rundfunkempfängers	$5 \cdot 10^{-3}$ A
Elektrischer Belichtungsmesser	10^{-2} A
40-W-Glühlampe	0,18 A
Elektrisches Bügeleisen	2 ... 4 A
Bogenlampe eines Kinoprojektors	15 A
Elektromotor einer Straßenbahn	150 A
Elektroschweißgerät	500 A
Elektrische Grubenlokomotive (über Tag)	1500 A
Aluminiumschmelzofen	16000 A
Elektrostahlofen	120000 A

4. Versuche[1], Fragen, Aufgaben:

1. Schalten Sie einen Strommesser in die Zuleitung einiger elektrischer Beleuchtungskörper ein und bestimmen Sie die Stromstärke (als Beispiele: Kleinlampen, normale Glühlampen, Projektionsglühlampen, Bogenlampen, Autoscheinwerferlampen)!
2. Bestimmen Sie mit einem Strommesser die Stromstärke bei einigen stromverbrauchenden Geräten, zum Beispiel bei einer Kochplatte, beim Staubsauger, beim Radioapparat u. a. m.!
3. Nennen Sie einige Beispiele für die Wärmewirkung, für die magnetische Wirkung, für die chemische Wirkung des elektrischen Stromes!
4. Erläutern Sie an Hand der Abbildung **136**/1 die Wirkungsweise eines Hitzdrahtgerätes!

§ 35. Der elektrische Widerstand – Das Ohmsche Gesetz

1. Das Ohmsche Gesetz. Wir wissen bereits, daß jeder Leiter dem elektrischen Strom einen **Widerstand** entgegensetzt. Wir haben ferner erkannt, daß in einem Gleichstromkreis die Stromstärke (I) in bestimmter Weise von der Spannung (U) und vom Widerstand (R) abhängig ist. Durch Versuche wiesen wir schon auf der Grundschule nach, daß die Stromstärke bei konstantem Widerstand proportional der Spannung und bei konstanter Spannung umgekehrt proportional dem Widerstand ist.

Es ist

$$I \sim U \quad \text{und} \quad I \sim \frac{1}{R}.$$

Da beide Ausdrücke unabhängig voneinander gelten, kann man sie zu einer Proportionalität vereinigen und erhält

$$I \sim \frac{U}{R}.$$

Durch Einfügen eines Proportionalitätsfaktors k kann man diesen Ausdruck in eine Gleichung überführen:

$$I = k \cdot \frac{U}{R}.$$

[1] Zu Aufgabe 1 und 2: Mit der Netzspannung darf nur unter Aufsicht des Lehrers gearbeitet werden!

Durch geeignete Wahl der Einheiten läßt sich erreichen, daß der Proportionalitätsfaktor gleich 1 wird und somit nach außen nicht in Erscheinung tritt. Man hat festgesetzt, daß der Widerstand eines Leiters den Wert 1 haben soll, wenn die an ihm liegende Spannung gleich 1 V und die Stärke des durch ihn fließenden Stromes gleich 1 A ist. Die auf diese Weise definierte *Widerstandseinheit* heißt ein **Ohm** (Ω).

1 Ω ist der Widerstand eines Leiters, durch den bei einer Spannung 1 V ein Strom von der Stärke 1 A fließt.

Verwendet man die so aufeinander abgestimmten Einheiten Volt, Ampere und Ohm, so nimmt die oben angegebene Gleichung die als das *Ohmsche*[1] *Gesetz* bekannte Form an:

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

Sie ist der mathematische Ausdruck für eines der wichtigsten Naturgesetze.

In einem Stromkreis ist die Stromstärke gleich dem Quotienten aus der Klemmenspannung der Spannungsquelle und dem Widerstand des Stromkreises.

Georg Simon Ohm (1789—1854)

2. Das Widerstandsgesetz. Zwischen zwei Fußklemmen spannen wir nacheinander drei dünne Kupferdrähte verschiedener Durchmesser aus, und zwar mit Durchmessern von 0,12 mm, 0,20 mm und 0,45 mm. An die Enden der Drähte legen wir mit Hilfe eines Spannungsteilers eine niedrige konstante Gleichspannung von einigen Hundertsteln Volt (Näheres darüber siehe § 38,3).

Die Länge der drei Kupferdrähte wählen wir so, daß immer ein Strom von gleicher Stärke hindurchfließt. Seine Stärke lesen wir an einem in den Stromkreis geschalteten Amperemeter ab (Abb. 138/1). Wir tragen sämtliche Meßwerte in eine Tabelle ein. Die Durchmesser der Drähte

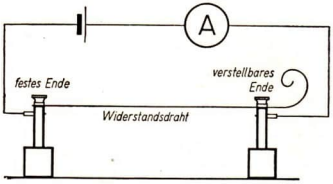


Abb. 138/1. Versuchsanordnung zur Ableitung des Widerstandsgesetzes (halbschematisch). Die Drahtlängen werden so lange geändert, bis die Stärke des hindurchfließenden Stromes immer wieder gleich ist.

[1] Georg Simon Ohm (1789–1854) entstammte einer alten Schlosserfamilie. Er studierte in seiner Vaterstadt Erlangen Mathematik und Physik, wurde Lehrer und wirkte als solcher viele Jahre am Gymnasium in Köln. Dort entdeckte er 1826 das nach ihm benannte Gesetz. Später gelangen ihm noch grundlegende Entdeckungen auf dem Gebiet der Akustik. Von 1833 bis 1849 war Ohm Direktor der polytechnischen Schule in Nürnberg. 1849 wurde er als Professor nach München berufen.

werden, wie es in der Technik allgemein üblich ist, in mm, die Querschnitte in mm², die Längen in m angegeben.

Drähte gleichen Widerstandes
Spannung 0,05 V, *Stromstärke* 0,19 A

Material	Durchmesser (d) mm	Querschnitt (F) mm²	Länge (l) m	Drahtlänge / Drahtquerschnitt $\left(\frac{l}{F}\right)$ m/mm²
Kupfer	0,12	0,011	0,165	15,00
	0,30	0,071	1,030	15,21
	0,45	0,159	2,380	14,96
Stahl	0,20	0,031	0,039	1,25
	0,25	0,049	0,063	1,28
	0,30	0,071	0,091	1,28

Bildet man für alle verwendeten Kupferdrähte den Quotienten $\frac{l}{F}$ aus der Drahtlänge und dem Drahtquerschnitt, so sieht man, daß sämtliche Quotienten annähernd den gleichen Wert haben, im Mittel 15,06 m/mm².

Zu beachten ist, daß die Kupferdrähte gleichen Widerstand haben, da sie bei gleicher Spannung von Strömen gleicher Stärke durchflossen werden. Der Quotient aus der Drahtlänge und dem Drahtquerschnitt ist somit ein Maß für die Größe des Widerstandes. Der Widerstand ist diesem Quotienten proportional:

$$R \sim \frac{l}{F}.$$

Führt man diese Versuche mit der gleichen Spannung an Drähten verschiedener Querschnitte aus anderem Material als Kupfer, etwa an Stahldrähten durch, so erweist sich der Quotient aus der Drahtlänge und dem Drahtquerschnitt bei gleicher Stromstärke mit großer Annäherung wieder als konstant, hat aber einen anderen Wert als vorher (vgl. dazu die Tabelle).

Man erkennt daraus, daß der Widerstand eines Drahtes auch vom Material abhängig ist, aus dem der Draht besteht. Geht man zur Gleichungsform über und fügt vor den Quotienten $\frac{l}{F}$ den Faktor ϱ ein, so erhält man als mathematischen Ausdruck für den Widerstand des Drahtes die Gleichung

$$\boldsymbol{R = \varrho \cdot \frac{l}{F}}.$$

Der Faktor ϱ ist vom Material des Leiters abhängig und wird als der **spezifische Widerstand** bezeichnet.

3. Der spezifische Widerstand. Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes läßt sich der spezifische Widerstand eines Leiters aus den in der Tabelle angegebenen Meßwerten errechnen.

Es ist $U = 0{,}05$ V
und $I = 0{,}19$ A.

Daraus ergibt sich als Widerstand der benutzten Drähte

$$R = \frac{0{,}05\ \mathrm{V}}{0{,}19\ \mathrm{A}} \approx 0{,}26\ \Omega .$$

Da in der Gleichung $R = \varrho \cdot \frac{l}{F}$ die Einheiten für R, l und F festliegen, kann man ϱ durch diese ausdrücken und erhält für den spezifischen Widerstand die Gleichung

$$\varrho = R \cdot \frac{F}{l} .$$

Die *Dimension* des spezifischen Widerstandes ist

$$\left[\frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}\right].$$

Der Quotient $\frac{F}{l}$ kann als Kehrwert von $\frac{l}{F}$ aus der auf S. 139 aufgestellten Tabelle entnommen werden.

Für Kupfer ist $\frac{F}{l} = \frac{1}{15{,}06\ \mathrm{m/mm^2}} \approx 0{,}066\ \mathrm{mm^2/m}$,

für Stahl $\frac{F}{l} = \frac{1}{1{,}27\ \mathrm{m/mm^2}} \approx 0{,}787\ \mathrm{mm^2/m}$.

Demnach ist der spezifische Widerstand

des Kupfers $\varrho_{\mathrm{Cu}} = 0{,}26\ \Omega \cdot 0{,}066\ \mathrm{mm^2/m} \approx 0{,}017\ \Omega\ \mathrm{mm^2/m}$,

des Stahls $\varrho_{\mathrm{Stahl}} = 0{,}26\ \Omega \cdot 0{,}787\ \mathrm{mm^2/m} \approx 0{,}205\ \Omega\ \mathrm{mm^2/m}$.

Spezifischer Widerstand ϱ einiger Gebrauchsmetalle und einiger nichtmetallischer Leiter bei 20° C

Material	ϱ in $\Omega \cdot \mathrm{mm^2/m}$
Silber	0,015
Kupfer	0,017 ... 0,018
Aluminium	0,024
Zink	0,048
Nickel	0,061
Platin	0,098
Eisen (Stahl)	0,10 ... 0,25
Chrom	0,19
Messing	0,07 ... 0,09
Neusilber	0,30 ... 0,36
Nickelin (67 % Cu, 30 % Ni, 3 % Mn)	0,40
Manganin (86 % Cu, 2 % Ni, 12 % Mn)	0,43
Konstantan (54 % Cu, 45 % Ni, 1 % Mn)	0,50
Kohle	86 ... 100
Graphit	11

4. Das Internationale Ohm. Das Widerstandsgesetz ermöglicht ein Arbeitsverfahren, nach dem man die Widerstandseinheit jederzeit wieder herstellen kann. Es wurde deshalb 1893 auf Grund von sorgfältig durchgeführten Messungen international folgendes vereinbart:

> **Das Ohm ist der Widerstand eines Quecksilberfadens mit einem Querschnitt von 1 mm² und einer Länge von 1,063 m bei einer Temperatur von 0° C.**

In Deutschland wie in den meisten Ländern ist diese Widerstandseinheit gesetzlich eingeführt.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Aus Konstantandraht mit einem Durchmesser von 0,5 mm (Querschnitt 0,196 mm²) soll ein Schiebewiderstand von 300 Ω hergestellt werden. Wie lang muß der Draht sein? Der spezifische Widerstand ist 0,5 Ω · mm²/m.
2. Wie groß ist der Widerstand einer Aluminiumleitung mit einem Durchmesser von 1 mm (Querschnitt 0,785 mm²) und einer Länge von 400 m? Zahlenwert des spezifischen Widerstandes 0,024.
3. Wie ändert sich der Widerstand eines aus einem Stahldraht bestehenden Leiterstückes, wenn man den Draht
   a) durch zwei Stahldrähte von gleicher Länge und gleichem Querschnitt,
   b) durch einen gleich langen Draht von doppeltem Durchmesser ersetzt?
4. Eine 220-V-Glühlampe habe bei ihrer Betriebstemperatur einen Widerstand von 1200 Ω. Wie groß ist die Betriebsstromstärke?
5. Wie groß ist die Stromstärke in einem Gerät mit einem Widerstand von 6000 Ω, an das eine Spannung von 220 V gelegt wird?
6. Welchen Widerstand hat ein Bügeleisen für 220 V, dessen Stromaufnahme mit 1,9 A bestimmt wurde?
7. Wie groß ist der Widerstand einer 12 km langen Starkstromleitung, die aus zwei Aluminiumdrähten mit einem Querschnitt von 16 mm² besteht? Welchen Durchmesser und welches Gewicht hat die Leitung?
8. Welche Längen haben Drähte mit einem Querschnitt von 1 mm² aus Kupfer, Aluminium, Stahl, Konstantan, wenn sie einen Widerstand von 1 Ω besitzen?

§ 36. Technische Widerstandsgeräte — Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

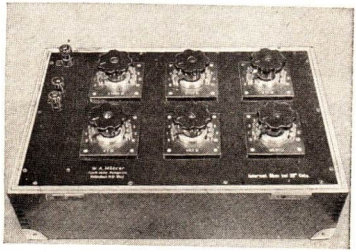
1. Regel- und Meßwiderstände. Als verstellbare technische Widerstandsgeräte sind uns bereits der Schiebewiderstand und der Kurbelwiderstand bekannt. Hier sei zur Ergänzung noch auf einige technische Widerstandsgeräte hingewiesen, die vorwiegend in wissenschaftlichen und technischen Laboratorien zum Messen und Vergleichen anderer Widerstände verwendet werden. Solche Widerstandsgeräte bezeichnet man auch als *Rheostate*[1].

Viele verstellbare Meßwiderstände werden als *Kurbelrheostate* gebaut, bei denen eine Reihe genau abgeglichener Widerstandsspulen an je zwei flache

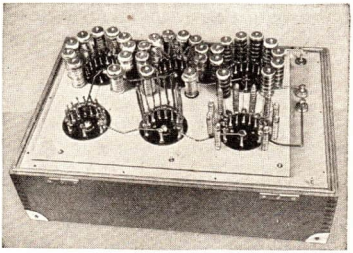
[1] rhéos (griech.) = das Fließen, histánai (griech.) = stellen; Rheostat = Stromsteller im Sinne von Stromregler

Metallklötze angeschlossen sind. Diese Metallklötze sind kreisförmig angeordnet und geben Kontakt mit einer darüber drehbar befestigten Kurbel (Abb. **142**/1). Meist werden mehrere Dekaden von Widerstandsspulen zu einem Rheostaten vereinigt, so daß man damit leicht auch hohe Widerstandswerte einschalten kann (Abb. **142**/2).

Zu wissenschaftlichen Messungen werden besonders häufig *Stöpselrheostate* verwendet. Bei ihnen sind die einzelnen Widerstandsspulen an je zwei Metallklötze angeschlossen. Diese können durch Einklemmen eines konisch geformten Kontaktstöpsels fest miteinander verbunden werden. Dadurch wird die angeschlossene Spule überbrückt und kurzgeschlossen (Abb. **143**/1 u. **143**/2). Eingeschaltet sind die Widerstandsspulen, deren Stöpsel gezogen sind.



a) Ansicht von oben



b) Innenansicht
Die Deckplatte ist herausgenommen und umgekehrt aufgelegt.

Abb. **142**/1. Kurbelrheostat, hergestellt im Werk W. A. Möhrer, Meilenbach (Thür.)

2. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes. Durch Versuche läßt sich zeigen, daß alle Metalle bei steigender Temperatur eine Widerstandszunahme aufweisen (vgl. dazu LB 8, § 18,4). Legierungen zeigen diese Eigenschaft nicht in demselben Maße wie die reinen Metalle. Es lassen sich sogar Legierungen herstellen, deren Widerstand von der Temperatur nahezu

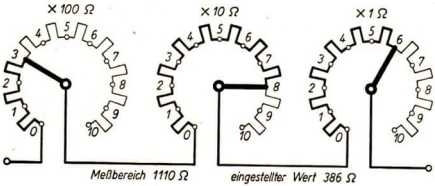


Abb. **142**/2. Kurbelrheostat mit drei Widerstandsdekaden in vereinfachter Form schematischer Darstellung. Die vom Strom durchflossenen Teile des Rheostaten sind stark gezeichnet.

unabhängig ist. Es sind dies *Konstantan, Manganin* u. a. Es handelt sich bei diesen Stoffen durchweg um Kupfer-Nickel-Mangan-Legierungen (vgl. Tabelle auf S. 140).

Diese Legierungen haben einen großen spezifischen Widerstand. Man verwendet sie zum Herstellen von technischen Widerständen für Meß- und Regelzwecke, von denen im ersten Abschnitt die Rede war. Es gibt auch Stoffe, deren Widerstand mit steigender Temperatur sinkt. Zu ihnen gehören Kohle, Glas und ionisierte Gasstrecken, zum Beispiel der Flammenbogen einer Bogenlampe und andere mehr.

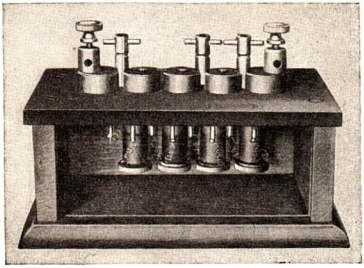


Abb. 143/1. Stöpselrheostat

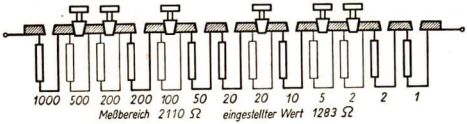


Abb. 143/2
Stöpselrheostat in stark vereinfachter schematischer Darstellung

Abb. 143/3 zeigt das Diagramm der Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Stromstärke für eine Kohlefaden- und eine Metallfadenlampe (220 V, 75 W). Die Lampen wurden nacheinander in Reihe mit einem Amperemeter an eine Spannungsquelle gelegt, wobei die Spannung allmählich bis 220 V gesteigert wurde. Aus den Werten der Spannung und der Stromstärke wurde jeweils der zugehörige Widerstand nach dem Ohmschen Gesetz errechnet. Näheres über die Ursachen der Temperaturabhängigkeit bringt § 58.

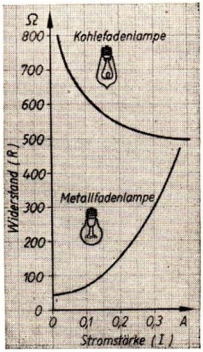


Abb. 143/3. Diagramm zur Widerstandsänderung einer Kohlefaden- und einer Metallfadenlampe

3. Das Widerstandsthermometer. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes wird in der Technik zur Temperaturmessung ausgenutzt. Man hat zu diesem Zweck elektrische *Widerstandsthermometer* konstruiert, die zu den genauesten Temperaturmeßgeräten gehören und deswegen in der Wissenschaft und in der Technik häufig verwendet werden. Als Temperaturfühler dient eine sehr dünndrähtige Spule aus Platindraht mit einem Durchmesser von 0,05 mm, die auf zwei gekreuzte Glimmerscheiben oder auf eine Hartglasspindel aufgewickelt ist. Der Widerstand der Spule ist bei 0° C auf 100 Ω genormt. Die Spule ist in ein Schutzrohr eingeschlossen, in dem auch die beiden Zuführungsdrähte

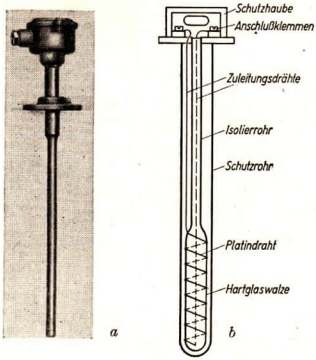


Abb. 144/1. Temperaturfühler eines Widerstandsthermometers
a) Ansicht b) schematische Wiedergabe

gegeneinander isoliert nach außen führen. Das offene Ende des Schutzrohres trägt eine Metallkapsel, in der sich, ebenfalls gegeneinander isoliert, die beiden Anschlußklemmen der Drahtenden befinden (Abb. **144**/1).

Das an der Meßstelle eingebaute Widerstandsthermometer wird unter Vorschalten eines Schutzwiderstandes an eine konstante Gleichspannung von beispielsweise 12 V angeschlossen. Der in dem Stromkreis fließende Strom wird an einem empfindlichen Strommeßgerät, einem Milliamperemeter, abgelesen (Abb. **144**/2). Ändert sich die Temperatur in der Umgebung

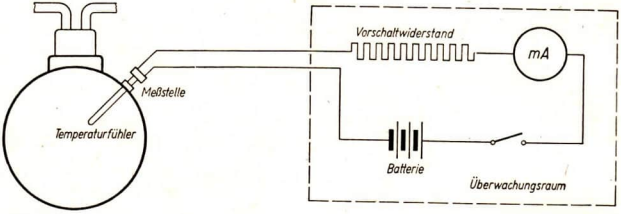


Abb. 144/2. Schaltplan eines elektrischen Widerstandsthermometers (schematisch)

des Temperaturfühlers, so ändert sich dessen Widerstand und dementsprechend auch die Stromstärke. Der Widerstand des Platins nimmt, wie das in Abb. **144**/3 wiedergegebene Diagramm zeigt, bei steigender Temperatur in weiten Temperaturgrenzen nahezu linear zu. Zum Erleichtern des Ablesens kann man das Amperemeter anstatt mit einer Ampereskala unmittelbar mit einer °C-Skala versehen.

Die beschriebene Temperaturmeßanlage arbeitet außerordentlich emp-

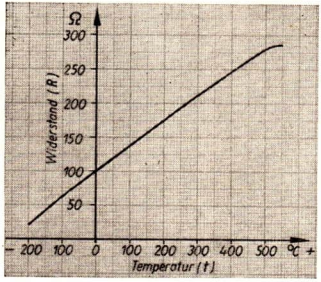


Abb. 144/3. Diagramm der Widerstandsänderung eines Widerstandsthermometers in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Normwiderstand des Temperaturfühlers ist bei 0° C gleich 100 Ω.

findlich und hat den Vorteil, daß sie für eine Fernanzeige gut geeignet ist. Das Anzeigegerät kann sich, vom Temperaturfühler weit entfernt, in einem zentralen Kontrollraum befinden.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Eine 110-V-Glühlampe wird unter Vorschalten eines Schiebewiderstandes an eine Steckdose für 220 V angeschlossen. Gleichzeitig wird die an der Lampe liegende Spannung mittels eines Voltmeters kontrolliert. Fertigen Sie ein Schaltbild der Anordnung an!
2. Entwerfen Sie die schematische Zeichnung eines aus zwei Widerstandsdekaden (Einzelwiderstände 10 Ω und 100 Ω) bestehenden Kurbelwiderstandes! Die Einzelwiderstände sind nebeneinander stehend anzuordnen.
3. Aus Abb. **143/3** sind, um je 0,05 A fortschreitend, die zu den einzelnen Stromstärken gehörenden Widerstandswerte beider Lampen zu entnehmen. Es ist zu berechnen, unter welchen Spannungen die Lampen jeweils standen.
4. Entnehmen Sie aus Abb. **144/3** die Widerstandswerte eines Widerstandsthermometers für 0° C und für 200° C und errechnen Sie daraus, um welchen Bruchteil des Widerstandswertes bei 0° C sich der Widerstand des Temperaturfühlers je 1° Temperaturzunahme ändert!

§ 37. Der unverzweigte Stromkreis — Die Reihenschaltung

1. Die Stromstärke im unverzweigten Stromkreis. Zwei oder mehrere Widerstandsgeräte mit bekanntem Widerstand, wie Spulen, Schiebewiderstände oder andere Stromverbraucher, werden in Reihenschaltung mit einer Gleichstromquelle verbunden. Wir benutzen dazu beispielsweise drei Geräte, deren Widerstandswerte vom Herstellerwerk mit 250 Ω, 315 Ω und 525 Ω angegeben sind, und legen sie hintereinandergeschaltet an eine Akkumulatorbatterie oder an die Gleichspannungsseite des Stromversorgungsgerätes, Spannungsstufe 18 V (Abb. **145/1**). In den Stromkreis schalten wir nacheinander an verschiedene Stellen ein empfindliches Strommeßgerät ein, am besten ein Milliamperemeter.

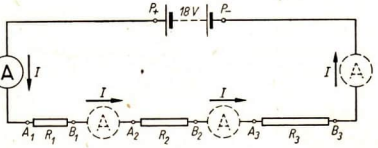


Abb. **145/1.** Die Messung der Stromstärke bei hintereinandergeschalteten Geräten. Das Amperemeter kann an jede beliebige Stelle des Stromkreises gelegt werden.

An sämtlichen Meßstellen wird die gleiche Stromstärke $I = 0{,}016\,\mathrm{A} = 16\,\mathrm{mA}$ abgelesen.

In einem unverzweigten Stromkreis ist die Stromstärke an jeder Stelle des Stromkreises gleich groß.

Die Ursache hierfür ist leicht zu erkennen. Der im Stromkreis fließende Elektronenstrom wird von Elektronen gebildet, die vom negativen zum positiven Pol hin fließen. Da der Stromkreis unverzweigt ist, fließt zur gleichen Zeit durch

jeden Leiterquerschnitt die gleiche Elektronenzahl. Die Stromstärke hat demnach an jeder Stelle des Stromkreises den gleichen Wert.

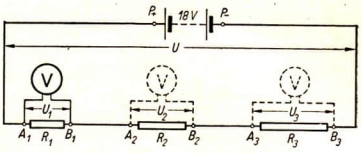


Abb. 146/1
Spannungsmessung im unverzweigten Stromkreis. Das Voltmeter wird zu den einzelnen Widerständen parallelgeschaltet.

2. Die Spannungsverteilung in einem unverzweigten Stromkreis. Ein Voltmeter wird nacheinander an die Anschlußklemmen jedes Gerätes und zum Schluß an die Klemmschrauben der Spannungsquelle selbst gelegt (Abb. 146/1). Gemessen werden

am Widerstand R_1 die Spannung $U_1 = 4{,}0$ V,
am Widerstand R_2 die Spannung $U_2 = 5{,}1$ V,
am Widerstand R_3 die Spannung $U_3 = 8{,}4$ V,
an der Spannungsquelle selbst $U = 17{,}5$ V.

Man sieht, daß die Summe der drei Teilspannungen 4,0 V + 5,1 V + 8,4 V gleich 17,5 V, mithin ebenso groß ist wie die Klemmenspannung der Spannungsquelle selbst. Das gleiche gilt für mehr als drei Teilwiderstände. Daß die Nennspannung 18 V nicht ganz erreicht wird, liegt an dem Spannungsabfall, der bei einer Belastung der Stromquelle eintritt (vgl. § 33,4). Aus dem Versuch folgt:

In einem unverzweigten Leiterkreis verteilt sich die Klemmenspannung der Spannungsquelle auf die einzelnen Leiterstücke. Die Summe der Teilspannungen ist gleich der Klemmenspannung der Stromquelle.

$$U_1 + U_2 + U_3 + \cdots = U\,.$$

3. Die Abhängigkeit der Teilspannungen von den Teilwiderständen. Die Verteilung der Spannung längs des Stromkreises steht mit der Größe der Teilwiderstände im engsten Zusammenhang. Wir bilden für jedes Teilstück des Stromkreises den Quotienten aus der abgelesenen Spannung und dem Widerstand. Es ergibt sich:

$$\frac{U}{R_1} = \frac{4{,}0\ \text{V}}{250\ \Omega} = 0{,}0160\ \text{V}/\Omega\,,$$

$$\frac{U}{R_2} = \frac{5{,}1\ \text{V}}{315\ \Omega} \approx 0{,}0162\ \text{V}/\Omega\,,$$

$$\frac{U}{R_3} = \frac{8{,}4\ \text{V}}{525\ \Omega} = 0{,}0160\ \text{V}/\Omega\,.$$

Diese Quotienten sind einander gleich, wenn man von geringfügigen Meßfehlern absieht. Dasselbe ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetz und deckt sich mit der Tatsache, daß die Stromstärke an allen Stellen des Stromkreises gleich groß ist. Es folgt daraus die Gleichung

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3}$$

oder in Form einer laufenden Proportion:

$$\boldsymbol{U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3}\,.$$

In einem unverzweigten Stromkreis verhalten sich die Teilspannungen längs der einzelnen Teilstücke des Leiters wie die Widerstände der Leiterstücke.

Dabei ist gleichzeitig der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Widerstände der einzelnen Leiterstücke.

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_1 + \boldsymbol{R}_2 + \boldsymbol{R}_3 + \cdots .$$

4. Der Spannungsabfall in einem Stromkreis. Wir verbinden die eine Klemme des Spannungsmessers fest mit dem negativen Pol P_- der Spannungsquelle und legen die andere Anschlußleitung des Spannungsmessers nacheinander an den positiven Pol P_+ und an die Anschlußklemmen $A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3$ der Widerstandsgeräte (Abb. **147**/1).

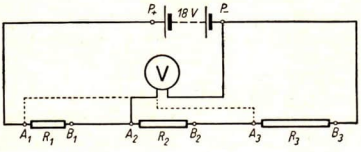


Abb. **147**/1
Messen des Spannungsabfalls in einem unverzweigten Stromkreis. Die eine Anschlußklemme des Spannungsmessers bleibt mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden.

Wir lesen am Spannungsmesser ab:

zwischen P_+ und P_- die Spannung 17,5 V,
zwischen A_1 und P_- die Spannung 17,5 V,
zwischen B_1 und P_- die Spannung 13,5 V,
zwischen A_2 und P_- die Spannung 13,5 V,
zwischen B_2 und P_- die Spannung 8,4 V,
zwischen A_3 und P_- die Spannung 8,4 V,
zwischen B_3 und P_- die Spannung 0 V.

Die Spannung fällt an jedem Widerstand um einen bestimmten Betrag ab, der von der Stromstärke und von der Größe des Einzelwiderstandes abhängt. Zwischen den Klemmen P_+ und A_1, B_1 und A_2, B_2 und A_3 sowie zwischen B_3 und P_- tritt kein Spannungsabfall auf, da der Widerstand der Verbindungsleitungen wegen seiner Kleinheit praktisch vernachlässigt werden kann.

5. Die Verallgemeinerung des Ohmschen Gesetzes. Nach dem Ohmschen Gesetz ist die Stromstärke gleich dem Quotienten aus der Spannung und dem Widerstand. Dies gilt nach unseren bisher gewonnenen Erkenntnissen zunächst für den gesamten Stromkreis. Dabei ist zu beachten, daß auch die Spannungsquelle selbst einen Widerstand hat, den man als den *inneren Widerstand* bezeichnet (Formelzeichen R_i).

Nach den Ergebnissen der vorangehenden Abschnitte ist das Ohmsche Gesetz nunmehr auf jedes Leiterstück anwendbar. Man kann dem Ohmschen Gesetz daher auch folgende Fassung geben:

Die Stärke des durch ein Leiterstück fließenden Stromes ist gleich dem Quotienten aus der an den Enden des Leiterstückes liegenden Spannung und dem Widerstand des Leiterstückes.

6. Der Stromregler. Will man bei gegebener Spannung die Stärke des durch ein Gerät fließenden Stromes auf einen bestimmten Wert einregeln, so legt man

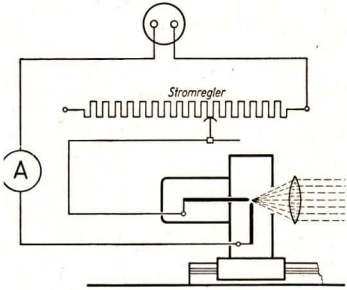


Abb. 148/1. Stromregler im Stromkreis einer Bogenlampe (halbschematisch)

einen verstellbaren Widerstand als *Vorschaltwiderstand* zusammen mit einem Amperemeter in Reihe mit dem stromdurchflossenen Gerät (Abb. 148/1). Beim Experimentieren benutzt man dazu meist einen Schiebewiderstand. Auf Schalttafeln werden auch häufig Kurbelwiderstände eingebaut. Dabei darf nicht vergessen werden, daß die am Gerät liegende Spannung durch das Verstellen des Widerstandes ebenfalls beeinflußt wird; denn die Gesamtspannung verteilt sich auf den Stromverbraucher und den Regelwiderstand im Verhältnis der Widerstandswerte (vgl. 3. Abschnitt).

7. Fragen und Aufgaben:

1. Eine Projektionslampe mit den Anschlußwerten 42 V und 6 A soll an das 220-V-Netz angeschlossen werden. Wie groß muß der vorgeschaltete Widerstand sein?
2. Die Spulen eines Elektromagneten haben einen Widerstand von 60 Ω und sind mit 2 A belastbar. Wieviel Ohm müssen vorgeschaltet werden, wenn man den Magneten an das 220-V-Netz anschließen will?
3. Wie verteilt sich die Spannung von 220 V auf die drei Widerstände von 15 Ω, 20 Ω, 25 Ω, die in einem Stromkreis hintereinandergeschaltet sind? Wie stark ist der in der Leitung fließende Strom?
4. Ein Salmiakelement hat eine Klemmenspannung von 1,2 V und einen inneren Widerstand von 0,1 Ω. Es wird an das Element eine Spule mit einem Widerstand von 6 Ω angeschlossen. Wie groß ist die Stromstärke? Warum erreicht die Stromstärke nicht ganz den zehnfachen Wert, wenn man dieselbe Spule an eine Batterie von zehn solcher Akkumulatorzellen anschließt? Ist darin ein Widerspruch zum Ohmschen Gesetz zu sehen?
5. Ein Drehspulgerät hat einen inneren Widerstand von 50 Ω und erreicht bei 2 mA seinen größten Ausschlag. Was für ein Vorschaltwiderstand muß dem Gerät vorgelegt werden, wenn man es als Voltmeter für einen Meßbereich bis zu 250 V verwenden will?
6. Stellen Sie den im 4. Abschnitt angegebenen Spannungsabfall graphisch dar! Abszissenachse: 1 cm ≙ 100 Ω, Ordinatenachse: 1 cm ≙ 2 V.
7. Zeichnen Sie den Schaltplan eines Stromkreises zum Speisen eines elektrischen Wärmegerätes (Schaltzeichen —▭—) mit eingebautem Schiebewiderstand als Stromregler! Ein Amperemeter ist vorzusehen.

§ 38. Der verzweigte Stromkreis — Die Parallelschaltung

In einem Leiterkreis seien als Beispiel einer Stromverzweigung die einzelnen Geräte parallel zueinander geschaltet. Die Vereinigungspunkte seien unmittelbar mit den Polen der Spannungsquelle verbunden. An allen Geräten liegt demnach

die gleiche Spannung U der Spannungsquelle. Die Zusammenhänge zwischen der Spannung, dem Widerstand und der Stromstärke in einem verzweigten Stromkreis sind zuerst von dem deutschen Physiker *Gustav Robert Kirchhoff*[1] gefunden worden. Um sie experimentell zu bestätigen, stellen wir einen verzweigten Stromkreis aus zwei Glühlampen her, die beide für die Spannung von 12 V, aber für verschiedene Leistungsaufnahmen, nämlich für 5 W und 25 W, bemessen sind. Wir legen sie parallel zueinander zwischen zwei Fußklemmen und schließen diese an eine Gleichspannungsquelle an (Abb. 149/1).

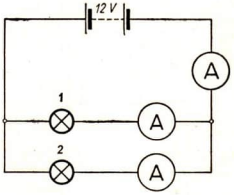


Abb. 149/1. Beispiel einer Stromverzweigung — Zwei parallelgeschaltete Glühlampen (schematisch)

1. Spannung und Stromverteilung im verzweigten Stromkreis. Mißt man mit Hilfe eines Spannungsmessers die Spannungen an jeder Lampe einzeln und an der Spannungsquelle selbst, so findet man folgende schon bekannte Erfahrung bestätigt:

An jedem von mehreren zu einer Spannungsquelle parallelgeschalteten Geräten liegt dieselbe Spannung wie an der Spannungsquelle selbst.

Hier handelt es sich um eine Spannung von 12 V.

Zur Feststellung der Stromstärken legen wir nacheinander in jeden Stromzweig und in den unverzweigten Teil des Stromkreises ein Amperemeter. Wir lesen ab

im Stromzweig mit der Glühlampe *1* die Stromstärke $I_1 = 0{,}42$ A,
im Stromzweig mit der Glühlampe *2* die Stromstärke $I_2 = 2{,}08$ A,
im unverzweigten Teil die Stromstärke $I = 2{,}50$ A.

Wir sehen, daß die Summe der beiden Teilströme

$$I_1 + I_2 = 0{,}42\ \text{A} + 2{,}08\ \text{A} = 2{,}50\ \text{A}$$

ist. Sie ist mithin gleich der Stromstärke im unverzweigten Teil des Stromkreises. Wir erkennen daraus das im verzweigten Stromkreis geltende *1. Stromverteilungsgesetz:*

In einem verzweigten Stromkreis ist die Summe der Teilströme gleich der Stärke des im unverzweigten Teil des Leiters fließenden Stromes.

$$\boldsymbol{I_1 + I_2 = I}.$$

Das gleiche gilt auch für mehr als zwei Zweigleitungen. Es gilt ganz allgemein

$$\boldsymbol{I_1 + I_2 + I_3 + \cdots = I}.$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ist $I_1 = \frac{U}{R_1}$ und $I_2 = \frac{U}{R_2}$.

Es folgt daraus:

$$I_1 : I_2 = \frac{U}{R_1} : \frac{U}{R_2} = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2}.$$

[1] Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887), ein bedeutender deutscher Physiker, der die Physik um eine ganze Reihe wichtiger Erkenntnisse bereicherte. 1847 fand er die für einen verzweigten Stromkreis geltenden Regeln (vgl. S. 122).

Dieses Ergebnis läßt sich auf mehr als zwei Stromzweige erweitern:

$$I_1 : I_2 : I_3 : \cdots = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \cdots .$$

Somit erhält man für den verzweigten Stromkreis das *2. Stromverteilungsgesetz:*

In einem verzweigten Stromkreis verhalten sich die Stärken der Teilströme wie die reziproken Werte der entsprechenden Teilwiderstände.

2. Der Gesamtwiderstand einer Stromverzweigung. Den Gesamtwiderstand R eines verzweigten Stromkreises kann man durch die Teilwiderstände ausdrücken. Für die einzelnen Zweige des Stromkreises gilt

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3} \quad \text{usw.}$$

Nach dem ersten Stromverzweigungsgesetz ist

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \cdots = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \cdots .$$

Andererseits ist der Gesamtwiderstand R gleich dem Quotienten aus der Spannung und der Gesamtstromstärke, mithin $R = \frac{U}{I}$ und somit $I = \frac{U}{R}$.

Es folgt daraus
$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \cdots$$

oder
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots .$$

In einem verzweigten Stromkreis ist der reziproke Wert des Gesamtwiderstandes gleich der Summe der reziproken Werte der Teilwiderstände.

3. Der Spannungsteiler. Die Enden A und B der Wicklung eines Schiebewiderstandes von beispielsweise 420 Ω mit einer Strombelastbarkeit von 2 A werden unmittelbar an die Steckdose des Lichtnetzes angeschlossen. Der Schleifkontakt steht an beliebiger Stelle bei C; an die Klemmen A und C ist ein Voltmeter gelegt (Abb. 150/1). Man kann den ganzen Widerstand AB aus zwei in Reihe geschalteten Widerständen R_1 und R_2 bestehend ansehen, an denen die Teilspannungen U_1 und U_2 auftreten. Die Summe U_1 und U_2 dieser Teilspannungen ist gleich der an den Klemmen A und B liegenden Netzspannung. Nach § 37,3 ist

$$U_1 : U_2 = R_1 : R_2 .$$

Hieraus folgt

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

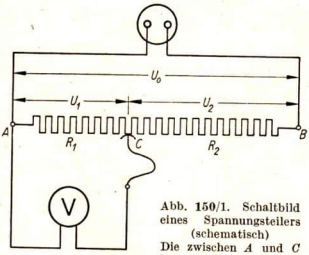


Abb. 150/1. Schaltbild eines Spannungsteilers (schematisch)
Die zwischen A und C herrschende Teilspannung U_1 kann durch Verschieben des Gleitkontakts C zwischen den Grenzen 0 Volt (Stellung bei A) und der vollen Netzspannung (Stellung bei B) geändert werden.

oder
$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{R_1}{R}.$$

Wird der Schleifkontakt C auf den Punkt A hin verschoben, so wird der Teilwiderstand R_1 immer kleiner. Er erreicht schließlich den Wert Null, wenn C die Stellung A erreicht hat. Dementsprechend nimmt auch die Teilspannung U_1 den Wert Null an. Wird dagegen C auf B hin verschoben, so wächst R_1 allmählich bis zum vollen Wert R an, wenn der Schleifkontakt die Stellung B erreicht hat. U_1 steigt dabei auf den Wert der vollen Netzspannung.

Man kann mit Hilfe einer solchen Anordnung jede beliebige Spannung zwischen dem Wert Null und der vollen Spannung der Stromquelle einstellen. Die beschriebene Vorrichtung heißt *Spannungsteiler* oder *Potentiometer*.

Nachteilig wirkt sich bei der Potentiometerschaltung aus, daß ständig ein Querstrom durch den Widerstandsdraht des Spannungsteilers fließt, auch wenn kein Stromverbraucher zwischen A und C angeschlossen ist. Außerdem ist zu beachten, daß das stromverbrauchende Gerät parallel zu einem Teil des Spannungsteilers liegt, wodurch die Stromstärke und die Spannung beeinflußt werden. Man verwendet aus diesem Grunde Spannungsteiler nur in Laboratorien, in Prüffeldern und in ähnlichen Fällen für kurzdauernde Versuche. Auch Rundfunkempfänger sind zum Regeln der Lautstärke mit Potentiometern ausgestattet.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Zu einem Widerstand von 20 Ω werden 8 Ω parallelgeschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?
2. Eine 40-W-Glühlampe für 220 V hat einen Widerstand von etwa 1200 Ω. Welchen Gesamtwiderstand haben zwei, drei, vier und mehr parallelgeschaltete Lampen? Wie groß ist in jedem Einzelfall die Stromstärke? Drücken Sie das Ergebnis auch durch Formelzeichen aus!
3. Ein Strom von 2 A verzweigt sich und durchfließt zwei parallelgeschaltete Widerstände von 15 Ω und 35 Ω. Wie verteilt sich der Strom auf die beiden Widerstände? Wie groß ist die angelegte Spannung? Wie groß ist der Gesamtwiderstand?
4. Lösen Sie die gleiche Aufgabe für die Aufteilung eines Stromes von 2 mA auf drei parallelgeschaltete Widerstände von 20 Ω, 30 Ω und 50 Ω! Wie groß ist der Gesamtwiderstand?
5. Das in § 37,7, Aufg. 5, genannte Drehspulgerät mit einem inneren Widerstand von 50 Ω erreicht für 2 mA seinen Höchstausschlag. Welcher Widerstand muß dem Gerät parallelgeschaltet werden, wenn es als Amperemeter für einen Meßbereich bis zu 5 A verwendet werden soll?
6. Zeichnen Sie den Schaltplan eines als Spannungsteiler verwendeten Schiebewiderstandes für ein elektrisches Wärmegerät als Stromverbraucher! Ein Voltmeter ist vorzusehen.

§ 39. Die Brückenschaltung

In der Wissenschaft und in der Technik wird zum Messen von Widerständen, aber auch zum Anschluß von Meßgeräten, häufig eine besondere Art der Schaltung benutzt, die man als *Brückenschaltung* bezeichnet. Wir lernen die Grundlagen der Brückenschaltung an einem Vorversuch kennen:

1. Vorversuch zur Brückenschaltung. Zwei Schiebewiderstände von beispielsweise 120 Ω und 480 Ω werden parallelgeschaltet und an eine Gleichspannungsquelle für 20 V angeschlossen. Die Stellung der Schleifkontakte der beiden Widerstände ist beliebig. Beide Schleifkontakte C und D werden über ein Voltmeter miteinander verbunden. Den Schaltplan der Versuchsanordnung gibt Abb. **152**/1 wieder. Man wählt als Voltmeter zweckmäßigerweise ein Instrument mit Nullpunktsmittellage, da bei einem solchen Gerät der Zeiger die Möglichkeit hat, nach beiden Seiten hin auszuschlagen. An den Teilwiderständen R_1, R_2, R_3, R_4 treten entsprechend der Größe der Widerstandswerte die Teilspannungen U_1, U_2, U_3, U_4 auf.

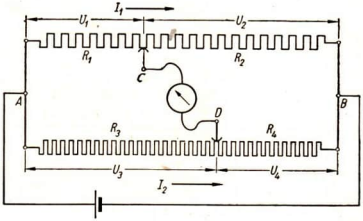


Abb. 152/1. Schaltplan der Versuchsanordnung zur Einführung der Brückenschaltung (schematisch)

Die Verbindung zwischen C und D wirkt wie eine Brücke zwischen beiden Stromzweigen und gibt der ganzen Schaltung ihren Namen. Die Brückenschaltung ist von dem englischen Physiker *Charles Wheatstone*[1] angegeben worden und heißt nach ihm die *Wheatstonesche Brückenschaltung*. Verschiebt man den Schleifkontakt von C auf A hin, so steigt die Spannung zwischen C und D. Wird C dagegen auf B hin verschoben, so sinkt die Spannung zwischen C und D. Sie erreicht den Wert Null, wenn beide Teilspannungen U_1 und U_3 gleich sind.

2. Das Brückengleichgewicht. Die Stromrichtung in der Brücke CD kehrt sich um, wenn man C über den Gleichgewichtspunkt hinaus weiter nach B verschiebt, das heißt, wenn $U_1 > U_3$ wird. Der Zeiger des Meßgerätes schlägt dann nach der anderen Seite aus. Wir denken uns die einzelnen Teile der Schiebewiderstände durch getrennte Widerstände ersetzt und wählen als Darstellung des *Brückenvierecks* die ebenfalls oft verwendete Rautenform (Abb. **152**/2). Durch den Zweig ACB fließe der Strom I_1, durch den Zweig ADB der Strom I_2. Die Größen U_1 bis U_4 sowie

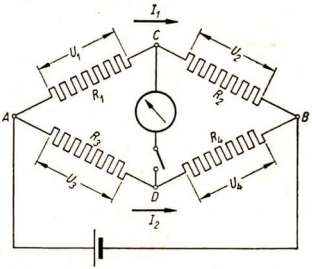


Abb. 152/2. Vier Widerstände in Brückenschaltung

[1] Charles Wheatstone (1802–1875), Professor der Physik am Kings-College in London, erfand 1843 die nach ihm benannte Brückenschaltung.

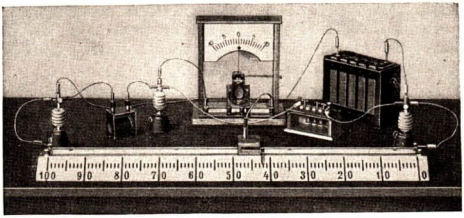


Abb. 153/1. Die Wheatstonesche Brücke, verwendet zur Widerstandsbestimmung

R_1 bis R_4 haben die gleiche Bedeutung wie in Abb. 152/1. Ist die Brücke stromlos, so bezeichnet man sie als im Gleichgewicht befindlich. Dies ist der Fall, wenn

$$U_1 = U_3 \quad \text{und} \quad U_2 = U_4$$

sind. Durch Division erhält man die Proportion

$$U_1 : U_2 = U_3 : U_4.$$

In jedem Leiterzweig verhalten sich aber die Spannungen wie die Teilwiderstände. Es gilt demnach

$$U_1 : U_2 = R_1 : R_2 \quad \text{und} \quad U_3 : U_4 = R_3 : R_4.$$

Somit ergibt sich als Bedingungsgleichung für den Eintritt des Brückengleichgewichts

$$\boldsymbol{R_1 : R_2 = R_3 : R_4}.$$

3. Widerstandsbestimmungen mittels der Wheatstoneschen Brücke. Die Brückenschaltung ermöglicht es in einfacher Weise, die Größe unbekannter Widerstände zu ermitteln. Hierzu dient ein einfacher Draht aus Widerstandsmaterial, der zwischen zwei Klemmschrauben auf einem Brett ausgespannt ist. Auf ihm ist ein Schleifkontakt mit schmaler Auflagefläche verschiebbar angeordnet. In der Meßtechnik bezeichnet man diese Einrichtung ebenfalls als **Wheatstonesche Brücke.** An die Stelle der Widerstände R_3 und R_4 treten die Drahtlängen a und b, in die der ausgespannte Draht durch den Gleitkontakt geteilt wird. An einem unter dem Draht angebrachten Maßstab können diese Drahtlängen unmittelbar abgelesen werden. Wie aus Abb. 153/1 zu ersehen ist, wird der Widerstandsdraht zusammen mit dem zu messenden Widerstand R_x und einem bekannten Vergleichswiderstand R_0

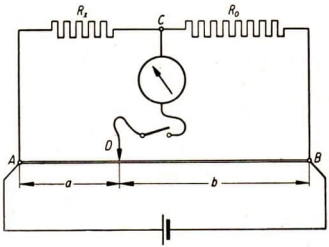


Abb. 153/2. Schaltbild einer Wheatstoneschen Brückenschaltung zur Widerstandsbestimmung

sowie mit einem Galvanometer und einem Schalter zu einer Brückenschaltung verbunden. Als Meßgerät verwendet man an Stelle des Voltmeters ein empfindliches Galvanometer mit Nullpunktsmittellage. Abb. **153**/2 gibt den Schaltplan der Anordnung wieder.

Der Gleitkontakt wird so lange verschoben, bis das Galvanometer beim Schließen des Schalters nicht den geringsten Ausschlag zeigt. In diesem Falle ist die Brücke im Gleichgewicht. Da sich die Widerstände der zu beiden Seiten des Gleitkontakts liegenden Drahtstücke wie die Drahtlängen a und b selbst verhalten, gilt die Gleichung

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{a}{b}.$$

Es ergibt sich demnach

$$R_x = R_0 \cdot \frac{a}{b}.$$

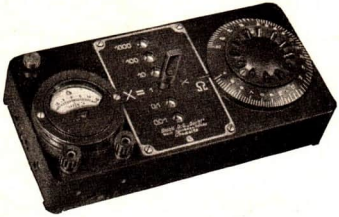


Abb. **154**/1. Technische Meßbrücke Meßbereich 50000 Ω

4. Technische Meßbrücken. In der Technik verwendet man an Stelle der soeben beschriebenen Anordnung häufig besondere Widerstandsmeßgeräte, bei denen sämtliche Schaltteile in einem Kasten vereinigt sind. Abb. **154**/1 zeigt eine technische Meßbrücke. Abb. **154**/2 gibt stark vereinfacht den Schaltplan wieder.

Als Meßwiderstand ist ein Drehwiderstand eingebaut. An der am Drehknopf angebrachten Skalenscheibe kann man den eingestellten Wert des Widerstandes ablesen.

Der zu messende Widerstand wird an die Klemmen A und B gelegt. Beim Messen wird das im Brückenzweig liegende Galvanometer durch eine *Drucktaste* eingeschaltet.

Außer zum Messen von Widerständen verwendet man in der Technik die Brückenschaltung heute in großem Umfang als Schaltteil beim Einbau von Meßgeräten in Schwachstromleitungen. So wird beispielsweise bei dem im § 36,3 erwähnten Widerstandsthermometer das dazugehörige Milliamperemeter häufig über eine Brückenschaltung an das Widerstandsthermometer angeschlossen.

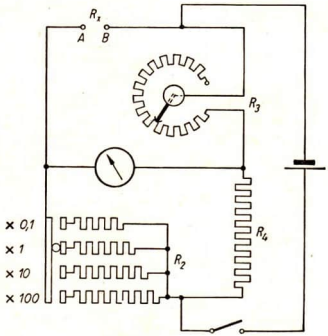


Abb. **154**/2. Stark vereinfachter Schaltplan der in Abbildung **154**/1 wiedergegebenen technischen Meßbrücke
R_2 Stöpselrheostat als veränderlicher Vergleichswiderstand,
R_3 Drehwiderstand,
R_4 fester Vergleichswiderstand,
A, B Anschlußklemmen für den zu messenden Widerstand

5. Fragen und Aufgaben:

1. Ein unbekannter Widerstand wird mit einem geeichten Stöpselwiderstand und einem 1000 mm langen Meßdraht zu einer Wheatstoneschen Brückenschaltung zusammengefügt. Das Brückengleichgewicht ist erreicht, wenn am Stöpselwiderstand 25 Ω eingeschaltet sind und der Gleitkontakt der Brücke dem unbekannten Widerstand eine Drahtlänge von 427 mm zuordnet. Wie groß ist der zu messende Widerstand?

2. Zwei Schiebewiderstände $R_1 = 120\ \Omega$ und $R_2 = 180\ \Omega$ liegen parallel an einer Spannungsquelle von 20 V. Der Schieber des ersten Widerstandes teilt diesen im Verhältnis 2 : 3, der Schieber des zweiten Widerstandes teilt diesen im Verhältnis 3 : 1. Welche Spannung zeigt das in der Brücke zwischen den beiden Schiebern liegende Voltmeter?

3. Zeichnen Sie das Schaltbild einer Brückenschaltung und verwenden Sie im oberen Brückenzweig zweimal das Schaltzeichen für den allgemeinen Widerstand, im unteren Brückenzweig das Schaltzeichen eines Schiebewiderstandes!

§ 40. Energie und Leistung eines elektrischen Stromes

1. Die Abhängigkeit der Stromwärme vom Widerstand. Es ist uns bekannt, daß jeder elektrische Strom den von ihm durchflossenen Leiter erwärmt. In der Technik wird diese Wärmewirkung des elektrischen Stromes in mannigfacher Weise ausgenutzt. Es ist daher von größter Wichtigkeit zu wissen, wovon die Erwärmung eines stromdurchflossenen Drahtes im einzelnen abhängt.

Zur Untersuchung dieser Frage verwenden wir eine Versuchsanordnung, bei der die Stromstärke und der Widerstand unabhängig voneinander geändert werden können. Wir benutzen ein mit Öl oder destilliertem Wasser als Kalorimeterflüssigkeit gefülltes Kalorimeter, in das eine elektrische Widerstandswendel hineintaucht. Die Wendel ist aus zwei Teilwiderständen zusammengesetzt, die wahlweise jeder einzeln in den Stromkreis gelegt oder parallel zueinander und auch hintereinander geschaltet werden können (Abb. 155/1).

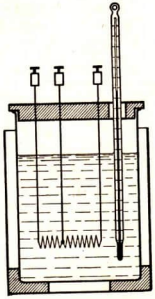


Abb. 155/1
Kalorimeter mit zwei Widerstandswendeln zur Untersuchung der Stromwärme

Der erste Teilwiderstand hat den Wert $R_1 = 1{,}1\ \Omega$, der zweite den Wert $R_2 = 2{,}0\ \Omega$. Parallelgeschaltet haben beide Wendelstücke zusammen den Wert $R_3 \approx 0{,}7\ \Omega$, hintereinandergeschaltet den Wert $R_4 = 3{,}1\ \Omega$.

Wir legen die Teilwiderstände nacheinander einzeln, parallel, hintereinander geschaltet jeweils auf die Dauer von 4 Minuten an eine Gleichspannungsquelle und halten die Stromstärke in jedem Falle konstant, etwa gleich 3 A. Wir bestimmen jedesmal die Temperaturerhöhung. Aus den sich ergebenden Meßwerten stellen wir zusammen mit den Widerstandswerten ein Temperatur-Widerstand-

Diagramm her (Abb. 156/1). Wir sehen, daß die Bildpunkte annähernd auf einer Geraden liegen und folgern daraus, daß die Temperatursteigerung und damit die in einem Leiter vom Strom entwickelte Wärmemenge Q dem Widerstand R des Leiters proportional ist:

$$Q \sim R.$$

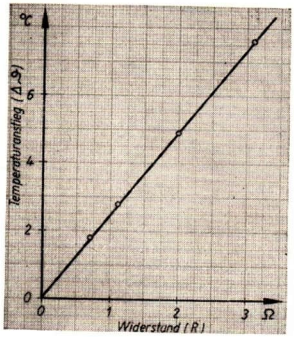


Abb. 156/1. Abhängigkeit der Temperaturerhöhung vom Widerstand bei konstanter Stromstärke und konstanter Zeit

2. Die Abhängigkeit der Stromwärme von der Stromstärke. In der folgenden Versuchsreihe wird stets der gleiche Widerstand $R = 3{,}1\ \Omega$ benutzt. Der Strom wird aber für die Dauer von je 4 Minuten nacheinander auf verschiedene Stärken eingestellt. Die dadurch jeweils hervorgerufene Temperaturerhöhung des Wassers wird ermittelt. Die sich ergebenden Meßwerte werden in einer Tabelle zusammengestellt. In ihr ist die Temperatur zur Vermeidung von Verwechslungen mit der Zeit t durch das Formelzeichen ϑ wiedergegeben.

Abhängigkeit der Temperaturerhöhung von der Stromstärke bei konstantem Widerstand ($R = 3{,}1\ \Omega$) und konstanter Zeit ($t = 4$ min)

Stromstärke (I) A	Wassertemperatur			$\frac{\Delta\vartheta}{I^2}$
	Anfang (ϑ_1) °C	Ende (ϑ_2) °C	Erhöhung ($\Delta\vartheta$) °C	
1	20,5	21,5	1,0	1,00
2	21,5	25,4	3,9	0,98
3	25,4	34,1	8,7	0,97
4	20,5	35,6	15,1	0,94

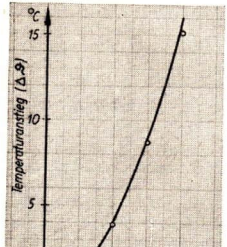


Abb. 156/2 Temperatur-Stromstärke-Diagramm zur Untersuchung der Stromwärme

Stellt man die Temperaturerhöhung als Funktion der Stromstärke graphisch dar, so sieht man, daß die einzelnen Bildpunkte auf einer Kurve liegen, die man angenähert als *Parabel* auffassen kann (Abb. 156/2). Dementsprechend erweist sich der Quotient aus der Temperaturerhöhung und dem Quadrat der Stromstärke nahezu als konstant. Hieraus folgt, daß die entwickelte Wärmemenge dem Quadrat der Stromstärke proportional ist:

$$Q \sim I^2.$$

3. Das Joulesche Gesetz. Die soeben gefundenen beiden Ausdrücke für Q kann man zu einer Proportionalität zusammenfassen. Dabei ist gleichzeitig zu berücksichtigen, daß der Strom je Zeiteinheit immer wieder dieselbe Wärmemenge erzeugt. Die Wärmemenge Q ist demnach auch proportional der Zeit t, während der der Strom fließt. Es ergibt sich

$$Q \sim R \cdot I^2 \cdot t.$$

Führt man eine zunächst unbestimmte Proportionalitätskonstante c ein, so kann man den gefundenen Ausdruck auch als Gleichung wiedergeben:

$$\boldsymbol{Q = c \cdot R \cdot I^2 \cdot t.}$$

Dieser Zusammenhang wurde zuerst im Jahre 1841 von dem englischen Physiker *James Prescott Joule*[1] durch genaue Messungen ermittelt und heißt daher das *Joulesche Gesetz* (1. Form):

Wird ein Widerstand von einem konstanten Strom durchflossen, so ist die entwickelte Wärmemenge dem Widerstand, dem Quadrat der Stromstärke und der Zeit proportional.

Auf Grund des Ohmschen Gesetzes läßt sich die soeben wiedergegebene Gleichung umformen. Da $R = \frac{U}{I}$ ist, ergibt sich

$$\boldsymbol{Q = c \cdot U \cdot I \cdot t.}$$

Hierin ist U die Spannung zwischen den Enden des vom Strom durchflossenen Widerstandes. Das Joulesche Gesetz nimmt dann seine 2. Form an:

Die von einem elektrischen Strom erzeugte Wärmemenge ist proportional der Spannung, der Stromstärke und der Zeit.

Durch Auflösen der Gleichung nach c erhält man

$$c = \frac{Q}{U \cdot I \cdot t}.$$

Man ersieht daraus, daß c in cal/VAs zu messen ist.

Genaue Messungen ergeben den Wert $c = 0{,}239$ cal/VAs. Das Joulesche Gesetz erhält hiermit seine endgültige Form:

$$\boldsymbol{Q = 0{,}239 \cdot U \cdot I \cdot t = 0{,}239 \cdot R \cdot I^2 \cdot t.}$$

4. Das elektrische Wärmeäquivalent. Da Wärme eine Form der Energie ist, muß nach dem Satz von der Erhaltung der Energie der durch einen elektrischen Strom entwickelten Wärmemenge eine ganz bestimmte Menge elektrischer Energie entsprechen. In der Gleichung $Q = c \cdot U \cdot I \cdot t$, die im 3. Abschnitt für die von einem elektrischen Strom entwickelte Wärmemenge aufgestellt wurde, stellt das Produkt $U \cdot I \cdot t$ die vom Strom verbrauchte elektrische Energie und damit die von ihm verrichtete Arbeit dar.

[1] James Prescott Joule (1818–1889), Sohn eines Brauers in Salford bei Manchester, studierte Naturwissenschaften bei Dalton, dem Schöpfer der klassischen Atomtheorie. Schon mit 22 Jahren entdeckte Joule das nach ihm benannte Gesetz über die Stromwärme. Er war einer der bedeutendsten Physiker Englands.

Die durch einen elektrischen Strom verrichtete Arbeit ist gleich dem Produkt aus der Spannung, der Stromstärke und der während des Stromdurchganges verflossenen Zeit:

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

Die *Einheit der elektrischen Energie* im internationalen elektrischen Maßsystem ist die **Voltamperesekunde** (VAs).

Der im Jouleschen Gesetz auftretende konstante Faktor bedeutet nichts anderes als den Umrechnungsfaktor der elektrischen Energie in Wärmeenergie. Er wird das elektrische **Wärmeäquivalent** genannt.

1 Voltamperesekunde ≙ 0,239 cal.

Der Ausdruck $A = U \cdot I \cdot t$ ist gleichbedeutend mit der vom elektrischen Strom verrichteten Arbeit. Verknüpft man das elektrische mit dem mechanischen Wärmeäquivalent, so erhält man das elektrische Äquivalent mechanischer Arbeit.

$$1 \text{ VAs} \triangleq 0{,}239 \text{ cal} \triangleq 0{,}239 \cdot 0{,}427 \text{ kpm} \approx 0{,}102 \text{ kpm} = 1 \text{Joule}$$

oder kurz **1 VAs ≙ 1 Joule.**

Man sieht daraus, daß eine Voltamperesekunde einem Joule gleichwertig ist.

5. Die elektrische Arbeit und die elektrische Leistung. Aus der elektrischen Arbeit läßt sich unmittelbar die elektrische Leistung ableiten. Wir wissen, daß bei mechanischen Vorgängen die Leistung gleich dem Quotienten aus Arbeit und Zeit ist (vgl. LB 9, § 18,1). Das gleiche gilt für die Leistung eines elektrischen Stromes. Sie ist gleich dem Quotienten aus Stromarbeit und Zeit:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t},$$

$$N = U \cdot I.$$

Die Leistung eines elektrischen Stromes ist gleich dem Produkt aus Spannung und Stromstärke.

Die *Einheit der Leistung eines Stromes* ist das **Voltampere** (VA), das man auch als ein **Watt** (W) bezeichnet:

1 VA = 1 W.

Das Tausendfache dieser Leistungseinheit ist das **Kilowatt** (kW), das Millionenfache das **Megawatt** (MW):

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W},$$
$$1 \text{MW} = 1000000 \text{ W}.$$

Es ist üblich geworden, auch die elektrischen Arbeitseinheiten durch die Leistungseinheiten auszudrücken. Es ist

$$1 \text{ VAs} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Joule}.$$

Somit ergibt sich als grundlegende *elektrische Arbeitseinheit* die **Wattsekunde** (Ws). Meist wird ein Vielfaches dieser Arbeitseinheit verwendet, die **Kilowattstunde** (kWh).

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ Joule}.$$

Neuerdings gebraucht man in der Technik auch häufig die Wärmeeinheiten zur Maßangabe von Arbeitsgrößen. Die Umrechnung läßt sich weiter fortsetzen:

$$1\ \text{kWh} \triangleq 3{,}6 \cdot 10^6 \cdot 0{,}102\ \text{kpm} \triangleq \frac{3{,}6 \cdot 10^6 \cdot 0{,}102}{427}\ \text{kcal} \approx 860\ \text{kcal}.$$

6. Technische Heizgeräte. Das Erzeugen von Wärme durch den elektrischen Strom spielt heute in der Technik eine große Rolle. Vom Haushalt und von der Werkstatt her sind uns der Elektrokocher, der elektrische Lötkolben, das Bügeleisen, das Heizkissen, der Tauchsieder bekannt. Darüber hinaus werden elektrische Heizgeräte in immer größerem Umfang in der Technik verwendet. In der Grundschule lernten wir bereits den Elektrostahlofen kennen (vgl. LB 8, § 9,4). Zu nennen sind daneben die in den verschiedensten Formen ausgeführten *Widerstandsöfen*. Als Wärmequellen dienen bei ihnen Silitstäbe, die aus keramischen Stoffen und Kohlepulver gesintert sind. Infolge des hohen Widerstandes, den sie einem hindurchfließenden Strom bieten, geraten sie ins Glühen. Es werden dabei Temperaturen bis zu 2000° C erreicht. Widerstandsöfen werden in der keramischen Industrie zum Brennen feinkeramischer Gegenstände und in der metallverarbeitenden Industrie zum Härten und Glühen von Werkzeugen und Maschinenteilen und zu ähnlichen Zwecken vielfach verwendet. Sie werden als *Kammeröfen*, *Rohröfen* und *Tunnelöfen* gebaut. Die Abbildungen **159/1** und **159/2** greifen aus der Fülle der verschiedenen Typen zwei Beispiele heraus.

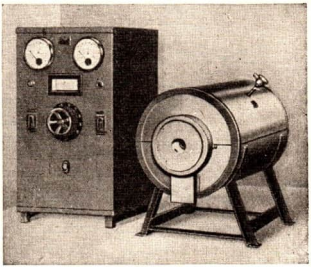


Abb. 159/1. Großer Rohrofen für Laboratorien, Modell RO-02, mit Schaltpult aus dem VEB Elektrokohle, Berlin-Lichtenberg. Widerstandsofen. Die Beheizung erfolgt durch Silitstäbe. Beheizte Rohrlänge 600 mm, erreichte Höchsttemperatur 1350° C. Anschlußwert 9 bis 13,5 kW bei 220/380 V

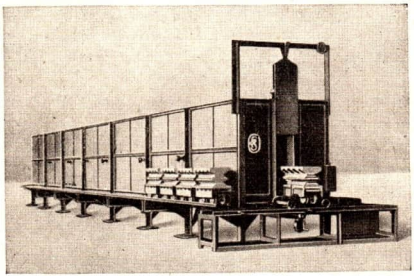


Abb. 159/2. Wagen-Tunnelofen, Typ TUO-23, aus dem VEB Elektrokohle, für 24 Brennwagen, bestimmt zum Brennen keramischer Gegenstände. Durch Silitstäbe beheizt. Anschlußwert 80 kW bei 220/380 V

Beispiele elektrischer Leistungen

Leuchtstofflampe	je NK 0,25 W
Glühlampe	je NK 0,50 W
Hausklingel	0,50 W
Staubsauger	bis 150 W
Elektrische Kochplatte	800 W
Straßenbahnwagen	100 kW
Elektrische Lokomotive	1300 ··· 8800 kW
Elektrischer Großbagger	etwa 6000 kW
Elektrostahlofen	etwa 9000 kW
Fahrraddynamo	2 W
Kraftwerk Klingenberg	270000 kW
Wasserkraftwerk Kuibyschew	2000000 kW

7. Versuche, Fragen und Aufgaben:

1. In Elektrizitätszählern ist die Drehzahl des Motorankers dem Produkt $U \cdot I \cdot t$ proportional. So enthält das Anschlußschild eines Zählers beispielsweise die Angabe: 1 kWh ≙ 2500 Umdrehungen des Ankers. Schalten Sie einige Glühlampen während einer bestimmten Zeit in den Stromkreis ein und ermitteln Sie durch Abzählen der Ankerdrehungen den Verbrauch der Glühlampen an elektrischer Energie!
2. Ermitteln Sie mit dem Elektrizitätszähler zu verschiedenen Zeiten eines Tages, wieviel elektrische Energie im Haushalt verbraucht wird! Stellen Sie den Verbrauch als Funktion der Zeit graphisch dar!
3. Wie stark ist der Betriebsstrom einer 220-V-Lampe für 40 W, für 60 W, für 100 W?
4. Eine Schmelzsicherung für 220 V schmilzt bei einer Belastung von 6 A durch. Welche Leistung läßt sie höchstens durch?
5. Welche Leistung besitzt ein Elektromotor für 220 V, durch den ein Strom von 6,5 A fließt?
6. Eine Werkstatt ist an das 220-V-Netz angeschlossen. Es brennen in ihr sechs 60-W-Lampen; ferner ist ein Tauchsieder für 500 W und ein Motor zu 1,8 kW in Betrieb. Einen Strom von wieviel Ampere muß die Hauptsicherung hindurchlassen?
7. Ein Tauchsieder mit einer Leistungsaufnahme von 600 W erhitzt 1 l Wasser von 20° C gerade bis zum Sieden (100° C). In welcher Zeit nach dem Einschalten beginnt das Wasser zu sieden? Wärmeverluste bleiben unberücksichtigt.

IX. *Das konstante elektrische Feld*

§ 41. Die elektrische Ladung

1. Allgemeines über die elektrische Ladung. Uns ist bereits bekannt, daß wir zwei Arten elektrischer Ladungen zu unterscheiden haben, die *positiven* und die *negativen Ladungen*. Wir wissen, daß alle Ladungen teilbar sind und aus kleinsten Elektrizitätsteilchen bestehen, die selbst unteilbar sind. Die Elektrizität hat mithin atomare Struktur; sie ist selbst eine Erscheinungsform der Materie.

Von Natur aus treten nur negative Elektrizitätsteilchen als freie Ladungsteilchen auf, die man als **Elektronen** bezeichnet. Die außerdem existierenden positiven Elektrizitätsteilchen, die **Positronen,** sind an die Atomkerne gebunden. Von diesen lassen sie sich nur unter besonderen Umständen für Bruchteile von Sekunden abspalten, sie vereinigen sich aber sogleich wieder mit benachbarten Atomkernen.

Jeder Körper ist von Natur aus mit elektrischen Ladungen behaftet, und zwar mit negativen wie mit positiven in gleichem Maß. Diese natürlichen Ladungen halten sich im elektrischen Gleichgewicht; sie werden nach außen hin nicht wirksam. Das Aufladen eines Körpers besteht darin, daß die negative Ladung geändert wird. Entsteht dabei ein Überfluß an Elektronen gegenüber dem Ausgangszustand, so ist der Körper *negativ* geladen. Entsteht auf ihm ein Elektronenmangel, so ist der Körper *positiv* geladen.

Als Elektrizitätsquelle für hochgespannte Ladungen dient neuerdings der uns schon bekannte Bandgenerator (vgl. Abb. **169**/1). An seine Stelle tritt häufig noch die früher verwendete Influenzmaschine. Oft genügt bei physikalischen Versuchen zum Erzeugen schwacher Ladungen auch ein geriebener Hartgummi- oder Glasstab.

2. Kraftwirkungen zwischen elektrisch geladenen Körpern — Das Fadenpendel als Kraftmesser. Man kann einem Körper im allgemeinen nicht ansehen, ob er elektrisch geladen ist oder nicht. Man erkennt dies aber an bestimmten Kraftwirkungen, die in der Umgebung elektrisch geladener Körper auftreten:

> **Gleichartige Ladungen stoßen einander ab, ungleichartige Ladungen ziehen einander an.**

Wir begnügen uns aber nicht mehr mit dieser rein qualitativen Feststellung, sondern werden experimentell untersuchen, wovon die Kraftwirkung im einzelnen abhängig ist. Als Gerät zur Untersuchung dieser Zusammenhänge verwenden wir ein *bifilares* Fadenpendel. Als Pendelkörper dient uns ein leichter Tischtennisball,

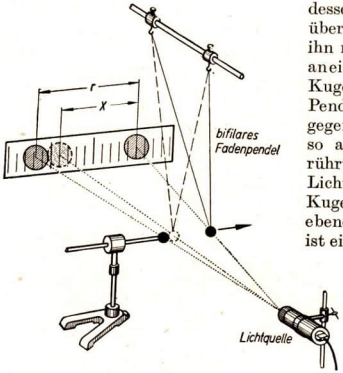


Abb. 162/1. Messung der zwischen zwei Kugeln auftretenden elektrischen Abstoßungskraft mittels eines Fadenpendels

dessen Oberfläche wir durch einen Stanniolüberzug leitend gemacht haben. Wir hängen ihn mittels zweier je 1 m langer Seidenfäden an einem hohen Stativ auf. Neben die hängende Kugel stellen wir in der Schwingungsebene des Pendels eine zweite gleichartige Kugel, die gegen den Tisch und die Erde gut isoliert ist, so auf, daß sie die Pendelkugel gerade berührt (Abb. 162/1). Durch eine punktförmige Lichtquelle werden die Schatten der beiden Kugeln auf einen parallel zur Schwingungsebene stehenden Schirm geworfen. Auf ihm ist ein Maßstab angebracht, an dem die Mittelpunktsentfernung r der Schattenbilder beider Kugeln gemessen wird.

Wir markieren auf dem Maßstab die Ruhelage der Pendelkugel. Den beiden sich berührenden Kugeln erteilen wir durch einen geriebenen Hartgummistab zwei gleich große, gleichartige Ladungen Q_1 und Q_2. Das Pendel erfährt dadurch eine Auslenkung. Wir betrachten im folgenden den Ausschlag X des Pendelschattens als Maß für die Abstoßungskraft P. Vergrößern wir den Mittelpunktsabstand r der beiden Kugeln dadurch, daß wir die feststehende Kugel etwas von der Pendelkugel entfernen, so nimmt X mit wachsendem r ab. Zusammengehörige Werte von r und X sind in der beigefügten Tabelle verzeichnet:

Abhängigkeit des Pendelausschlages vom Kugelabstand

Kugelabstand (r) cm	Pendelausschlag (X) cm	$X \cdot r^2$
19,0	15,0	5415
22,0	11,0	5324
35,0	4,5	5513
52,0	2,0	5408

Man erkennt, daß der Pendelausschlag X und damit auch die Größe der wirksamen Abstoßungskraft P mit wachsendem Kugelabstand r stark abnimmt. Doch erweist sich das Produkt $X \cdot r^2$ als nahezu konstant.

Wir entnehmen daraus, daß die zwischen den Kugeln wirkende Kraft dem Quadrat des Kugelabstandes umgekehrt proportional ist:

$$P \sim \frac{1}{r^2}.$$

3. Die Messung elektrischer Abstoßungskräfte mit Hilfe der Drehwaage. Der französische Physiker *Charles Augustin Coulomb*[1], der die Abhängigkeit der

[1] Charles Augustin Coulomb (1736—1806), ein bedeutender französischer Physiker, zunächst Ingenieur, später ausschließlich als Naturforscher tätig. Er war seit 1781 Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Paris und fand 1785 das nach ihm benannte Gesetz über die Kraftwirkung zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern.

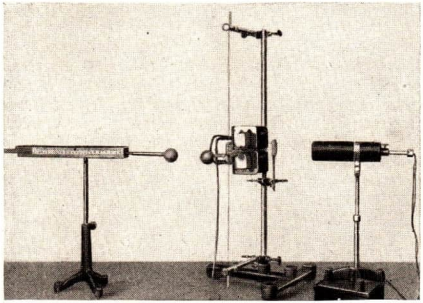


Abb. **163**/1. Behelfsmäßige Drehwaage, zusammengestellt aus Aufbauteilen

zwischen elektrisch geladenen Körpern wirkenden Kräfte untersuchte, benutzte für seine Forschungen eine *Drehwaage*. Die im folgenden wiedergegebenen Versuche wurden mit einer behelfsmäßigen Drehwaage durchgeführt (Abb. **163**/1). Ihre Wirkungsweise ist aus Abb. **163**/2 zu ersehen.

An einem lotrecht ausgespannten dünnen *Torsionsdraht* ist ein leichter Waagebalken befestigt, der in einer waagerechten Ebene schwingen kann. Er trägt an einem Ende mittels eines hochisolierenden Zwischenstückes eine Kugel mit leitender Oberfläche, die *Meßkugel*. Dieser steht eine gleichartige, gleich große Kugel, die *Standkugel*, verschiebbar gegenüber.

Wirkt auf die Meßkugel eine kleine seitliche Kraft senkrecht zum Waagebalken, so dreht sich der Waagebalken der elastischen Kraft des Drahtes entgegen um einen kleinen Winkel α, der der angreifenden Kraft P proportional ist. Zum Messen des Drehwinkels dient wie beim Spiegelgalvanometer ein Lichtzeiger.

Für die hier verwendete Drehwaage gilt folgende Maßangabe: Wirkt auf die Meßkugel die sehr kleine Kraft $P = 1$ mp und beträgt der Skalenabstand 5 m, so

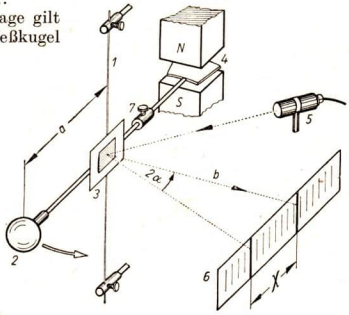


Abb. **163**/2. Die Wirkungsweise der Drehwaage
1 Torsionsdraht,
2 Meßkugel,
3 Spiegel,
4 Dämpfungsflügel,
5 Lichtquelle,
6 Skala,
7 Schiebegewicht,
8 Standkugel.
Durch den zwischen zwei Magnetpolen angeordneten Dämpfungsflügel werden Schwingungen des Waagebalkens unterbunden.

ist der Ausschlag der Lichtmarke auf der Skala $X = 5$ cm. Einem Ausschlag von 1 cm entspricht demnach eine Kraft von 0,2 mp.

Wir wiederholen den oben mit dem Fadenpendel durchgeführten Versuch mit der Drehwaage. Zunächst stellen wir die Entfernung der Kugelmittelpunkte auf $r = 10$ cm ein und verbinden vorübergehend beide Kugeln leitend mit dem großen Konduktor des Bandgenerators. Die Lichtmarke zeigt nach erfolgter Aufladung der Kugeln den Ausschlag $X = 48$ cm. Demnach beträgt die zwischen den Kugeln wirksame Abstoßungskraft $P = 9{,}6$ mp.

Nunmehr vergrößern wir den Mittelpunktsabstand schrittweise und lesen jedesmal die zugehörigen Ausschläge X der Lichtmarke ab (siehe beigefügte Tabelle).

Abhängigkeit der abstoßenden Kraft vom Abstand der Kugeln

Mittelpunktsabstand (r) cm	Ausschlag der Lichtmarke (X) cm	Abstoßungskraft (P) mp	$P \cdot r^2$ mp · cm²
10	48	9,6	960
12	34	6,8	979
14	25	5,0	980
16	19	3,8	973
20	12	2,4	960

Die Werte des Produktes $P \cdot r^2$, das wir wieder bilden, weichen so wenig voneinander ab, daß wir $P \cdot r^2$ als Konstante erkennen. Es gilt also:

$$P \sim \frac{1}{r^2}.$$

Die zwischen zwei gleichartig geladenen Kugeln auftretende Abstoßungskraft ist dem Quadrat des Mittelpunktsabstandes der Kugeln umgekehrt proportional.

Bei dem nun folgenden Versuch halten wir den Mittelpunktsabstand mit $r = 10$ cm konstant und untersuchen, wie X von den Ladungsmengen Q_1 und Q_2 abhängt, die sich auf den Kugeln befinden.

Wir erteilen den beiden Kugeln der Drehwaage zwei Ladungen Q_1 und Q_2, die den Ausschlag $X = 36$ cm hervorrufen. Dann halbieren wir die auf der Standkugel befindliche Ladung Q_1. Wir berühren zu diesem Zweck die Kugel mit einer dritten, gleichartigen und gleich großen Kugel, die an einem isolierenden Stiel befestigt ist, und entfernen diese danach sogleich wieder. Der Ausschlag geht dabei auf 18 cm zurück. Die auf der Standkugel befindlichen Elektronen verteilen sich bei der Berührung gleichmäßig auf beide sich berührenden Kugeln. Es befinden sich dann auf ihnen nach Eintritt des elektrischen Gleichgewichts gleich viel Elektronen, mithin gleiche Ladungsmengen. Beim Fortsetzen dieses Verfahrens sinkt der Ausschlag auf die Werte 9 cm bzw. 4,5 cm. Auf dieselbe Weise kann man die Ladung Q_2 wiederholt halbieren. Auch in diesem Falle verringert sich der Ausschlag im gleichen Verhältnis wie die Ladung Q_2.

Das eindeutige Ergebnis dieser Messungen ist

$$P \sim Q_1,\ P \sim Q_2$$

und somit

$$P \sim Q_1 \cdot Q_2.$$

Die Abstoßungskraft, die zwischen zwei gleichartig geladenen Kugeln auftritt, ist dem Produkt der Ladungen Q_1 und Q_2 proportional.

4. Das Coulombsche Gesetz. Die oben festgestellten Zusammenhänge zwischen der Kraft P, den Ladungen Q_1 und Q_2 und dem Mittelpunktsabstand r lassen sich zu einem Ausdruck zusammenfassen. Es ist

$$P \sim \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

Derselbe Zusammenhang wird durch die Gleichung

$$\boldsymbol{P = f \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}}$$

ausgedrückt, in der f ein zunächst unbekannter Proportionalitätsfaktor ist. Er hängt von der Wahl der Maßeinheiten ab.

Der gleiche Ausdruck gilt auch für die zwischen zwei ungleichartig geladenen Kugeln auftretende Anziehungskraft. Das durch die oben genannte Gleichung wiedergegebene Naturgesetz, das **Coulombsche Gesetz,** gilt in der angegebenen Form strenggenommen nur dann, wenn die Radien der Kugeln klein gegenüber dem Kugelabstand sind.

Die zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern wirksame Anziehungs- oder Abstoßungskraft ist dem Produkt der auf den Körpern befindlichen Ladungsmengen proportional und dem Quadrat des Abstandes umgekehrt proportional.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Entnehmen Sie aus der auf Seite 162 abgedruckten Tabelle die Werte von r und X und zeichnen Sie auf Millimeterpapier die zu den einzelnen Wertepaaren gehörenden Bildpunkte!
   (r auf Abszissenachse, Einheit 1 mm; X auf Ordinatenachse, Einheit 2 mm)
   Legen Sie durch die Bildpunkte eine Kurve!
2. Lösen Sie die gleiche Aufgabe für die aus der Tabelle auf S. 164 entnommenen Werte von r und P!
   (r auf Abszissenachse, Einheit 0,5 cm; P auf Ordinatenachse, Einheit 1 cm)
3. Erläutern Sie, warum eine elektrische Ladung, die sich auf einer isoliert aufgestellten Kugel befindet, jedesmal halbiert wird, wenn man die Kugel mit einer zweiten gleich großen Kugel berührt!
   Warum muß man die bewegliche Kugel vor dem erneuten Heranbringen an die Standkugel mit der Hand berühren, wenn die Wirkung von neuem eintreten soll?

§ 42. Das Messen elektrischer Ladungen

1. Ladung und Stromstärke — Die Ladungseinheit. Eine elektrische Ladung ist ebensowenig unmittelbar wahrzunehmen wie der elektrische Strom. Da wir aber für den elektrischen Strom bereits eine Maßeinheit festgesetzt haben, greifen wir auf diese zurück, um ein Maß für die Ladung zu gewinnen.

Wenn sich Elektronen durch einen Leiter bewegen, so entsteht, wie wir wissen, ein Strom. Die durch den Leiter fließenden Elektronen bilden in ihrer Gesamtheit

eine im Fluß befindliche Ladungsmenge. Die Stromstärke ist davon abhängig, wieviel Elektronen in jeder Sekunde durch den Leiterquerschnitt strömen.

Die Stromstärke I und die in der Zeiteinheit hindurchfließende Ladungsmenge Q sind nach dem Vorangehenden eindeutig einander zugeordnet; sie sind einander proportional:

$$Q \sim I.$$

Ein ähnlicher Zusammenhang besteht zwischen der Ladungsmenge und der Zeitdauer des Stromflusses. Der Durchfluß einer großen Ladungsmenge erfolgt bei einer bestimmten Stromstärke in einer längeren Zeitspanne als der einer kleinen Ladungsmenge. Mithin ermöglicht die Zeitdauer des Stromflusses einen Rückschluß auf die Größe der durchfließenden Ladung. Auch die Ladungsmenge Q und die Zeitdauer t des Stromflusses sind einander proportional:

$$Q \sim t.$$

Aus beiden Zusammenhängen folgt:

Eine durch einen Leiter fließende Ladungsmenge ist proportional der Stromstärke und der Zeitdauer des Stromflusses.

$$Q \sim I \cdot t.$$

Durch Einführen eines Proportionalitätsfaktors läßt sich dieser Ausdruck in die Gleichungsform überführen:

$$Q = k \cdot I \cdot t.$$

Bei geeigneter Wahl der Einheiten nimmt der Proportionalitätsfaktor den Wert 1 an. Man erreicht dies, wenn man als Einheit der Ladung die Ladungsmenge wählt, die beim Hindurchfließen während einer Sekunde einen Strom von der Stärke 1 A hervorruft. Man nennt diese *Ladungseinheit* eine **Amperesekunde** (As) und bezeichnet sie auch als ein **Coulomb** (C).

$$1\ \text{As} = 1\ \text{C}.$$

Die oben erwähnte Gleichung für die Ladungsmenge nimmt dann die Form an:

$$Q = I \cdot t.$$

Eine durch einen Leiter fließende Ladungsmenge ist gleich dem Produkt aus der Stromstärke und der Zeitdauer des Stromflusses. Sie wird in Amperesekunden gemessen.

Beispiel: Eine 60-W-Glühlampe für 220 V wird von einem Strom von 0,27 A gespeist. Sie ist 1,5 Stunden in Betrieb. Die in dieser Zeit hindurchfließende Elektrizitätsmenge beträgt

$$Q = I \cdot t = 0{,}27 \cdot 1{,}5 \cdot 3600\ \text{As} = 1458\ \text{As}.$$

2. Der Stoßausschlag. Die im ersten Abschnitt durchgeführten Überlegungen gelten zunächst nur für Dauerströme von konstanter Stromstärke. Die Ausführungen bedürfen noch einer Ergänzung, wenn man sie auch auf kurz andauernde Ströme mit veränderlicher Stromstärke anwendet. Wir gehen dabei von einem Versuch aus.

Wir laden einen Konduktor durch vorübergehende Berührung mit einer zu einem Bandgenerator führenden Leitung (Abb. **167**/1). Dann berühren wir den Konduktor mit einer zweiten zur Erde führenden Leitung. Der Konduktor

erweist sich danach wieder als ungeladen. Die Ladung ist durch einen nur wenige tausendstel Sekunden andauernden Strom zur Erde abgeflossen. Den Entladungsstrom kann man dadurch wahrnehmbar machen, daß man in die Erdleitung einen hochempfindlichen Strommesser, am besten ein Spiegelgalvanometer, einschaltet. Beim Entladen des Konduktors zeigt das Galvanometer einen Ausschlag, der sehr rasch bis zu einem Höchstwert ansteigt und dann wieder auf Null zurückgeht. Man bezeichnet einen solchen Ausschlag als einen *Stoßausschlag*. Den einen solchen Stoßausschlag hervorrufenden Strom werden wir im folgenden einen *Kurzstrom* nennen.

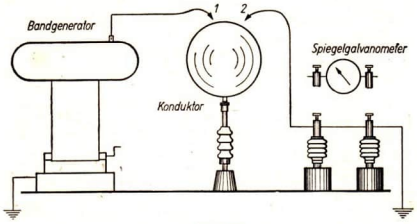


Abb. 167/1
Versuchsanordnung zur Erzeugung eines Stromstoßes beim Entladen eines Konduktors. Der Konduktor wird erst durch Berühren mit der Leitung *1* geladen und dann durch Berühren mit der Leitung 2 entladen.

Ein Stoßausschlag unterscheidet sich von einem Dauerausschlag dadurch, daß er infolge der Trägheit des Meßwerkes seinen Höchstwert erst erreicht, wenn der Strom schon längst aufgehört hat zu fließen. Wissenschaftliche Untersuchungen, die hier nicht wiedergegeben werden können, haben zu folgendem Ergebnis geführt:

Fließt durch ein Meßgerät ein Strom von sehr kurzer Dauer Δt, so zeigt der erreichte Höchstwert des Ausschlages nicht die Stromstärke I, sondern das Produkt $I \cdot \Delta t$ aus Stromstärke und Zeitdauer des Stromflusses an.

Man bezeichnet das Produkt $I \cdot \Delta t$ als einen **Stromstoß.** Er ist, wie man gefunden hat, ein Maß für die in Fluß befindliche Ladungsmenge.

3. Das ballistische Galvanometer. Man kann die im vorangehenden gewonnenen Erkenntnisse dazu verwenden, um die Größe ruhender Ladungsmengen zu ermitteln. Man braucht diese nur in Fluß zu bringen und den dabei in einem empfindlichen Galvanometer auftretenden Stoßausschlag zu beobachten. Als besonders geeignet für diesen Zweck haben sich Drehspulgeräte erwiesen, deren Eigenschwingungszeit groß ist gegenüber der Zeitdauer des Stromstoßes. Man nennt solche Geräte *ballistische Galvanometer*.

Im allgemeinen bezeichnet man Meßgeräte als ballistisch, wenn die Drehspule eine Schwingungszeit von mindestens 30 s hat; doch verlaufen die Stoßausschläge, mit denen wir es hier zu tun haben, so schnell, daß man die meisten Drehspulgeräte mit hinreichender Genauigkeit als ballistische Galvanometer verwenden kann.

Für die Meßpraxis merken wir uns:

Eine Ladungsmenge mißt man mit Hilfe eines ballistischen Galvanometers durch den beim Entladen auftretenden Stoßausschlag. Der Höchstwert des Ausschlages ist ein Maß für die in Fluß geratene Ladungsmenge.

Ballistische Geräte können für wissenschaftliche und technische Zwecke mit Hilfe elektrischer Kurzzeitmesser in Amperesekunden geeicht werden.

4. Die Größe des Proportionalitätsfaktors des Coulombschen Gesetzes. Der mathematische Ausdruck für das Coulombsche Gesetz lautet nach § 41,4

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

Wir können jetzt die Größe des Proportionalitätsfaktors f angeben. Hierbei ist zu beachten, daß bei allen im internationalen elektrischen Maßsystem durchgeführten Rechnungen Längenangaben stets in m auszudrücken sind. Mißt man dementsprechend r in m, Q_1 und Q_2 in C, P in kp, so nimmt der Faktor f, wie hier nur ohne Beweis mitgeteilt werden kann, den Zahlenwert $9{,}2 \cdot 10^8$ an. In der Entfernung von 1 m würden sich also zwei ungleichartige elektrische Ladungen von je 1 C mit einer Kraft $P = 9{,}2 \cdot 10^8$ kp anziehen. Selbst bei einer Herabsetzung der Ladungsmengen auf je ein tausendstel Coulomb würde die Coulombsche Kraft in einer Entfernung von 1 m immer noch 920 kp betragen. Erst wenn man die Größe der Ladungen auf 10^{-6} C herabsetzt, wirken sie in einer Entfernung von 1 m mit einer Kraft von 0,00092 kp = 0,92 p aufeinander, wie sie beim Experimentieren auftreten kann. Daß so große Coulombsche Kräfte wie die vorher erwähnten bisher noch nie experimentell nachgewiesen worden sind, ist dadurch zu erklären, daß es gerade wegen der Größe der auftretenden Kräfte experimentell unmöglich sein dürfte, so große Ladungsmengen voneinander zu trennen.

Der Faktor f ist eine dimensionierte Größe. Man kann seine Dimension leicht ermitteln, wenn man die Coulombsche Gleichung nach f auflöst. Es ist

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

Daraus ergibt sich die Dimensionsgleichung

$$[f] = \frac{[\mathrm{kp}]}{[\mathrm{C}]} \cdot \frac{[\mathrm{m}^2]}{[\mathrm{C}]} = \left[\frac{\mathrm{kp} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2}\right].$$

Es ist

$$f = 9{,}2 \cdot 10^8\,\mathrm{kp} \cdot \mathrm{m}^2/\mathrm{C}^2.$$

Den Wissenschaftlern ist es auch gelungen, die Ladungsmenge eines Elektrons sehr genau zu ermitteln. Man bezeichnet sie als die *Elementarladung* (Formelzeichen e). Ihre Größe ist

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}.$$

Wie man diesen Wert gefunden hat, werden wir in § 45 näher erfahren.

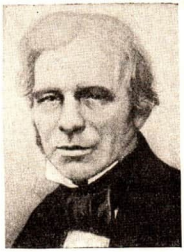
5. Fragen und Aufgaben:

1. Wie groß ist die in einer Stunde durch a) eine 40-W-Glühlampe, b) eine 75-W-Glühlampe fließende Ladungsmenge (Betriebsspannung 220 V)?
2. Mit welcher Kraft würden zwei gleich große Kugeln einander abstoßen, die mit je 1 C geladen sind und einen Mittelpunktsabstand von 1 km haben?
3. Zwei gleich stark geladene Kugeln haben einen Mittelpunktsabstand von 20 cm und ziehen einander mit einer Kraft von 450 p an. Wie groß sind die beiden Ladungen?

4. Wodurch unterscheidet sich ein Stoßausschlag von einem Dauerausschlag? Welche elektrischen Größen werden durch Stoßausschläge gemessen?
5. Erläutern Sie den Begriff des Stromstoßes! In welcher Beziehung steht der Stromstoß zum Stoßausschlag und zur Ladungsmenge?
6. Wieviel Elektronen fließen in einer Sekunde durch eine für 220 V bestimmte 40-W-Glühlampe? (Vgl. Aufgabe 1!)

§ 43. Das elektrische Feld

1. Der Begriff des elektrischen Feldes. Es wurde schon mehrfach darauf hingewiesen, daß das Vorhandensein einer elektrischen Ladung auf einem Körper äußerlich an sich nicht erkennbar ist. Und doch wirkt sich das Aufladen eines Körpers nicht nur auf ihn selbst, sondern auch auf seine Umgebung aus. Der englische Naturforscher *Michael Faraday*[1] erkannte, daß zwischen jedem elektrisch geladenen Körper und seiner Umgebung ein unlösbarer Zusammenhang besteht, und führte den Begriff des **elektrischen Feldes** ein. Er verstand darunter den gesamten Wirkungsbereich der von einem elektrisch geladenen Körper ausgehenden Kräfte.



Michael Faraday (1791—1867)

In Anlehnung an die Forschungen Faradays untersuchen wir den Raum zwischen zwei Konduktoren, die mit den Polen eines Bandgenerators verbunden sind. In diesen Raum bringen wir eine Anzahl kleiner Papierfähnchen, die auf Nadeln leicht drehbar angeordnet sind (Abb. **169**/1). Wird der Bandgenerator in Betrieb gesetzt, so sammeln sich auf den Konduktoren entgegengesetzte

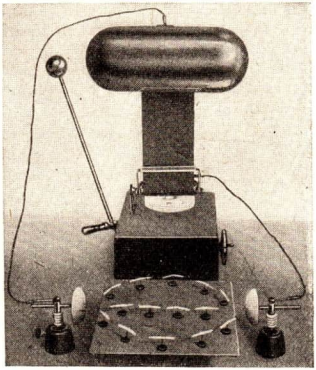


Abb. **169**/1. Veranschaulichung des Feldes zweier halbkugelförmiger Konduktoren durch Papierfähnchen. Diese geben die Richtung der Feldlinien an.

[1] Michael Faraday (1791–1867) war ursprünglich Buchbinder, erwarb sich durch Selbststudium umfassende physikalische und chemische Kenntnisse, wurde Laboratoriumsgehilfe, später Assistent am Physikalischen Institut in London und wurde 1825 der Direktor des Laboratoriums. Faraday war einer der bedeutendsten und erfolgreichsten englischen Naturforscher. Die von ihm erkannten Gesetze der elektrischen und magnetischen Felder wirkten bahnbrechend für die Entwicklung der Naturwissenschaft und der Technik.

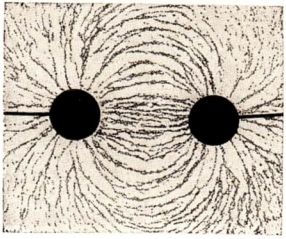
elektrische Ladungen an. Dadurch entsteht in der Umgebung der Konduktoren, insbesondere zwischen ihnen, ein elektrisches Feld. Die Papierfähnchen, die ursprünglich ganz ungeordnet in verschiedene Richtungen zeigten, ordnen sich in der Richtung bestimmter Linien an. Diese sind eine grob modellartige Darstellung der *elektrischen Feldlinien.*

Die **elektrischen Feldlinien** selbst sind durch Abstraktion aus dem Feldbegriff gewonnen und dienen zur Veranschaulichung des Feldes. Sie enden stets in Ladungen verschiedenen Vorzeichens und geben die Bahn an, auf der sich ein elektrisch geladenes Partikelchen beim Übergang von dem einen Konduktor zum anderen verschiebt. Als *Richtungssinn* der Feldlinien wurde die Richtung von der positiven zur negativen Ladung festgesetzt. Werden Konduktoren, zwischen denen ein elektrisches Feld besteht, entladen, so bricht das Feld zusammen. Wie man durch ein in den Entladungsdraht eingeschaltetes empfindliches Galvanometer nachweisen kann, entsteht dabei ein kurz dauernder elektrischer Strom.

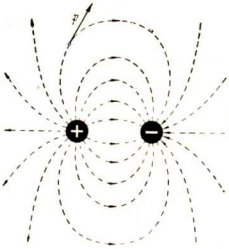
2. Die verschiedenen Formen elektrischer Felder. Der soeben durchgeführte Versuch läßt sich verfeinern, wenn man die Papierfähnchen durch kleinere längliche Körper wie Faserstücke, frischgemahlene Gipskristalle und ähnliches ersetzt. Wir führen folgenden Versuch durch:

In eine flache Glasschale gießen wir einige Millimeter hoch Rizinusöl und verteilen darin durch Umrühren etwas Suppengrieß. In die Schale stellen wir zwei kleine Metallzylinder, die mit den Konduktoren eines Bandgenerators verbunden sind. Sobald die beiden Metallzylinder positiv und negativ aufgeladen werden, ordnen sich die Grießkörnchen zu zusammenhängenden Linien an. Diese vermitteln modellartig ein klares *Bild der elektrischen Feldlinien* (Abb. **170**/1a). Man kann Abb. **170**/1a auch als Bild des Schnittes durch das Feld zweier ungleichartig geladener Kugeln auffassen. Zur Erhöhung der Deutlichkeit ist der charakteristische Verlauf der Feldlinien in Abb. **170**/1b noch einmal schematisch wiedergegeben.

Auch zwischen zwei elektrischen Leitungen, die parallel zueinander verlaufen und unter Spannung stehen, bildet sich ein elektrisches Feld nach Art der Abbildung **170**/1.

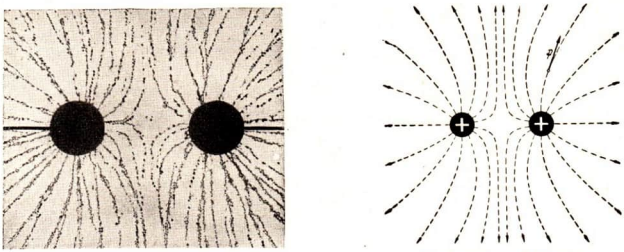


a) Veranschaulichung durch Grießkörner



b) Schematische Zeichnung

Abb. **170**/1. Das elektrische Feld entgegengesetzt geladener Kugeln



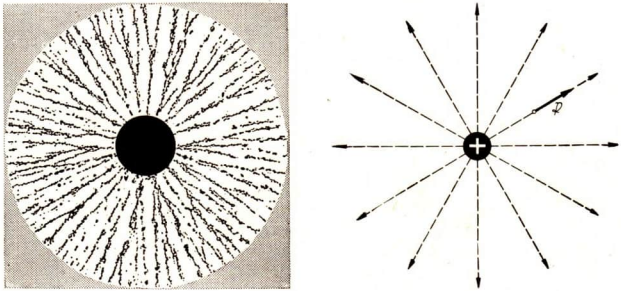
a) Veranschaulichung durch Grießkörner b) schematische Zeichnung

Abb. 171/1. Das elektrische Feld zweier gleichartig geladener Kugeln

Führt man dagegen den beiden Metallzylindern gleichartige Ladungen zu, so entsteht das durch Abb. **171**/1 wiedergegebene Feldlinienbild. Wieder läßt sich Abb. **171**/1 auch als Schnitt durch das Feldlinienbild zweier gleichartig geladener Kugeln auffassen.

Das Feldlinienbild Abb. **171**/2 ist durch einen einzelnen Metallzylinder erzeugt. Es stellt gleichzeitig das elektrische Feld eines einzeln stehenden kugelförmigen Konduktors dar. Wir müssen uns dabei das Feld stets räumlich vorstellen. Alle Feldlinien verlaufen so, als ob sie vom Mittelpunkt ausgingen. Wir bezeichnen das Feld daher als *radiales Feld*.

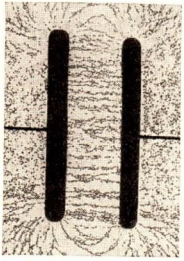
Neben dem radialen Feld ist die durch Abb. **172**/1 wiedergegebene Feldform von besonderer Bedeutung. Wir erhalten dieses Feld, wenn wir zwei Blechstreifen parallel zueinander in die Glasschale legen und durch den Bandgenerator entgegengesetzt aufladen. Räumlich betrachtet gibt uns das Bild eine Vorstellung von



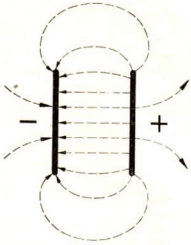
a) Veranschaulichung durch Grießkörner b) schematische Zeichnung

Abb. 171/2. Das radiale elektrische Feld

dem Felde eines Plattenkondensators. Zwischen den Platten des Kondensators verlaufen die Feldlinien parallel zueinander. Dieser Teil des Feldes wird als *homogenes elektrisches Feld* bezeichnet. Die Wirkung der Ladungen beschränkt sich aber nicht auf den Zwischenraum zwischen den Platten. Der äußere nicht homogene Teil des Feldes wird *Streufeld* genannt. Je kleiner der Plattenabstand im Verhältnis zum Durchmesser ist, um so mehr kann das Streufeld gegenüber dem homogenen Feld vernachlässigt werden.



a) Veranschaulichung durch Grießkörner



b) schematische Zeichnung

Abb. 172/1. Das homogene Feld des Plattenkondensators

Der Verlauf der Feldlinien in den Abbildungen **170**/1, **171**/1, **172**/1 vermittelt uns schon rein anschaulich einen Eindruck der im Felde wirksamen Kräfte. Schon *Faraday* wies darauf hin, daß längs der Feldlinien Zugwirkungen und quer zu ihnen Druckwirkungen auftreten. Das Ablesen der Kraftwirkung aus dem Feldlinienverlauf hat sich als sehr fruchtbar erwiesen und erleichtert uns das Verständnis der Kraftwirkungen wesentlich. Auch bei komplizierten Feldern kann man auf dieser Grundlage die Art der wirksamen Kräfte aus dem Feldlinienbild entnehmen (Abb. **172**/2).

3. Die elektrische Feldstärke. Um die im elektrischen Feld wirksamen Kräfte quantitativ zu untersuchen, wiederholen wir den in Abb. **169**/1 wiedergegebenen Versuch. Wir markieren auf der Grundplatte die Feldlinien mit Kreide und entfernen dann die Papierfähnchen. Dann bringen wir als Probekörper ein elektrisches Pendel, bestehend aus einer an einem langen Seidenfaden hängenden Holundermarkkugel, an verschiedene Stellen des Feldes. Es ist folgendes zu beobachten:

1. Erhält die Pendelkugel durch Berührung mit dem positiven Konduktor eine positive Ladung, so bewegt sie sich längs einer Feldlinie zum negativen Konduktor hin. Wir erkennen daraus:

   Ist A ein beliebiger Feldpunkt, so bestimmt die durch A gehende Feldlinie die Richtung der dort auf eine positive Ladung ausgeübten Feldkraft. Die Richtung dieser Feldkraft fällt in die Richtung der Tangente an die Feldlinie (vgl. Abb. **170**/1).

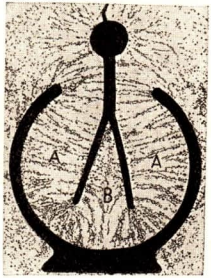


Abb. 172/2. Feldlinienbild eines Elektroskopmodells. Die elektrischen Feldlinien veranschaulichen die Wirkung der in einem Elektroskop auftretenden Kräfte. Anziehung bei A, Abstoßung bei B

2. Führt man das elektrische Pendel zwischen zwei Kugelkonduktoren an einer elektrischen Feldlinie entlang, so ändert sich die Größe des Pendelausschlages, gemessen gegen die Vertikale, von Ort zu Ort.

Darüber hinaus haben sehr genau durchgeführte Untersuchungen zu der Erkenntnis geführt, daß die auf den Probekörper ausgeübte Coulombsche Feldkraft $\mathfrak{P}$ nicht nur durch die Lage der Meßstelle im Feld bedingt ist. Es hat sich erwiesen, daß sie der Ladung Q des Probekörpers proportional ist. Mithin ist der Quotient $\frac{\mathfrak{P}}{Q}$ aus der Feldkraft und der Ladung des Probekörpers als Maß für die Stärke des Feldes an der betreffenden Stelle verwendbar. Man bezeichnet ihn als die **elektrische Feldstärke** (Formelzeichen $\mathfrak{E}$). Durch die Schreibart des Formelzeichens wird zum Ausdruck gebracht, daß die Feldstärke ein Vektor ist; denn sie hat an jeder Stelle des Feldes eine bestimmte Richtung. Es ist

$$\mathfrak{E} = \frac{\mathfrak{P}}{Q}.$$

Der Betrag der elektrischen Feldstärke, der uns zumeist nur interessiert, hat das Formelzeichen E und ist festgelegt durch die Gleichung

$$E = \frac{P}{Q}.$$

Der Betrag der elektrischen Feldstärke an einer Stelle des elektrischen Feldes ist gleich dem Quotienten aus dem Betrag der an der betreffenden Stelle wirksamen Coulombschen Kraft und der dort befindlichen Ladungsmenge.

Wir werden in § 44,2 erfahren, daß es noch eine zweite Möglichkeit gibt, die Feldstärke mathematisch zu erfassen, und werden im Zusammenhang damit die in der Wissenschaft und in der Technik verwendete Einheit der Feldstärke kennenlernen.

5. Die elektrische Gasreinigung. Eine technisch wichtige Anwendung der Gesetze des elektrischen Feldes ist das Verfahren der *elektrischen Gasreinigung*, das in vielen Industriezweigen benutzt wird.

Zur Erläuterung des technischen Verfahrens führen wir einen Schauversuch durch. Abbildung **173**/1 stellt eine aus Blech hergestellte, luftdichte Kammer dar, deren Vorder- und Rückwand aus zwei Glasscheiben gebildet werden. Die Blechwände der Kammer sind geerdet. In der Mitte ist isoliert ein dünner Draht ausgespannt, der gegen die Wand der Kammer von einem Bandgenerator her eine Spannung von 100 kV erhält. Zur Veranschaulichung des staubhaltigen Gases dient Zigarettenrauch, der mit einer Wasserstrahlpumpe in die Kammer eingesaugt wird. Es zeigt sich, daß sich der weiße Rauch beim Anlegen der Spannung sogleich

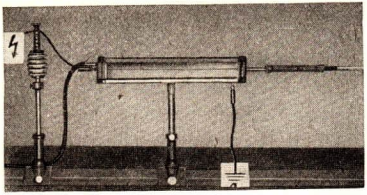


Abb. **173**/1. Modellversuch zur elektrischen Gasreinigung. Rechts tritt rauchhaltige Luft in die Kammer ein. Links wird reine Luft abgesaugt.

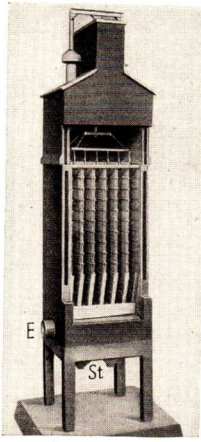


Abb. **174**/1. Modell eines Elektro-Filterschlotes. Die Sprühdrähte in den senkrechten Kammern sind nicht sichtbar.
E Gaseinlaß, *St* Staubbunker

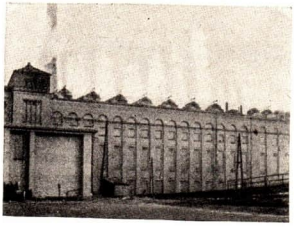
an den Wänden niederschlägt. Läßt man den Rauch in kontinuierlichem Strom in die Kammer eintreten, so wird die rauchhaltige Luft durch diese Einrichtung, die man als *Elektrofilter* bezeichnet, so stark gereinigt, daß die Luft rauchfrei abgesaugt werden kann.

Der Querschnitt durch das elektrische Feld der Kammer wird angenähert durch Abb. **171**/2 wiedergegeben. Bei genügend großer Feldstärke setzt an dem Draht eine im Dunkeln sichtbare *Sprühentladung* ein. Dadurch werden zahlreiche Elektronen frei, die sich an neutrale Gasmoleküle anlagern. Die nunmehr elektrisch geladenen Gasmoleküle wandern im Feld unter der Wirkung der Feldkraft nach außen weiter. An den Kammerwänden schlagen sich dann die negativen Rauchteilchen nieder, so daß die Luft gefiltert wird.

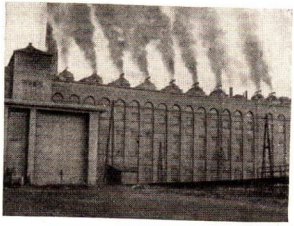
In den in der Technik verwendeten Elektrofiltern ordnet man den *Sprühdraht* meist lotrecht an. Die Staubteilchen fallen von den Wänden der Kammer ab und sammeln sich in einem darunter befindlichen *Staubbunker*. Will man größere Luftmengen filtern, so teilt man den Strom der staubhaltigen Luft durch lotrechte Wände, zwischen denen dann jeweils mehrere Sprühdrähte angeordnet sind. Eine solche Anordnung heißt *Filterschlot*.

Abbildung **174**/1 zeigt das Modell eines *Elektro-Filterschlotes*. Meist enthalten Brikettfabriken mehrere solcher Filterschlote, die die Abgase der Mahl- und Trockenanlagen sowie der Stempelpressen von Kohlenstaub zu reinigen haben (Abb. **174**/2).

In erheblichem Umfange werden die Elektrofilter in den Zementfabriken und in der Schwefelindustrie verwendet. In den Röstanlagen der schwefelhaltigen Erze kann man 98% des wertvollen Metallstaubes zurückgewinnen, der in den Abgasen enthalten ist.



a) in Betrieb



b) außer Betrieb

Abb. **174**/2. Elektrofilter einer Brikettfabrik

5. Fragen und Aufgaben:

1. Nennen Sie charakteristische Formen elektrischer Felder und erläutern Sie am Feldlinienbild die Eigenart des Feldes!
2. Was geschieht, wenn man in einem elektrischen Feld, das zwischen zwei ungleichartig geladenen Kugeln besteht, einen leichten ungeladenen Probekörper an die positive Kugel heranbringt und ihn dann sich selbst überläßt?
3. Beantworten Sie die Frage 2 für den Fall, daß es sich um das Radialfeld einer einzelnen positiv geladenen Kugel handelt!
4. Erläutern Sie, warum man Abb. **170**/1 als Schnitt durch das elektrische Feld
   a) zweier entgegengesetzt geladener Zylinder,
   b) zweier entgegengesetzt geladener Kugeln,
   c) zweier unter Spannung stehender paralleler Leiter auffassen kann!
5. Inwiefern ist man berechtigt, von der Stärke eines elektrischen Feldes zu sprechen? Wie wird sie definiert?
6. Aus welchem Grunde ist die Feldstärke eine vektorielle Größe? Erläutern Sie den Unterschied der Bedeutung von $\mathfrak{E}$ und E!
7. Erläutern Sie die Wirkungsweise eines Elektrofilters!

§ 44. Die Feldstärke im homogenen Feld — Die Einheit der Feldstärke

1. Die Feldstärke im homogenen Feld eines Plattenkondensators. Unter allen elektrischen Feldern hat das homogene Feld die einfachste Form. Im homogenen elektrischen Feld häufen sich die elektrischen Feldlinien an keiner Stelle. Es ist daher zu erwarten, daß sich die Feldstärke im homogenen Feld besonders einfach bestimmen läßt und daß sie an allen Stellen des Feldes gleich groß ist.

Wir untersuchen die Kraftwirkung, der ein elektrisch geladener Probekörper im homogenen Feld unterworfen ist, und benutzen dazu wieder die Drehwaage (Abb. **175**/1).

Es wird der Reihe nach geprüft die Abhängigkeit der Kraft von der Spannung des Kondensators, vom Plattenabstand und von der Größe der Ladung des Probekörpers:

a) Die Abhängigkeit der Coulombschen Kraft von der Kondensatorspannung. Wir stellen die Kondensatorplatten lotrecht in einem gegenseitigen Abstand von $d = 10$ cm auf und erden die eine Platte. Auf die andere wird vom Bandgenerator her eine kräftige Ladung übertragen und dadurch zwischen beiden Platten eine Spannung von einigen Kilovolt erzeugt. Als Probekörper dient eine sehr dünne, leichte Metallscheibe, die am Waagebalken der Drehwaage befestigt ist. Durch kurzzeitiges Berühren mit einem Draht, der zu dem einen Pol einer Gleichspannungsquelle für 220 V hinführt, wird dem Probekörper ebenfalls eine Ladung erteilt. Die Drehwaage zeigt einen Ausschlag von $X = 8$ cm. Dem

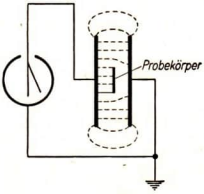


Abb. **175**/1. Schaltbild einer Versuchsanordnung zur Bestimmung der Feldstärke des homogenen Feldes eines Plattenkondensators. Zwischen zwei großen Kondensatorplatten befindet sich als Probekörper eine kleine leichte Metallscheibe, die in vertikaler Stellung an dem einen Ende des Waagebalkens einer Drehwaage befestigt ist.

entspricht nach den Angaben in § 41, 3 eine Kraft $P = 1{,}6$ mp. Überbrückt man den Zwischenraum zwischen den Kondensatorplatten durch einen Papierstreifen, so gehen die Kondensatorspannung U und der Ausschlag X langsam und stetig zurück. Zusammengehörige Wertepaare von U und X werden in einem *Kraft-Spannung-Diagramm* als Bildpunkte wiedergegeben. Man sieht, daß sie annähernd auf einer Geraden durch den Nullpunkt liegen (Abb. **176**/1). Wir entnehmen daraus:

$$P \sim U.$$

Im homogenen Feld eines Plattenkondensators ist bei konstantem Plattenabstand die auf eine Probeladung ausgeübte Kraft der Kondensatorspannung proportional.

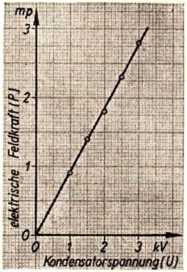


Abb. **176**/1. Diagramm zur Abhängigkeit der Feldkraft von der Kondensatorspannung

b) Die Abhängigkeit der Coulombschen Kraft vom Plattenabstand. In der folgenden Meßreihe halten wir die Kondensatorspannung $U = 3$ kV konstant, verändern aber den Abstand d der Kondensatorplatten. Die abgelesenen Meßwerte des Plattenabstandes und der Feldkraft P sind aus der beigefügten Tabelle zu entnehmen.

Abhängigkeit der Feldkraft vom Plattenabstand
Kondensatorspannung 3 kV

Plattenabstand (d) cm	Lichtzeigerausschlag (X) cm	Feldkraft (P) mp	$P \cdot d$ mp · cm
6	24	4,8	28,8
8	18	3,6	28,8
10	14	2,8	28,0
12	12	2,4	28,8

Wir erkennen, daß das Produkt $P \cdot d$ annähernd konstant ist, und folgern daraus:

$$P \sim \frac{1}{d}.$$

Im homogenen Feld ist bei konstanter Spannung die Feldkraft dem Plattenabstand umgekehrt proportional.

c) Abhängigkeit der Kraft von der Ladung. Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Feldkraft von der Ladung Q des Probekörpers werden diesem immer stärkere Ladungen zugeführt. Es ergibt sich

$$P \sim Q.$$

Die auf den Probekörper in einem homogenen Feld ausgeübte Feldkraft ist der Ladung des Probekörpers proportional.

2. Die Einheit der Feldstärke. Die ermittelten Abhängigkeiten der Feldkraft P von Q, U und d kann man zu einem Ausdruck zusammenfassen. Es ergibt sich

$$P \sim \frac{Q \cdot U}{d}.$$

Dieses Ergebnis läßt sich unter Einfügung eines Proportionalitätsfaktors a durch eine Gleichung ausdrücken. Man erhält

$$P = a \cdot \frac{Q \cdot U}{d} \tag{1}$$

oder nach Multiplikation mit d

$$P \cdot d = a \cdot Q \cdot U. \tag{2}$$

Der Proportionalitätsfaktor nimmt den Zahlenwert 1 an, wenn die Krafteinheit in geeigneter Weise gewählt wird.

Auf der rechten Seite der Gleichung (2) steht eine Größe, die in Voltamperesekunden (VAs) gemessen wird. Nach § 40,4 ist

$$1 \text{ VAs} \triangleq 1 \text{ Joule} = 10^7 \text{ erg} = 10^7 \text{ dyncm}.$$

Wird auf der linken Seite der Gleichung d in m, mithin in 10^2 cm gemessen, so muß P ein Vielfaches der Krafteinheit 10^5 dyn sein, da die Maßeinheiten auf beiden Seiten der Gleichung übereinstimmen müssen. Wie wir aber schon von der 9. Klasse her wissen, bezeichnet man 10^5 dyn als ein Großdyn (Dyn) oder ein **Newton.** Vergleiche dazu LB 9, § 15,3! Es ist

$$1 \text{ Dyn} = 10^5 \text{ dyn} = \frac{10^5}{981} \text{ p} \approx 0{,}102 \text{ kp}.$$

Mißt man dementsprechend die Feldkraft P in Dyn, den Plattenabstand d in m, so nimmt Gleichung (2) die Form an:

$$P \cdot d = Q \cdot U.$$

Mithin gilt auch

$$\frac{P}{Q} = \frac{U}{d}.$$

Der links stehende Ausdruck ist gleich dem Betrag E der Feldstärke $\mathfrak{E}$. Für die Feldstärke in einem homogenen Feld besteht demnach die Gleichung:

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

Die *Einheit der Feldstärke* ist ein **Volt je Meter** (V/m). Die Kräfte sind hierbei in der Krafteinheit Großdyn zu messen.

Im homogenen Feld eines Plattenkondensators ist der Betrag der Feldstärke gleich dem Quotienten aus der Kondensatorspannung und dem Plattenabstand.

Da die Spannung U zwischen zwei beliebigen Punkten der beiden Platten des Kondensators den gleichen Wert hat und der Plattenabstand d überall gleich groß ist, ist der Quotient $\frac{U}{d}$ unabhängig davon, an welcher Stelle des homogenen Feldes sich der Probekörper befindet. Es folgt daraus:

Die Feldstärke eines homogenen Feldes ist im gesamten Feldraum konstant.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Geben Sie an, wie man die elektrische Feldstärke
   a) mit Hilfe der auf einen Probekörper einwirkenden Feldkraft,
   b) mit Hilfe der zwischen den Grenzflächen des Feldes herrschenden Spannung
   definieren kann!
2. Berechnen Sie aus den in den Abschnitten 1a und 1b angegebenen Daten die Ladung des Probekörpers!
3. Welche Beträge der Feldkraft P sind zu erwarten, wenn unter sonst unveränderten Bedingungen bei dem im Abschnitt 1a angegebenen Versuch eine Spannung von 3,3 kV, bei der in 1b beschriebenen Versuchsreihe ein Plattenabstand von 4 cm gemessen wird?
4. Ein Plattenkondensator ist bei einem Plattenabstand von $d = 10$ cm auf $U = 10$ kV geladen. Berechnen Sie die elektrische Feldstärke in V/m, in Dyn/C, in dyn/C!
5. Welche Feldkraft wirkt in dem homogenen Feld des in Aufgabe 4 angegebenen Kondensators auf einen Probekörper mit der Ladung $Q = 3 \cdot 10^{-10}$ C?
6. Verringert man den Abstand d, so nimmt die Feldstärke zu. Bei welchem Abstand wird für den in Aufgabe 4 angegebenen Plattenkondensator die Feldstärke
   $$E = 2000000 \text{ V/m erreicht?}$$
7. Berechnen Sie mit Hilfe der Gleichung $\frac{P}{Q} = \frac{U}{d}$ die Größe der Ladung, die sich auf dem in Abschnitt 1a erwähnten Probekörper befindet! Es sei $P = 2{,}67$ mp, $U = 3$ kV, $d = 0{,}1$ m. Die auf Seite 177 erfolgte Maßfestsetzung der Kräfte ist zu beachten.

§ 45. Das Messen der Elementarladung

1. Der Schwebeversuch. Auf Grund der in den vorangehenden Paragraphen gewonnenen Kenntnisse sind wir nunmehr in der Lage, die Versuche und Überlegungen zu verstehen, die zur Ermittlung der Größe der Elementarladung geführt haben. Zur Erleichterung des Verständnisses führen wir einen Vorversuch durch:

Zwei große, leichte Metallplatten (Blechscheiben oder Drahtnetze) halten wir an isolierenden Handgriffen in waagerechter Lage, so daß sie einen Kondensator bilden. Beide Platten sind durch biegsame Leitungen mit den Polen eines Bandgenerators verbunden (Abb. 178/1). In das zwischen den beiden Platten vorhandene homogene Feld bringen wir eine Seifenblase, die wir mittels einer mit einem isolierenden Mundstück versehenen Pfeife erzeugen. Die Pfeife selbst verbinden wir mit demselben Pol des Bandgenerators, mit dem die untere Platte verbunden ist.

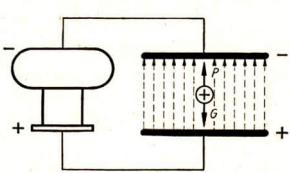


Abb. 178/1. Schwebeversuch. Eine elektrisch geladene Seifenblase schwebt im elektrischen Feld.

Die Seifenblase wird durch ihr Gewicht G nach unten gezogen. Nach oben dagegen wirkt auf sie die Feld-

kraft P ein. Durch Verändern des Plattenabstandes kann man erreichen, daß sich die Feldkraft und das Gewicht der Seifenblase das Gleichgewicht halten; es ist dann $P = G$. Die Seifenblase schwebt im Feld.

2. Der Millikan-Versuch. Im Jahre 1910 faßte der österreichische Physiker *Ehrenhaft* den Gedanken, diese *Schwebemethode* auf mikroskopisch kleine Öltröpfchen anzuwenden und auf diese Weise die kleinsten in der Natur vorkommenden Ladungen zu ermitteln. Seine Gedanken wurden von dem amerikanischen Physiker *Millikan*[1] aufgegriffen und führten in den Jahren 1910 bis 1917 zur Ermittlung der Größe der Elementarladung.

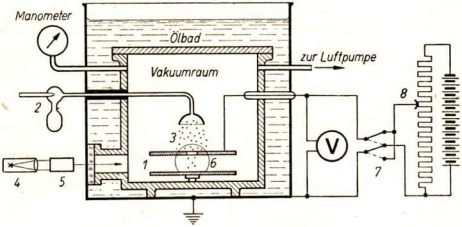


Abb. 179/1. Versuchsanordnung zur Bestimmung der elektrischen Elementarladung nach Millikan (stark vereinfacht)
1 Kondensator,
2 Zerstäuber,
3 Öltröpfchen im elektrischen Feld,
4 Beleuchtungslampe,
5 Wasserkühlung,
6 Beobachtungsfenster,
7 Umschalter,
8 Spannungsteiler

Die von *Millikan* zusammengestellte Versuchsanordnung ist in Abb. **179**/1 stark schematisiert wiedergegeben. Ein Kondensator befindet sich in einem luftverdünnten Raum, der zur Erhaltung einer bestimmten Temperatur in einem Ölbad untergebracht ist. Durch einen Zerstäuber wird Paraffinöl fein zerstäubt und in den Vakuumraum geblasen. Die Öltröpfchen werden dabei durch Reibung elektrisch. Einzelne Tröpfchen treten durch eine kleine Öffnung der oberen Kondensatorplatte in das elektrische Feld. Diese Tröpfchen werden durch eine Lampe beleuchtet und durch ein Glasfenster mit Hilfe eines Mikroskops (im Bild von vorn) beobachtet. Die Kondensatorspannung U wird durch einen Spannungsteiler so eingestellt, daß das beobachtete Öltröpfchen in gleichbleibender Höhe schwebt. Es gilt dann für das Gewicht G des Öltröpfchens und die ihm entgegenwirkende Feldkraft P die Gleichung

$$G = P = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d},$$

mithin

$$Q = \frac{G \cdot d}{U}.$$

Das Gewicht wird unter Berücksichtigung der Wichte des Öls aus der Geschwindigkeit errechnet, mit der der Öltropfen im feldfreien Kondensator absinkt.

Die mit größter Sorgfalt durchgeführten Messungen ergaben, daß die so ermittelten Tröpfchenladungen zwar voneinander abweichen, aber stets ein ganzzahliges Vielfaches einer bestimmten kleinsten Ladungsmenge e sind. Diese

[1] Robert Andrew Millikan (geb. 1868), ein bedeutender amerikanischer Physiker, Professor in Pasadena (USA)

kleinste in der Natur vorkommende Ladung wird **Elementarladung** oder auch **elektrisches Elementarquantum** genannt. Ihre Größe beträgt

$$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}.$$

Es hat sich gezeigt, daß ein Elektron stets die negative Elementarladung trägt.

Die Elementarladung ist die natürliche Ladungseinheit. Wegen ihrer Kleinheit ist sie aber für den praktischen Gebrauch zur Verwendung als Ladungseinheit wenig geeignet. Die internationale Ladungseinheit, das Coulomb, ist ein Vielfaches der Elementarladung. Es ist

$$1\,\mathrm{C} = \frac{1}{1{,}60 \cdot 10^{-19}}\,e = 6{,}25 \cdot 10^{18} \cdot e\,.$$

Trägt beispielsweise ein Konduktor die negative Ladung $Q = 10^{-8}$ C, so besitzt er

$$n = 10^{-8} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{18} = 6{,}25 \cdot 10^{10}$$

Elektronen im Überschuß. Ein Konduktor, der die positive Ladung $Q = 10^{-8}$ C trägt, enthält entsprechend n Elektronen weniger, als zum Ausgleich der positiven Atomladungen notwendig sind.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Erläutern Sie die Einzelheiten der Abbildung **179/1**!
2. Überlegen Sie, aus welchem Grunde der Beleuchtungslampe eine Wasserkühlung (*5*) vorgeschaltet ist!
3. Zeichnen Sie den Umschalter (*7*) in vergrößertem Maßstab! Überlegen Sie, warum sein Einbau erforderlich ist!
4. Wie man durch Rechnung nachprüfen kann, beträgt die Ladung des Probekörpers bei dem in § 44, 1a angegebenen Versuch $8{,}73 \cdot 10^{-10}$ C. Wir nehmen die Ladung als negativ an. Aus wieviel Elementarladungen besteht sie?

§ 46. Die Kapazität

1. Die Definition der Kapazität. Uns ist bereits bekannt, daß Kondensatoren ein großes Aufnahmevermögen für elektrische Ladungen haben. Wir werden nunmehr untersuchen, wovon diese Eigenschaft abhängt. Als Ladungsträger wählen wir für die folgenden Versuche einen technischen Blockkondensator. Wir laden ihn bei verschiedenen Spannungen und bedienen uns dazu eines Spannungsteilers, der an eine Gleichspannungsquelle von 220 V angeschlossen ist (Abb. **180/1**). Die Anschlußleitung zur Spannungsquelle führt über eine Morsetaste.

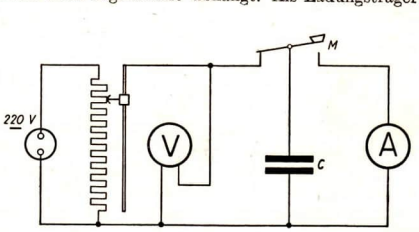


Abb. 180/1. Versuchsanordnung zur Untersuchung des Ladungsvermögens eines Kondensators

Der Kondensator wird nacheinander bei verschiedenen Spannungen geladen, die man dem Spannungsteiler entnimmt. Die Morsetaste befindet sich dabei jedesmal in Ruhe. Beim Niederdrücken der Taste entlädt sich der Kondensator über ein Drehspulgerät, das in dieser Schaltung als ballistisches Galvanometer wirkt. Der Stoßausschlag X, den das Galvanometer bei der Entladung anzeigt, ist ein Maß für die Ladung Q, die vom Kondensator bei der Spannung U aufgenommen wurde (vgl. dazu § 42,3).

Stellt man zusammengehörige Meßwerte von Q und U in einem Q-U-Diagramm graphisch dar, so sieht man, daß die Bildpunkte annähernd auf einer durch den Nullpunkt gehenden Geraden liegen (Abb. **181**/1). Es folgt daraus, daß Q proportional U ist:

$$Q \sim U.$$

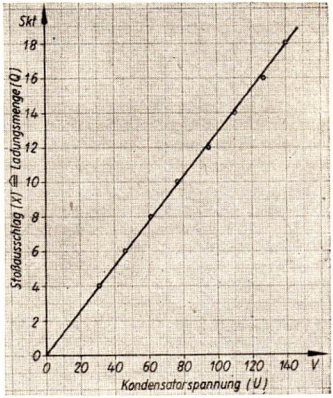


Abb. **181**/1. Q-U-Diagramm — Abhängigkeit der vom Kondensator aufgenommenen Ladungsmenge von der Kondensatorspannung

Die von einem Kondensator aufgenommene Ladungsmenge ist der Kondensatorspannung proportional.

Der Quotient aus Q und U ist demnach eine Konstante. Man gibt ihr das Formelzeichen C. Es ist

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

Man bezeichnet diese Konstante als die **Kapazität** des Kondensators.

Die Kapazität eines Kondensators ist der Quotient aus der vom Kondensator aufgenommenen Ladungsmenge und der Kondensatorspannung.

2. Die Einheit der Kapazität. Die *Einheit der Kapazität* ergibt sich nach der Definition der Kapazität als ein **Coulomb je Volt** (C/V). Zu Ehren des englischen Physikers *Faraday* wird diese Einheit ein **Farad** (F) genannt.

Ein Kondensator hat die Kapazität 1 F, wenn er bei der Spannung von 1 V die Ladung 1 C aufnimmt.

In der Praxis werden nur Bruchteile eines Farads als Einheiten verwendet, nämlich ein millionstel Farad, genannt ein **Mikrofarad** (μF), und ein billionstel Farad, genannt ein **Picofarad** (pF).

$$1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F},$$
$$1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}.$$

3. Die Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von seinen Abmessungen. Es entsteht die Frage, in welcher Weise die Kapazität eines Plattenkondensators von der Bauart und den Abmessungen des Kondensators abhängt. Wir klären diese Frage durch einen Versuch und benutzen dazu einen Plattenkondensator, bei dem wir den Plattenabstand und die Plattenfläche verändern können. Da dieser Plattenkondensator eine sehr kleine Kapazität hat, verwenden wir als Strommesser ein Spiegelgalvanometer. Wie beim vorigen Versuch wird der Kondensator unter Zwischenschalten einer Morsetaste geladen und kurz darauf über das Spiegelgalvanometer entladen.

Die vom Kondensator aufgenommene Ladungsmenge Q wird unter verschiedenen Bedingungen ermittelt. Die Ladespannung wird zunächst konstant auf $U = 110$ V gehalten; die Stoßausschläge werden bei verschiedenen Plattenabständen d abgelesen. Das Produkt aus dem Stoßausschlag und dem Plattenabstand erweist sich, von geringfügigen Meßfehlern abgesehen, als konstant. Dementsprechend liegen die Bildpunkte des Q-d-Diagramms in Abbildung **182**/1 mit großer Annäherung auf einer gleichseitigen Hyperbel. Es ist somit

Einfluß des Plattenabstandes auf die aufgenommene Ladungsmenge Spannung $U = 110$ V

Plattenabstand (d) cm	Stoßausschlag (X als Maß für Q) Skt	$X \cdot d$ (als Maß für $Q \cdot d$)
0,1	23,7	2,37
0,2	11,7	2,34
0,3	8,0	2,40
0,4	6,2	2,48
0,5	5,0	2,50

$$Q \sim \frac{1}{d}.$$

In einer weiteren Meßreihe werden die Spannung und der Plattenabstand konstant gehalten. Es werden aber verschiedene Kondensatorplatten benutzt, deren Flächen F sich wie 1 : 2 : 3 : 4 verhalten. In diesem Falle stehen die Stoßausschläge und damit die aufgenommenen Ladungsmengen ebenfalls im Verhältnis 1 : 2 : 3 : 4. Es ergibt sich

$$Q \sim F.$$

Vom 1. Abschnitt her ist bekannt, daß auch

$$Q \sim U$$

ist.

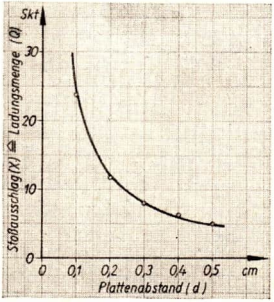


Abb. **182**/1. Q-d-Diagramm. Abhängigkeit der von einem Kondensator aufgenommenen Ladungsmenge vom Plattenabstand

Man kann die Ergebnisse dieser Versuchsreihen zu einem Ausdruck zusammenfassen. Es ist

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

oder nach Division durch U

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

Der Quotient $\frac{Q}{U}$ ist aber nichts anderes als die Kapazität C des Kondensators. Es ist mithin

$$C \sim \frac{F}{d}.$$

Die Kapazität eines Plattenkondensators ist der Plattenfläche proportional, dem Plattenabstand umgekehrt proportional.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Ein Plattenkondensator mit einer Kapazität von 0,4 μF wird
   a) bei 220 V,
   b) bei 80 V
   geladen. Welche Ladungsmenge nimmt er auf?
2. Um die Kapazität eines Plattenkondensators zu bestimmen, ladet man ihn bei 50 V und entladet ihn über ein ballistisches Amperemeter. Dieses habe eine Stoßempfindlichkeit von $1{,}7 \cdot 10^{-8}$ As/cm. Man beobachtet beim Entladen einen Stoßausschlag von 6,4 cm. Wie groß ist die Kapazität des Kondensators?
3. Lösen Sie die Aufgabe 2 für ein ballistisches Amperemeter mit einer Stoßempfindlichkeit von $2{,}56 \cdot 10^{-10}$ As/cm, wenn die Ladespannung 120 V und der Stoßausschlag beim Entladen 5,97 cm beträgt!
4. Die Platten eines verstellbaren Plattenkondensators haben einen Durchmesser von 10 cm. Welchen Durchmesser müssen drei weitere Plattenpaare haben, wenn ihre Flächen, von dem ersten Kondensator ausgehend, sich verhalten sollen wie 1 : 2 : 3 : 4? Wie groß sind die Flächeninhalte der Platten? Wie verhalten sich die Kapazitäten?

§ 47. Das Dielektrikum

1. Die Dielektrizitätskonstante. Der oben angegebene Ausdruck $C \sim \frac{F}{d}$ gibt die Abhängigkeit der Kapazität von den räumlichen Abmessungen des Kondensators wieder. Außerdem aber übt auch der zwischen den Kondensatorplatten befindliche Stoff, das *Dielektrikum*[1], einen Einfluß auf die Kapazität aus. Mathematisch drückt man dies dadurch aus, daß man zur Gleichungsform übergeht und dem Quotienten $\frac{F}{d}$ einen Proportionalitätsfaktor ε beifügt. Man erhält

$$C = \varepsilon \cdot \frac{F}{d}.$$

[1] diá (griech.) = durch; Dielektrikum = der von einem elektrischen Feld durchsetzte Stoff

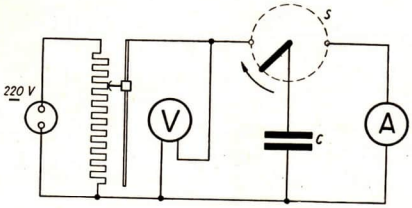


Abb. 184/1. Messung der Dielektrizitätskonstanten eines mit Luft gefüllten Plattenkondensators. Schema der Versuchsanordnung

Es hat sich erwiesen, daß der Faktor ε von dem Stoff abhängig ist, der den Raum zwischen den Kondensatorplatten ausfüllt. ε wird als die **Dielektrizitätskonstante** bezeichnet.

Die Dielektrizitätskonstante der Luft läßt sich mit Hilfe eines empfindlichen Spiegelgalvanometers an einem mit Luft gefüllten Kondensator, wie er für die in § 46, 1 beschriebenen Versuchsreihen benutzt wurde, verhältnismäßig leicht bestimmen.

Man ersetzt zweckmäßigerweise die Morsetaste durch einen rotierenden Schalter S, der von einem Elektromotor angetrieben wird und in der Sekunde $n = 25$ Umdrehungen macht (Abb. 184/1). Bei jeder Umdrehung wird der Kondensator C einmal geladen und wieder entladen. Ist Q die bei der Ladespannung U aufgenommene Ladungsmenge, so fließen in jeder Sekunde $n \cdot Q$ Coulomb durch das Spiegelgalvanometer. Dieses braucht in diesem Falle kein ballistisches Gerät zu sein. Da es den Stromstößen nicht im einzelnen folgen kann, zeigt es einen konstanten Strom $I = n \cdot Q$ an. Hieraus wird $Q = \frac{I}{n}$ berechnet. Bei einem auf diese Weise durchgeführten Versuch wurden gemessen:

$$F = \pi r^2 = \pi \cdot 10^2\,\mathrm{cm}^2 = 314\,\mathrm{cm}^2 = 0{,}0314\,\mathrm{m}^2,$$
$$d = 0{,}11\,\mathrm{cm} = 0{,}0011\,\mathrm{m},$$
$$U = 200\,\mathrm{V},$$
$$I = 1{,}25 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{A},$$
$$n = 25\,\mathrm{Umdr./s}.$$

Auch hier wurden gemäß dem internationalen elektrischen Maßsystem sämtliche Längen in m, sämtliche Flächen in m² ausgedrückt. Es ergab sich

$$Q = \frac{I}{n} = \frac{1{,}25}{10^6 \cdot 25}\,\mathrm{As} = 5 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{As} \quad \text{und}$$

$$\varepsilon = C \cdot \frac{d}{F} = \frac{Q}{U} \cdot \frac{d}{F} = \frac{5 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{As}}{200\,\mathrm{V}} \cdot \frac{0{,}0011\,\mathrm{m}}{0{,}0314\,\mathrm{m}^2} \approx 8{,}76 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{As/Vm}.$$

Genaue Messungen ergeben den Wert

$$\varepsilon_{\mathrm{Luft}} = 8{,}864 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{As/Vm}.$$

2. Die absolute Dielektrizitätskonstante. Man hat in wissenschaftlichen Forschungslaboratorien den soeben beschriebenen Versuch auch im Vakuum durchgeführt. Es hat sich erwiesen, daß die *Dielektrizitätskonstante im Vakuum* nur ganz wenig kleiner ist als im lufterfüllten Raum. Ihr Wert beträgt

$$\boldsymbol{\varepsilon_0 = 8{,}859 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{As/Vm}}.$$

Man bezeichnet die auf das Vakuum bezogene Dielektrizitätskonstante als die **absolute Dielektrizitätskonstante** und benutzt dafür das Formelzeichen ε_0.

Der Unterschied zwischen $\varepsilon_{\text{Luft}}$ und ε_0 beträgt weniger als $1^0/_{00}$. Er ist so gering, daß man in den meisten Fällen $\varepsilon_{\text{Luft}}$ und ε_0 und damit auch die Kapazitäten C_{Luft} und C_{Vak} eines Kondensators annähernd als gleichwertig ansehen kann, unabhängig davon, ob er sich in Luft oder im Vakuum befindet.

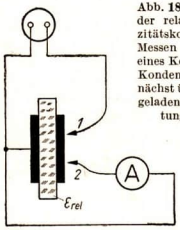


Abb. 185/1. Ermittlung der relativen Dielektrizitätskonstante durch Messen der Kapazität eines Kondensators. Der Kondensator wird zunächst über die Leitung *1* geladen, dann über Leitung *2* entladen.

3. Das Feld im stofferfüllten Raum – Die relative Dielektrizitätskonstante. Wir setzen die Versuche mit den in Abb. 180/1 oder in Abb. 184/1 wiedergegebenen Anordnungen fort und prüfen nach, wie sich die Kapazität eines Kondensators ändert, wenn die Feldlinien nicht mehr im lufterfüllten Raum, sondern in Glas, Hartgummi oder einem anderen Isolierstoff verlaufen (Abb. 185/1). Zwischen die Kondensatorplatten schieben wir bei konstant gehaltener Spannung eine Glasplatte, ohne dabei den Abstand der Kondensatorplatten zu ändern. Die Versuche ergeben, daß in diesem Falle die Ladung Q des Kondensators nach dem Aufladen bei der gleichen Spannung etwa dreimal so groß ist wie bei lufterfülltem Zwischenraum. Entsprechende Ergebnisse findet man, wenn man die Glasscheibe durch eine Hartgummischeibe oder durch ein anderes Isoliermittel ersetzt.

Es ist zweckmäßig, bei diesen Messungen als Vergleichswert nicht die Kapazität eines mit Luft gefüllten Kondensators, sondern die Kapazität eines im Vakuum befindlichen Kondensators zu wählen. Man hat den Quotienten aus der Kapazität C eines ganz mit Stoff erfüllten Kondensators und der Kapazität C_0 eines im Vakuum befindlichen Kondensators als eine neue Materialkonstante ε_{rel} definiert:

$$\varepsilon_{\text{rel}} = \frac{C}{C_0}.$$

Die Konstante ε_{rel} nennt man die **relative Dielektrizitätskonstante.** Sie ist eine reine Verhältniszahl.

Elektrische Daten einiger Isolierstoffe

Sämtliche Werte sind abgerundet

Stoff	Relative Dielektrizitätskonstante (ε_{rel})	Durchbruchfeldstärke bei 20° C (Schichtdicke 1 mm) kV/m
Glas	3 ... 8	bis 45000
Porzellan	bis 6	bis 35000
Hartgummi	3,5	25000
Glimmer	5 ... 7	60000
Polystyrol	2,5	50000
Quarz	4	40000
Hartparaffin	2,2	20000
Paraffinöl	2,3	12000
Wasser	81	—
Luft	1,0006	3000

Die im 1. Abschnitt gewonnene *Kondensatorgleichung* nimmt dann die Form an

$$C = \varepsilon_{\text{rel}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{F}{d}.$$

In der beigefügten Tabelle sind die relativen Dielektrizitätskonstanten einiger wichtiger Isolierstoffe angegeben.

4. Technische Kondensatoren. Man kann die Kapazität eines Kondensators dadurch erhöhen, daß man einen Isolierwerkstoff mit möglichst großer Dielektrizitätskonstante wählt. Ebenso wirkt sich eine Vergrößerung der Plattenfläche und eine Verkleinerung des Plattenabstandes aus. Theoretisch könnte man auf diese Weise für die Kapazität beliebig große Werte erreichen. Daß dem aber in der Praxis eine Grenze gesetzt ist, zeigt das Beispiel eines mit Luft gefüllten Plattenkondensators.

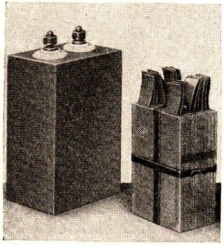


Abb. 186/1. Minos-Plattenkondensator des Jenaer Glaswerkes Schott und Gen. VEB. Rechts ein aus dem Gehäuse herausgenommenes Plattensystem

Beim Verkleinern des Plattenabstandes wächst die Feldstärke sehr rasch so stark an, daß die Luft dann nicht mehr isoliert. Es setzen zunächst stille Entladungen ein, denen schließlich Funkenerscheinungen folgen. Auch andere Isolierstoffe wie Glas, Hartgummi, Paraffin isolieren nur bis zu einer bestimmten *Durchbruchfeldstärke*. Bei höheren Feldstärken werden sie durchschlagen und örtlich zerstört. Vergleiche 3. Spalte der Tabelle auf S. 185!

Je nach dem technischen Verwendungszweck werden die Plattenkondensatoren als *Blockkondensatoren* in verschiedenen Bauarten ausgeführt.

Wenn es sich darum handelt, Ladungen bei hohen Spannungen aufzuspeichern, wählt man meist Glas als Dielektrikum. Eine moderne Ausführungsform solcher Kondensatoren sind die in Abb. 186/1 wiedergegebenen *Hochspannungskondensatoren*, die als Isolierstoff *Minosglas* enthalten. Minosglas ist ein im Jenaer Glaswerk VEB erzeugter Spezialwerkstoff mit der relativen Dielektrizitätskonstanten 8, dessen Durchbruchfeldstärke bis 20000 kV/m beträgt. Minos-Plattenkondensatoren werden aus aufeinandergeschichteten Minosplatten und Metallfolien zusammengestellt. Sie haben eine Kapazität bis zu 0,05 μF und können an eine Spannung von 6000 V gelegt werden.

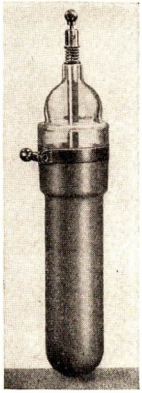


Abb. 186/2. Moderne Leidener Flasche aus dem Jenaer Glaswerk

Das Urbild der *Zylinderkondensatoren* ist die *Leidener Flasche* (Abb. 186/2). Bei ihrer modernen Ausführungsform ist der Rand verdickt und zur Vermeidung von Sprühverlusten mit Öl umgeben. Derartige Kondensatoren haben eine Kapazität bis zu 0,004 μF und sind verwendbar für Spannungen bis zu 25000 V.

Kommt es auf höchste Kapazität bei kleinstem Raumbedarf an, so wählt man bei Präzisionskondensatoren *Glimmer* als Dielektrikum. Für die meisten technischen Zwecke ersetzt

man ihn durch besonders präparierte Papiere mit einer Dicke von 0,008 bis 0,02 mm. Diese werden entfeuchtet und entgast, sodann mit Paraffin oder Öl getränkt. Auch stellt man aus dem Kunststoff *Polystyrol* Folien von sehr geringer Dicke her. Sie dienen in großem Umfang als Dielektrikum beim Bau von Kondensatoren.

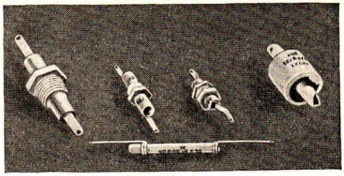


Abb. 187/1. Epsilankondensatoren aus dem Keramischen Werk Hescho-Kahla, VEB

Neuerdings ist es gelungen, unter Beimengung von Bariumtitanat einen keramischen Isolierstoff zu erzeugen, den man als *Epsilan* bezeichnet und der die relative Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_{\text{rel}} = 7000$ hat. Man verwendet ihn vorzugsweise zur Herstellung von Kleinkondensatoren für besondere Zwecke (Abb. 187/1). Epsilan ist ein hochwertiges Erzeugnis unserer Industrie, durch das die Qualität der Geräte, in denen Kondensatoren verwendet werden, weiterhin erheblich gesteigert wird. Dies ist von großer technischer Bedeutung; denn die große Kapazität der Blockkondensatoren ist in erster Linie bedingt durch die außerordentlich geringe Stärke der Isolierschicht.

Eine besonders hohe Kapazität haben die *Elektrolytkondensatoren*. Man hat es verstanden, durch Behandlung mit Borax und Borsäure auf einer Aluminiumplatte eine haltbare Schicht von Aluminiumhydroxyd zu erzeugen, die nur 10^{-4} mm stark ist und Spannungen bis 1000 V standhält. Diese Isolierschicht bildet mit dem Metall und dem oben genannten Elektrolyten einen Kondensator. Derartige Kondensatoren erreichen eine Kapazität bis zu 0,01 μF.

Ein technischer Kondensator mit stetig regelbarer Kapazität ist der *Drehkondensator*, den wir bereits in der Grundschule kennengelernt haben (vgl. LB 8, § 15,4). Er besteht aus zwei gegeneinander drehbaren Plattensystemen. Durch Drehen der einen Plattengruppe wird die wirksame Flächengröße des Kondensators geändert und dadurch seine Kapazität beeinflußt.

5. Die Parallelschaltung von Kondensatoren. Schaltet man mehrere Kondensatoren parallel zueinander, so wird dadurch die wirksame Flächengröße entsprechend erhöht (Abb. 187/2). Die Flächen der Kondensatorplatten seien F_1, F_2, F_3. Die Flächengröße der gesamten Gruppe ist dann

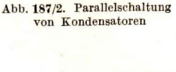


Abb. 187/2. Parallelschaltung von Kondensatoren

$$F = F_1 + F_2 + F_3.$$

In gleicher Weise ist die Kapazität C der Kondensatorgruppe gleich der Summe der Kapazitäten C_1, C_2, C_3 der einzelnen Kondensatoren:

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Die Spannung ist an allen Kondensatoren gleich groß.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Bestimmen Sie die geometrischen Abmessungen einer Leidener Flasche und berechnen Sie deren Kapazität!

2. Berechnen Sie die Fläche eines Blockkondensators mit einer Kapazität $C = 1\ \mu$F, dessen Isolierfolie aus Polystyrol 0,1 mm stark ist!

3. Es sollen Blockkondensatoren mit einer Kapazität von 1 μF, 2 μF, 5 μF aus 8 cm breiten Stanniolstreifen hergestellt werden. Als Isoliermittel wird 0,01 mm dickes paraffiniertes Papier mit einer relativen Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_{rel} = 2{,}3$ verwendet. Wie lang müssen die Stanniolstreifen sein, die man für die einzelnen Kondensatoren braucht?
4. Nennen Sie verschiedene Ausführungsformen technischer Kondensatoren und geben Sie Vorzüge der einzelnen Typen an!
5. Nennen Sie technische Kondensatoren mit veränderbarer Kapazität und erläutern Sie, wie die Veränderung bewerkstelligt wird!
6. Drei Blockkondensatoren von 1 μF, 2 μF, 5 μF werden parallelgeschaltet. Welche Ladungsmenge nimmt das System bei einer Spannung von 220 V auf?
7. Auf einem Grundbrett sind vier Blockkondensatoren von 1 μF, 2 μF, 3 μF, 4 μF so miteinander verbunden, daß sie durch Überbrücken der zwischen den zugehörigen Buchsen bestehenden Lücken durch kurze Steckschnüre wahlweise in die Leitung eingeschaltet werden können (Abb. 188/1). Beweisen Sie, daß man durch eine solche Vorrichtung jede ganzzahlige Kapazität von 1 μF bis 10 μF zusammenstellen kann!

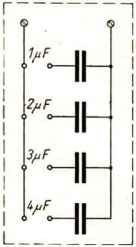


Abb. 188/1
Gruppe von Kondensatoren zum freien Zusammenschalten

§ 48. Die Verteilung der Ladungen im elektrischen Feld

1. Die Influenz. In den vorangehenden Paragraphen haben wir Näheres über zwei wichtige Grundbegriffe der Elektrizitätslehre, die Ladung und das elektrische Feld, kennengelernt. Doch sind noch manche Fragen offen geblieben. Wie kommt es beispielsweise, daß ein Elektroskop schon beim Annähern einer Ladung einen Ausschlag zeigt, ehe es selbst geladen ist?

Wollen wir diese und ähnliche Fragen beantworten, so müssen wir näher auf den Aufbau und die elektrischen Eigenschaften der Leiter und Isolierstoffe eingehen. Die Atome aller chemischen Grundstoffe enthalten Elektronen. Bei einem Isolator können die Elektronen den Atomverband aber nicht verlassen. Bei Leitern dagegen sind Elektronen vorhanden, die über den Gesamtraum des Leiters frei beweglich sind. Jedes Elektron trägt, wie in § 45,2 gezeigt wurde, die negative Ladung e. In einem homogenen Feld der Feldstärke $\mathfrak{E}$ mit dem Betrag E wirkt auf jedes Elektron somit eine Feldkraft von der Größe $P = e \cdot E$ entgegengesetzt zu der Richtung der Feldlinien.

Diese Überlegung können wir zur Erklärung des nachfolgenden Versuchs heranziehen. Wir bringen einen ungeladenen ringförmigen Leiter in das homogene Feld eines Plattenkondensators und beobachten, wie dessen Feld dadurch verzerrt wird (Abb. 189/1). Da viele Feldlinien auf dem Ring enden, müssen sich an der einen Außenseite des Ringes negative Ladungen, an der anderen Außenseite positive Ladungen befinden. Es muß sich mithin auf dem Ring eine Trennung elektrischer Ladungen vollzogen haben.

Eine solche Trennung elektrischer Ladungen unter der Wirkung eines elektrischen Feldes bezeichnet man als **Influenz.** Sie hat ihre Ursache darin, daß sich die in jedem Leiter befindlichen freien Elektronen unter dem Einfluß des Feldes verschieben. Nimmt man an, daß die im Bilde rechts befindliche Kondensatorplatte positiv geladen sei, so wandert ein Teil der freien Elektronen des Ringes von links nach rechts. Es entsteht auf der rechten Außenseite des Ringes ein Überschuß an Elektronen, mithin eine negative Ladung, links dagegen ein Mangel an Elektronen und somit eine positive Ladung. Ist der Ring so eingerichtet, daß beide den Kondensatorplatten zugewendeten Ringhälften im Feld getrennt werden können, so wird dadurch der Rückstrom der freien Elektronen unterbunden. Beide Ringhälften lassen sich dann entgegengesetzt geladen aus dem Feld nehmen.

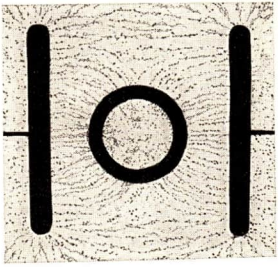


Abb. 189/1. Feldlinienbild eines ungeladenen leitenden Ringes im homogenen Feld. Der Innenraum des Ringes ist feldfrei.

Bei Influenzvorgängen werden demnach ungleichartige Ladungen voneinander getrennt. Es treten stets Ladungen verschiedenen Vorzeichens in gleicher Menge auf. Die Influenz wird bei den Influenzmaschinen zur Erzeugung hoher Spannungen ausgenutzt. Schulmodelle solcher Maschinen erreichen Spannungen bis zu 50 kV.

Zur Bestätigung der im Vorangehenden gewonnenen Erkenntnisse führen wir einen Versuch durch, bei dem wir uns einer *Doppelplatte* bedienen (Abb. **189**/2). Zwei kleine Metallplatten sind an langen Isolierstielen so befestigt, daß man sie bis zur Berührung einander nähern kann. Bringt man die sich berührenden Platten in das Feld eines geladenen Plattenkondensators und nimmt sie vereinigt wieder heraus, so erweisen sie sich beide bei einer anschließenden Prüfung mittels eines Elektrometers als ungeladen. Wenn man die beiden Platten aber vereinigt ins Feld führt, dort trennt und einzeln wieder herausführt, so zeigen sie entgegengesetzt gleiche Influenzladungen.

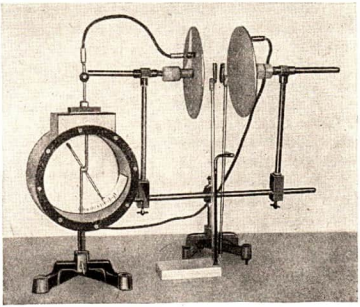


Abb. 189/2. Nachweis von Influenzladungen mit Hilfe einer Doppelplatte

2. Der Faradaykäfig. Die Abbildung **189**/1 gibt uns noch einen weiteren wichtigen

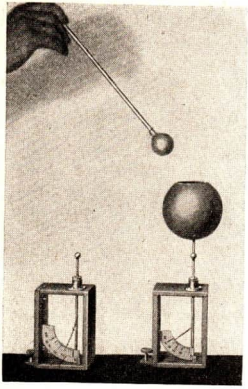
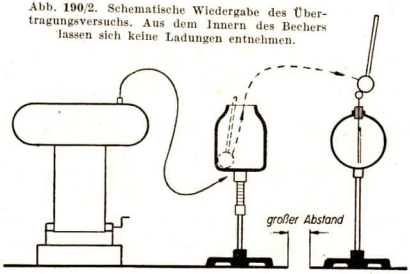


Abb. 190/1. Faradaybecher. Der in den Faradaybecher eingeführte Elektrizitätsträger wird im Becher restlos entladen.

Aufschluß. Wir erkennen, daß das Innere des Ringes feldfrei ist. Das bedeutet — räumlich gesehen —, daß ein von leitenden Flächen umgebener Hohlraum gegen elektrische Felder abgeschirmt ist. Da elektrische Feldlinien stets an Ladungen enden, folgt daraus, daß sich auf den Innenflächen leitender Hohlräume keine elektrischen Ladungen befinden. Dieser Schluß wurde bereits 1836 von *Faraday* gezogen und durch ihn experimentell bestätigt. Er ließ sich einen Behälter mit leitenden Wandungen von solcher Größe herstellen, daß er selbst darin Platz hatte. Nachdem der Behälter gegen die Erde isoliert aufgestellt war, setzte sich Faraday mit einem empfindlichen Elektrometer hinein. Nun ließ er von einer großen Elektrisiermaschine auf die Außenseite des Behälters sehr kräftige Ladungen übertragen. Aber weder Faraday selbst nahm von diesen Ladungen etwas wahr, noch war am Meßgerät das geringste zu beobachten.

Man kann die von Faraday gesammelten Erfahrungen durch einen Schauversuch veranschaulichen. Ein Elektrometer wird mit einem **Faradaybecher**, einem becherförmigen Konduktor, versehen (Abb. **190**/1). Dieser hat oben eine Öffnung, durch die sich eine Probekugel gerade noch ohne Berührung der Wandung einführen läßt. Wir laden einen mit einem Elektrometer verbundenen Faradaybecher auf etwa 2 kV auf. Berührt man den geladenen Faradaybecher von außen mit einer isolierten Probekugel, so kann man ohne Schwierigkeit Ladungen auf ein zweites Elektrometer übertragen. Dieses zeigt sogleich einen entsprechenden Ausschlag. Anders ist es aber, wenn man nun aus dem Inneren des Bechers Ladungen mit der Probekugel herausholen und auf das ungeladene Elektrometer übertragen will (Abb. **190**/2). Dies erweist sich als unmöglich.

Abb. 190/2. Schematische Wiedergabe des Übertragungsversuchs. Aus dem Innern des Bechers lassen sich keine Ladungen entnehmen.



Noch deutlicher läßt sich die Wirkung des Faradaybechers durch folgenden Versuch veranschaulichen. Man führt die Probekugel wiederholt vom positiven Pol einer Gleichstromsteckdose in das Innere eines Bechers, der mit einem

Elektrometer verbunden ist (Abbildung **191**/1). Da die Probekugel im Becher stets restlos entladen wird, werden jedesmal dem Elektrometer neue Ladungen zugeführt. Man kann dieses demnach unter Verwendung einer Spannungsquelle von 220 V auf über 1000 V aufladen.

Aus all diesen Versuchen folgt:

Elektrische Ladungen befinden sich stets nur an der Außenfläche des geladenen Körpers. Ein von leitenden Wänden umgebener Hohlraum enthält keine elektrischen Ladungen und ist feldfrei.

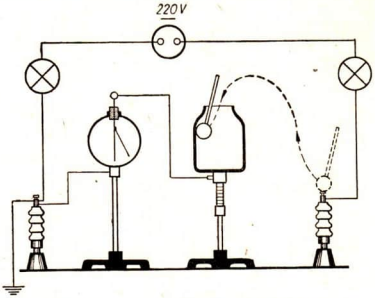


Abb. **191**/1. Steigerung der Spannung eines Elektrometers über die der Spannungsquelle. Die eingeschalteten Glühlampen dienen zur Sicherung bei unbeabsichtigter Berührung.

Im Hinblick auf den Faradayschen Versuch spricht man von einem *Faradaykäfig*, wenn irgendein Raum gegen elektrische Felder durch leitende Metallflächen abgeschirmt wird. Anordnungen nach Art des Faradaykäfigs werden auch in der Technik vielfach verwendet. So sichert man Lagerräume für leicht entzündliche Stoffe dadurch gegen Blitzgefahr, daß man sie mit einem geerdeten Drahtnetz umhüllt. Zuleitungen zu Antennen werden zur Abschirmung gegen störende elektrische Felder mit Metallmänteln umgeben, die gegen die Antennenleitung isoliert und geerdet sind. In Rundfunkempfängern werden empfindliche Einzelteile zur Vermeidung gegenseitiger Störungen durch Blechkästen abgeschirmt.

3. Einfluß der Oberflächenkrümmung auf die Verteilung der Ladung — Die Spitzenwirkung. Wir erkannten im vorangehenden Abschnitt, daß sich elektrische Ladungen nur auf der Außenfläche leitender Körper, nicht in deren Innerem befinden. Das bedeutet keineswegs, daß die Ladungen gleichmäßig auf der Außenfläche verteilt sein müssen. Abb. **191**/2 zeigt das Feldlinienbild eines geladenen Metallwürfels, der in großer Entfernung von anderen leitenden Körpern aufgestellt ist. Wir sehen, daß sich an den Ecken die Feldlinien zusammendrängen, und schließen daraus, daß die Ladungen dort dichter angehäuft sind als in den Flächenmitten.

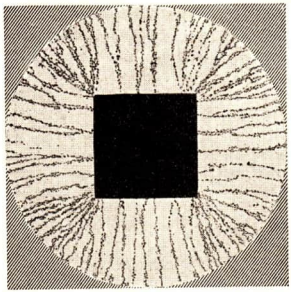


Abb. **191**/2. Feldlinienbild eines geladenen Metallwürfels. Es handelt sich um ein Modellbild. An Stelle des Würfels wurde bei der Aufnahme eine quadratische Metallplatte verwendet.

Besonders dicht gedrängt sind die elektrischen Ladungen an allen Spitzen und Kanten. Infolgedessen nimmt an diesen Stellen die Feldstärke in der angrenzenden Luftschicht besonders hohe Werte an. Überschreitet die Feldstärke

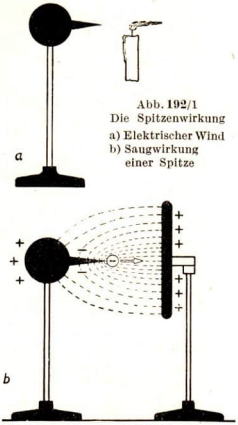


Abb. 192/1
Die Spitzenwirkung
a) Elektrischer Wind
b) Saugwirkung einer Spitze

den Betrag $E = 3000$ kV/m, so setzt der Vorgang der *Stoßionisation* ein. Die in der Luft überall vorhandenen Ionen erhalten durch die große Feldkraft so hohe Geschwindigkeiten, daß sie durch Stoß aus neutralen Molekülen weitere Elektronen frei machen. Dadurch erhöht sich lawinenartig die Zahl der Ladungsträger. Die Luft isoliert nicht mehr.

Da vor einer Spitze die Luft nicht isoliert, folgen die in der Spitze zusammengedrängten Ladungen dem Zug der Feldkraft und verlassen den Leiter. Man bezeichnet diese Erscheinung als **Spitzenwirkung** (Abb. **192**/1a). Wegen der durch die Spitzenwirkung bedingten Ladungsverluste und der dadurch verursachten Energieverluste vermeidet man in der Hochspannungstechnik bei der Formgebung der Leiter alle Spitzen, Kanten und starken Krümmungen (Abb. **192**/2). Bei Fernleitungen mit Spannungen über 100 kV sucht man ebenfalls Sprühverluste nach Möglichkeit zu vermeiden. Vielfach werden für Hochspannungsleitungen Hohlseile verwendet. Hierdurch wird der Leiterquerschnitt vergrößert und so eine Verminderung der Randkrümmung erreicht, ohne daß ein zusätzlicher Materialaufwand erforderlich ist.

Umgekehrt wird in der Elektrotechnik die Spitzenwirkung auch nutzbringend angewendet. Dies geht aus dem in Abb. **192**/1b wiedergegebenen Versuch hervor. Man nähert einer positiv geladenen Platte einen mit einer Spitze versehenen ungeladenen Konduktor, ohne die Platte zu berühren. Der Konduktor lädt sich positiv auf, da die negativen Influenzladungen aus der Spitze ausströmen. Sie erreichen die Platte und neutralisieren dort die positiven Ladungen zum Teil. So kann man mit einem Spitzenkamm Ladungen absaugen.

Arbeitet man mit einem Bandgenerator oder einer Influenzmaschine im Dunkeln, so treten an den Spitzen und Kanten der Leiter *Leuchterscheinungen* auf. Durch den Vorgang der Stoßionisation werden die Atome der Luft zum Leuchten angeregt.

In der freien Natur kann man bisweilen ähnliche Erscheinungen beobachten, die man als *Elmsfeuer* bezeichnet. Wenn die normale Feldstärke des Erdfeldes durch Gewittererscheinungen verstärkt wird, so nimmt an stark gekrümmten Teilen der

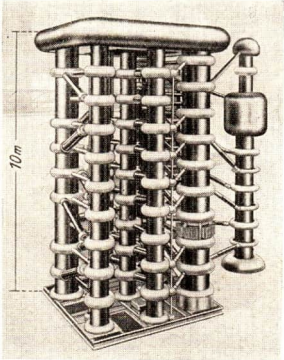


Abb. **192**/2. Hochspannungsanlage für 1500 kV, hergestellt vom Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden, VEB. Alle Spitzen und Kanten an spannungsführenden Teilen sind vermieden.

Erdoberfläche, etwa an Stangen, Mastspitzen, Blättern, die Feldstärke einen so hohen Wert an, daß infolge von Stoßionisation Leuchterscheinungen einsetzen.

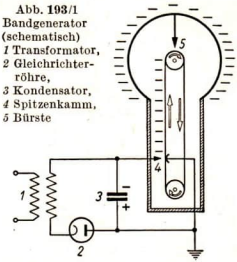


Abb. **193/1** Bandgenerator (schematisch) *1* Transformator, *2* Gleichrichterröhre, *3* Kondensator, *4* Spitzenkamm, *5* Bürste

4. Der Bandgenerator. Auf Grund der in den vorangehenden Abschnitten dieses Paragraphen gewonnenen Erkenntnisse wird uns nun auch die Arbeitsweise des *Bandgenerators* verständlich. Technische Bandgeneratoren großen Ausmaßes verwendet man zum Erzeugen sehr hoher Spannungen in modernen Anlagen zum Erforschen der Atomkerne. Den ersten Bandgenerator konstruierte 1933 der niederländische Physiker *van de Graaf*.

Wir betrachten das Schulmodell, das uns bisher als Hochspannungsquelle diente. Bei diesem werden die Ladungen dadurch getrennt, daß einzelne Ladungsteilchen durch das Gummiband infolge der Reibung aus der unteren Bürste entnommen werden. Infolge der innigen Berührung gehen freie Ladungsteilchen der Bürste auf das Band über. Da das Gummiband isoliert, haften diese Ladungsteilchen fest an der Oberfläche des Bandes.

Durch die Bewegung des Bandes gelangen diese Oberflächenladungen in das Innere des Konduktors, der als Faradaykäfig wirkt. Die gesamte Ladung wird durch die im Konduktor angebrachte Bürste abgesaugt und auf die Außenfläche des Konduktors geführt. Das Gummiband kehrt restlos entladen aus dem Konduktor zurück.

Bei technischen Bandgeneratoren wird die Leistung dadurch erhöht, daß man an Stelle der unteren Bürste einen Spitzenkamm anordnet (Abb. **193/1**). Dieser wird mit Hilfe einer besonderen Spannungsquelle auf etwa 25 kV geladen, seine Ladungen werden dem Transportband aufgesprüht (vgl. Abschnitt 3). Auf diese Weise werden Spannungen von mehreren Millionen Volt erreicht. Da aber die vom Band transportierte Ladungsmenge sehr ger ng ist, bleibt die Betriebsstromstärke weit unter 1 mA.

In Abb. **193/1** ist die auf dem Gummiband nach oben transportierte Ladung als negative Ladung angegeben. Doch ist es durchaus möglich, daß auch positive Ladungen aus der unteren Bürste entnommen werden.

Einer der modernsten Bandgeneratoren ist der in der UdSSR in *Charkow* errichtete. Er beansprucht einen Raum mit einer Breite von 25 m, einer Länge von 35 m und einer Höhe von 25 m. Der kugelförmige Konduktor hat einen Durchmesser von 10 m. Er wird durch 18 Transportbänder mit einer Breite von je 1 m aufgeladen, die mit einer Bandgeschwindigkeit von 39 m/s bewegt werden. Dieser Bandgenerator erreicht eine Höchstspannung von 4 Millionen Volt und eine Betriebsstromstärke von 0,2 mA.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Wie ist es zu erklären, daß ein Elektroskop beim Annähern eines geladenen Körpers schon vor der Berührung mit diesem einen Ausschlag zeigt?
2. Warum geht der in Aufgabe 1 erwähnte Ausschlag wieder zurück, sobald man den dem Elektroskop genäherten geladenen Körper entfernt?
3. Nachdem man einem Elektroskop einen geladenen Körper genähert hat, berührt man den Zuleitungsstab des Elektroskops ganz kurzzeitig mit dem Finger. Nach Entfernen des geladenen Körpers zeigt dann das Elektroskop einen Dauerausschlag, ohne von dem Körper berührt worden zu sein. Von welcher Art ist die auf dem Elektroskop befindliche elektrische Ladung? Geben Sie die Ursachen für die Erscheinung an!
4. Geben Sie die Ursachen für die Spitzenwirkung an! Erläutern Sie das Zustandekommen
   a) des elektrischen Windes, b) der Saugwirkung eines Spitzenstromes!

X. *Das konstante magnetische Feld*

§ 49. Grundeigenschaften und Formen magnetischer Felder

1. Die magnetischen Feldlinien. Wir wissen bereits, daß magnetische Kraftwirkungen nicht nur von einem permanenten Magneten, sondern auch von stromdurchflossenen Leitern ausgehen. Man bezeichnet den Gesamtbereich der magnetischen Kraftwirkungen als ein **magnetisches Feld.**

Jeder Magnet und jeder vom elektrischen Strom durchflossene Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben.

Der Richtungssinn der magnetischen Kraft wurde folgendermaßen festgesetzt:

Die magnetische Kraft ist vom magnetischen Nordpol zum magnetischen Südpol hin gerichtet.

In diese Richtung weist der Nordpol einer in das magnetische Feld gebrachten Magnetnadel. Das Magnetfeld kann durch Eisenfeilspäne veranschaulicht werden (Abb. **194**/1 und **194**/2). Diese stellen sich in die Richtung der magnetischen Kraft ein und zeigen den Verlauf der **magnetischen Feldlinien** an, deren Begriff bereits von *Michael Faraday* entwickelt wurde. Die magnetischen Feldlinien sind wie die elektrischen Feldlinien durch Abstraktion aus dem Feldbegriff gewonnen. Sie dienen wie jene zur Veranschaulichung des an sich unsichtbaren Magnetfeldes. In diesem Sinne sind auch die in den Abbildungen sichtbaren Aneinanderreihungen von Eisenfeilspänen nur als modellartige Wiedergabe der Feldlinien anzusehen.

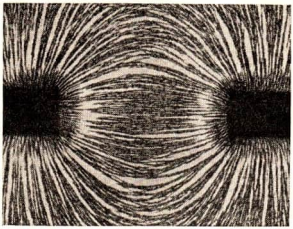


Abb. **194**/1
Feldlinienbild zweier ungleichnamiger Magnetpole

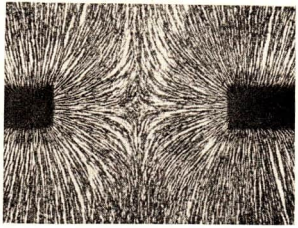


Abb. **194**/2
Feldlinienbild zweier gleichnamiger Magnetpole

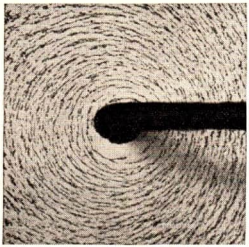


Abb. 195/1. Feldlinienbild eines geraden stromdurchflossenen Leiters. Die Eisenfeilspäne zeigen die kreisförmigen Feldlinien des Leiters an.

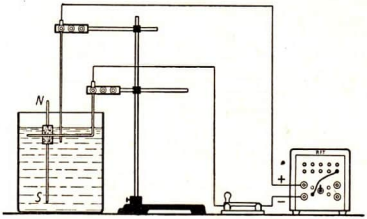


Abb. 195/2. Eine zwischen einem geraden und einem ringförmigen Leiter schwimmende magnetisierte Stricknadel. Der aus der Flüssigkeit herausragende Pol umkreist den geraden Stromleiter.

Bereits durch den dänischen Physiker *Hans Christian Oersted* wurde im Jahre 1820 festgestellt, daß von einem vom Strom durchflossenen Leiter magnetische Wirkungen ausgehen. Wie wir wissen, umgeben die magnetischen Feldlinien den Leiter in jeder senkrecht zu ihm gelegenen Ebene in konzentrischen Kreisen (Abb. **195**/1 — vgl. dazu LB 8, § 20).

Der folgende Versuch veranschaulicht mittels einer schwimmenden magnetisierten Stricknadel den kreisförmigen Verlauf der Feldlinien des Magnetfeldes eines geradlinigen stromdurchflossenen Leiters. In einem zylindrischen Glasgefäß befindet sich verdünnte Schwefelsäure als leitende Flüssigkeit (Abb. **195**/2). In der Mitte der Flüssigkeit taucht senkrecht nach unten ein geradliniger Leiter ein. Am Rande des Gefäßes befindet sich dicht unter der Flüssigkeitsoberfläche ein Drahtring, von dem ein Leitungsdraht nach oben aus der Flüssigkeit herausgeführt ist. An diesen Drahtring und den geradlinigen Leiter wird eine Gleichspannung gelegt. Durch die verdünnte Schwefelsäure ist der Stromkreis geschlossen. In der verdünnten Schwefelsäure schwimmt, durch einen Korken in vertikaler Stellung gehalten, eine mit dem Nordpol aus der Flüssigkeit herausragende Stricknadel. Ihr Nordpol, und damit die ganze Nadel, bewegt sich längs einer Feldlinie kreisförmig um den geradlinigen Leiter. Die Bewegungsrichtung der Stricknadel wechselt bei Umkehrung der Stromrichtung.

Dieser Versuch bestätigt noch einmal die bereits in der Grundschule gewonnene *Rechte-Faust-Regel* (Abb. **195**/3).

Umschließt man mit der rechten Faust einen Stromleiter so, daß der abgespreizte Daumen in die Richtung des elektrischen Stromes zeigt, so zeigen die gekrümmten Finger die Richtung der magnetischen Feldlinien an, die den Leiter umgeben.

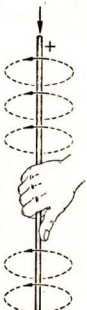


Abb. 195/3 Rechte-Faust-Regel

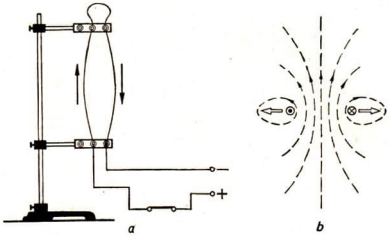
Wie man aus Abb. 195/1 rein anschaulich entnehmen kann, haben die magnetischen Feldlinien folgende Eigenschaften:

a) Die magnetischen Feldlinien sind in sich geschlossene Kurven. Sie besitzen weder einen Anfang noch ein Ende.

b) Sie durchkreuzen einander nicht.

c) Sie umschlingen den stromdurchflossenen Leiter.

2. Zug- und Druckkräfte im Magnetfeld. Im folgenden wird die Einwirkung der Magnetfelder zweier paralleler Ströme aufeinander gezeigt. Zwei Lamettafäden werden im Abstande von etwa 5 mm mittels zweier Klemmstangen lose senkrecht aufgehängt. Die oberen Enden sind leitend miteinander verbunden. Die unteren Enden werden über einen Hebelschalter an eine Spannungsquelle angeschlossen. Beim Einschalten des Stromes werden die Stromleiter in entgegengesetzten Richtungen vom Strom durchflossen, die *Leiter stoßen einander ab* (Abb. 196/1 a). Schaltet man beide Leiter parallel, so daß sie beim Einschalten in gleicher Richtung vom Strom durchflossen werden, so *ziehen die Leiter einander an* (Abb. 196/2 a).



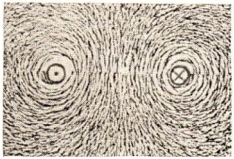
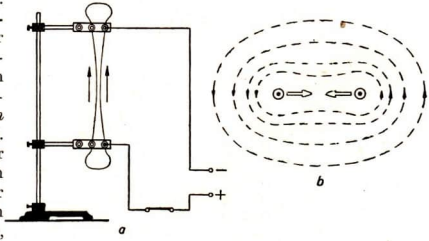


Abb. 196/1. Abstoßung zwischen zwei ungleichsinnig vom Strom durchflossenen Leitern a) Versuchsanordnung, b) Verlauf der magnetischen Feldlinien (schematisch), c) Feldlinienbild



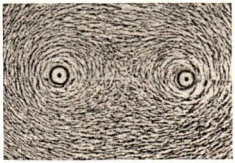
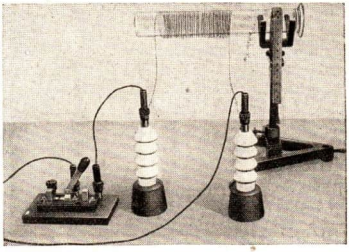


Abb. 196/2. Anziehung zwischen zwei gleichsinnig vom Strom durchflossenen Leitern a) Versuchsanordnung, b) Verlauf der magnetischen Feldlinien (schematisch), c) Feldlinienbild

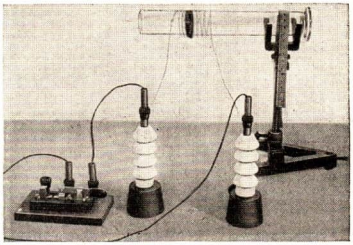
Bei ungleichsinnig fließenden Strömen sind die Feldlinien in dem Feldbereich zwischen den Leitern gleichgerichtet und verstärken sich dort in ihrer Wirkung. Das durch

Überlagerung entstehende Feld drängt die beiden Leiter seitwärts nach außen (Abb. **196**/1b und c). Bei gleichsinnig fließenden Strömen sind die Feldlinien im Bereich zwischen den Leitern einander entgegengerichtet und gleichen sich dort in ihrer Wirkung aus. Das durch Überlagerung entstehende Feld umschließt gemeinsam beide Leiter und nähert sie einander (Abb. **196**/2b und c).

Sind die Träger des Magnetfeldes beweglich, so treten infolge der in der Richtung der Feldlinien wirkenden anziehenden Kräfte unter Umständen *Verkürzungen der Feldlinien* ein. Man kann dies durch einen Versuch veranschaulichen. Um einen Standzylinder wird dünner lackierter Kupferdraht lose zu einer aus einer Lage bestehenden Spule von etwa dreißig Windungen gelegt, die durch kleine Zwischenräume voneinander getrennt sind. Der Standzylinder wird waagerecht an einem Stativ befestigt (Abb. **197**/1a). Wird ein elektrischer Strom durch die Spule geleitet, so ziehen sich die einzelnen Windungen gegenseitig ruckartig an. Die dabei auftretende Verkürzung der Spule wird durch die Verkürzung der Feldlinien verursacht (Abb. **197**/1b).



a) Stromkreis geöffnet



b) Stromkreis geschlossen

Abb. **197**/1. Veränderliche Zylinderspule. Sie wird durch das vom Strom erzeugte Magnetfeld verkürzt.

Beim Öffnen des Stromkreises bricht das Magnetfeld zusammen; die Spule dehnt sich infolge ihrer Elastizität wieder auf ihre ursprüngliche Länge aus.

Die in der Richtung der Feldlinien wirkende *Zugspannung* wird ergänzt durch eine quer zu den Feldlinien wirkende *Druckspannung*. Wäre sie nicht vorhanden, so würde jedes Magnetfeld zu einem schmalen, engbegrenzten Feldlinienbüschel zusammenschrumpfen.

3. Das magnetische Feld eines elektrischen Kreisstromes. Die bisher gewonnenen Erkenntnisse über das magnetische Feld eines stromdurchflossenen geraden Leiters lassen sich erweitern, wenn man die gleichen Untersuchungen an anders geformten Leitern durchführt. Wird zum Beispiel ein zu einem Kreisring gebogener Leiter von einem elektrischen Strom durchflossen, so bleibt die Grundform der ringförmigen Feldlinien erhalten. Sie vereinigen sich zu einem Gesamtfeld, das wieder durch Eisenfeilspäne veranschaulicht wird

(Abb. 198/1). Der Richtungssinn der magnetischen Feldlinien folgt im einzelnen aus der Rechten-Faust-Regel. Die magnetischen Feldlinien, die einen stromdurchflossenen kreisförmigen Leiter umgeben, treten auf der einen Seite des Drahtringes aus der von ihm begrenzten Fläche heraus, auf der anderen Seite hinein.

Ein vom Strom durchflossener Drahtring wirkt wie ein sehr kurzer Magnet.

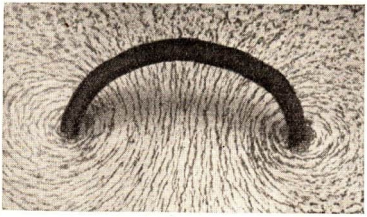


Abb. 198/1
Verlauf der Feldlinien eines kreisförmigen Stromleiters

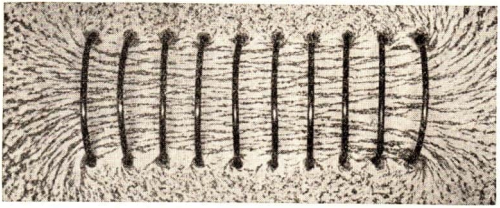


Abb. 198/2
Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. Im Innern der Spule besteht ein homogenes Magnetfeld.

4. Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. Eine zylinderförmig gewickelte Stromspule kann als die Vereinigung vieler kreisförmiger Stromleiter aufgefaßt werden. Die Magnetfelder der einzelnen Windungen der vom Strom durchflossenen Spule verschmelzen zu einem Gesamtfeld. In der Mitte der Stromspule verlaufen die Feldlinien parallel. Das durch sie dargestellte Feld heißt *homogen* (Abb. 198/2). Eine stromdurchflossene Zylinderspule wirkt wie ein Magnetstab. Sie besitzt einen Nordpol und einen Südpol. Will man sich an einer Spule schnell darüber klar werden, wie die Pole an der Spule verteilt sind, so gibt man der Rechten-Faust-Regel als *Spulenregel* zweckmäßigerweise folgende Form:

Legt man die rechte Hand so an die Windungen einer stromdurchflossenen Spule, daß die gekrümmten Finger in die Richtung des Stromes weisen, so zeigt der abgespreizte Daumen zum Nordpol der Spule.

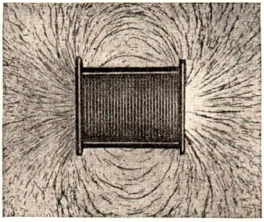


Abb. 198/3. Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule. Es ist ein Streufeld erkennbar.

Die Abbildung 198/3 zeigt ebenfalls das Feldlinienbild einer stromdurchflossenen

Spule. Man erkennt, daß nicht alle Feldlinien die Stirnseiten der Spule durchsetzen. Einige Feldlinien treten schon vor den Stirnseiten der Spule in den umgebenden Raum aus. Sie bilden ein *magnetisches Streufeld.* Das magnetische Feld der stromdurchflossenen Spule ist nur in seinem mittleren Teil annähernd homogen. Die Erfahrung zeigt, daß der homogene Teil im Feld der stromdurchflossenen Spule um so näher bis zu den Stirnseiten der Spule reicht, je länger die Spule im Verhältnis zu ihrem Durchmesser ist.

Im Magnetfeld einer ringförmigen, vom Strom durchflossenen Spule schließen sich die magnetischen Feldlinien innerhalb der Spule (Abb. **199**/1). Sie dringen nicht in den umgebenden Raum.

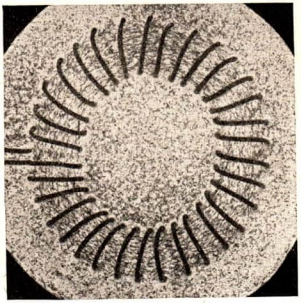


Abb. 199/1. Das Magnetfeld einer Ringspule
Das Feld ist streuungsfrei.

Das Feld einer Ringspule ist streuungsfrei.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Was versteht man unter einem Magnetfeld?
2. Was ist eine magnetische Feldlinie? Welche Richtung legt man ihr bei?
3. Geben Sie die Ihnen über magnetische Feldlinien bekanntgewordenen Tatsachen an, die für alle Magnetfelder gelten!
4. Untersuchen Sie die Magnetfelder zweier gleicher Stabmagnete bei verschiedener Lage der Magnete mit Hilfe von Eisenfeilspänen und fertigen Sie Feldlinienbilder an!
5. Erläutern Sie die Magnetfelder verschieden geformter, stromdurchflossener Leiter!
6. Wenden Sie auf verschieden geformte Stromleiter die Rechte-Faust-Regel und die Spulenregel an!
7. Was versteht man unter einem magnetischen Streufeld?

§ 50. Die magnetische Feldstärke

1. Vorversuch zur Einführung des Begriffes Feldstärke. Die Eigenschaften eines magnetischen Feldes, die wir bisher kennengelernt haben, nämlich der Verlauf und der Richtungssinn der Feldlinien, reichen zur vollständigen Kennzeichnung des Feldes nicht aus. Dies zeigt das Verhalten einer Magnetnadel bei dem im folgenden beschriebenen Versuch:

Ein Stabmagnet wird so auf Unterlegklötze gelegt, daß er mit einer Magnetnadel gleiche Höhe besitzt. Die Magnetnadel befindet sich zunächst unmittelbar vor einem Pol des Stabmagneten. Durch einen schwachen seitlichen Stoß wird die Magnetnadel aus ihrer Ruhe gebracht, in die sie erst nach einigen Schwingungen

wieder zurückkehrt. Entfernt man den Magneten etwas von der Magnetnadel und stößt diese erneut an, so erfolgen die Schwingungen weit langsamer.

Die Frequenzänderung der Nadelschwingungen hat folgende Ursache: Die Frequenz ist außer von der schwingenden Masse von der Kraft abhängig, mit der die Magnetnadel zur Nullage zurückgetrieben wird. Die Schwingungen verlaufen um so schneller, je größer die zurücktreibende Kraft ist. Aus den Versuchen folgt mithin, daß die Kraftwirkung im Magnetfeld an verschiedenen Stellen des Feldes verschieden groß ist. Die Größe der Kraft ist kennzeichnend für die Stärke des magnetischen Feldes an den einzelnen Stellen. Man bezeichnet sie deshalb entsprechend der elektrischen Feldstärke als die **magnetische Feldstärke.**

Die magnetische Feldstärke wird gekennzeichnet durch das Formelzeichen $\mathfrak{H}$. Sie ist eine gerichtete Größe, mithin ein *Vektor*; denn die anziehende bzw. abstoßende Kraft wirkt in jedem Punkt eines magnetischen Feldes stets in einer bestimmten Richtung, zu deren Veranschaulichung man die Feldlinien eingeführt hat. Der absolute Betrag der Feldstärke wird mit H bezeichnet.

2. Die quantitative Bestimmung der magnetischen Feldstärke. Wir beschränken uns im folgenden auf die Untersuchung der Feldstärke im Innern einer stromdurchflossenen Spule und stellen fest, von welchen Größen die Feldstärke abhängig ist. Die Spule wird mit einem Strommesser, einem Schiebewiderstand und einem Schalter in Reihe an eine Gleichspannungsquelle geschaltet. An den Schalen einer zweiarmigen Waage ist mittels zweier Fäden ein dünner Holzstab in waagerechter Lage so befestigt, daß er mit der Spulenachse zusammenfällt (Abb. **200**/1). In der Mitte der Spule ist senkrecht durch den Holzstab ein Stück einer magnetisierten Nähnadel gesteckt. Die Einstellung der Waage wird durch Projektion weithin sichtbar gemacht.

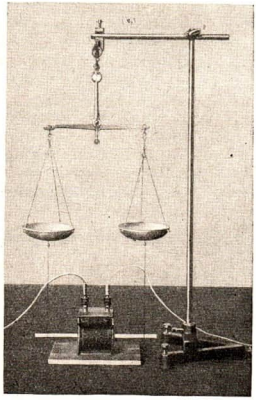


Abb. **200**/1. Messen der magnetischen Feldstärke des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule mittels einer Waage

a) Die Abhängigkeit der Feldstärke von der Stromstärke. In einer Versuchsreihe wird festgestellt, wie die Stromstärke des Spulenstromes die magnetische Feldstärke beeinflußt. Durch Verändern des Widerstandes werden Ströme verschiedener Stärke eingestellt. Bei geöffnetem Schalter befindet sich die Waage im Gleichgewicht. Wird der Schalter geschlossen, so lenkt das entstandene Magnetfeld der Spule die Nadel etwas aus ihrer vertikalen Richtung ab. Durch das Auflegen von Gewichtsstücken auf die eine Schale wird die Waage wieder ins Gleichgewicht gebracht.

Die Gewichte sind ein Maß für die Kraft P, mit der das Magnetfeld der Spule auf die Nadel wirkt, und damit ein Maß für die magnetische Feldstärke der Spule. Die Meßwerte der Versuchsreihe sind in einem Kraft-Stromstärke-Diagramm fest-

gehalten (Abb. **201**/1). Wir sehen, daß die Bildpunkte fast genau auf einer Geraden liegen, und entnehmen daraus, daß die Quotienten zusammengehöriger Wertepaare von P und I annähernd konstant sind. Da die Kraft P ein Maß für den Betrag H der Feldstärke des Magnetfeldes ist, erkennt man aus der Kurve, daß

$$H \sim I$$

ist.

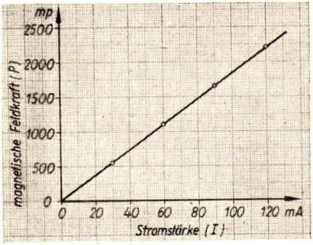


Abb. **201**/1. P-I-Diagramm zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der magnetischen Kraft von der Stromstärke — Windungszahl der verwendeten Spule 500

Der Betrag H der magnetischen Feldstärke einer Spule ist der Stromstärke I des Spulenstromes proportional.

b) Die Abhängigkeit der Feldstärke von der Windungszahl der Spule. In einer zweiten Versuchsreihe wird die Stromstärke des Spulenstromes konstant gehalten. Es werden nacheinander Spulen untersucht, die gleiche Länge aber verschiedene Windungszahlen aufweisen. Die Feldkraft wird in gleicher Weise wie bei der ersten Versuchsreihe gemessen. Auch hier ergibt das Kraft-Windungszahl-Diagramm (Abb. **201**/2), daß der Quotient aus der Feldkraft P und der Windungszahl w der Spule annähernd konstant ist. Es folgt daraus, daß

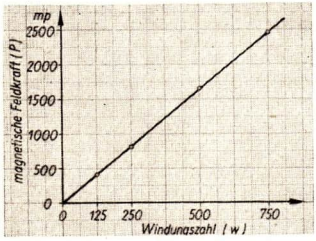


Abb. **201**/2. P-w-Diagramm zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der magnetischen Kraft von der Windungszahl der Spule

$$H \sim w$$

ist.

Der Betrag H der magnetischen Feldstärke einer Spule ist bei konstanter Stromstärke und gegebener Spulenlänge der Windungszahl w der Spule proportional.

c) Die Abhängigkeit der Feldstärke von der Spulenlänge. In einer dritten Versuchsreihe wird die bisher verwendete Spule durch eine doppelt so lange Spule mit gleicher Windungszahl ersetzt. Statt einer solchen Spule kann man auch zwei Spulen verwenden, die die gleiche Länge wie die bisher benutzten, aber die halbe Windungszahl haben. Man stellt die Spulen dicht hintereinander und schaltet sie in Reihe. Dann verteilt sich dieselbe Anzahl von Windungen über die doppelte Länge. Das bedeutet, daß auf die Längeneinheit nur halb so viel

Windungen kommen. Demnach ist in jeder Spule entsprechend dem soeben gefundenen Gesetz $H \sim w$ nur die halbe Feldstärke wirksam. Es folgt daraus die Abhängigkeit:

$$H \sim \frac{1}{l}.$$

Der Betrag H der magnetischen Feldstärke einer Spule ist bei konstanter Stromstärke und gegebener Windungszahl der Spulenlänge l umgekehrt proportional.

d) Die Unabhängigkeit der Feldstärke vom Spulenquerschnitt. Benutzt man zu den Versuchen Spulen gleicher Windungszahl und gleicher Länge, aber von verschiedenem Querschnitt, so findet man, daß *die magnetische Feldstärke von der Querschnittsfläche der Spule unabhängig ist.* Sie ist in Spulen verschiedenen Querschnittes gleich groß, wenn in ihnen die Stromstärke, die Windungszahl und die Länge gleich sind. Dies gilt allerdings nur für Spulen, deren Querschnitt als klein gegenüber ihrer Länge angesehen werden kann.

3. Die Definition und die Maßeinheit der magnetischen Feldstärke. Aus den vorangehenden Versuchen kann gefolgert werden, daß die gleiche Kraftwirkung und damit die gleiche Feldstärke immer dann vorliegt, wenn der Ausdruck $\frac{I \cdot w}{l}$ gleichen Wert besitzt. Denn die im 2. Abschnitt getrennt angegebenen Abhängigkeiten der Feldstärke lassen sich zu einem Ausdruck vereinigen:

$$H \sim \frac{I \cdot w}{l}.$$

Diesem Ergebnis kann man durch Einführen eines Proportionalitätsfaktors die Form einer Gleichung geben:

$$H = k \cdot \frac{I \cdot w}{l}.$$

Der Faktor k nimmt den Wert 1 an, wenn die Maßeinheiten der in der Gleichung auftretenden Größen entsprechend gewählt werden. Man setzt deshalb als Einheit der magnetischen Feldstärke eine *Amperewindung je Meter* (Aw/m) fest. Da die Windungszahl w nicht dimensioniert ist, beschränkt man sich für die magnetische Feldstärke meist auf die Maßeinheit

ein Ampere je Meter (A/m).

Trotz des Fehlens der Windungszahl w in dieser Maßeinheit ist zu beachten, daß die Anzahl der Windungen die Größe der magnetischen Feldstärke mitbestimmt. Es gilt nach dem Vorangehenden folgende Definition für die magnetische Feldstärke im Innern einer Spule von der Länge l und der Windungszahl w, die vom Strom I durchflossen wird:

Die magnetische Feldstärke im Innern einer stromdurchflossenen Spule ist gleich dem Quotienten aus dem Produkt der in Ampere gemessenen Stromstärke mit der Windungszahl der Spule und der in Metern gemessenen Spulenlänge. Die Feldstärke wird in Ampere je Meter (A/m) gemessen.

$$H = \frac{I \cdot w}{l}.$$

Die Richtung des Vektors $\mathfrak{H}$ der magnetischen Feldstärke ist durch die Richtung der Feldlinien des magnetischen Feldes bestimmt.

Die Dimension der magnetischen Feldstärke ist

$$[H] = \frac{[\mathrm{A}]}{[\mathrm{m}]}.$$

Beispiel: In einer Spule mit 1000 Windungen und einer Länge von 40 cm fließe ein Strom von 3 A. Die magnetische Feldstärke im Innern der Spule beträgt dann

$$H = \frac{3 \cdot 1000}{0{,}40}\,\mathrm{A/m} = 7500\,\mathrm{A/m}.$$

Dieselbe Feldstärke herrscht in einer Spule von gleicher Länge mit 500 Windungen bei 6 A oder in einer Spule mit 250 Windungen bei 12 A.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Wie kann man eine Magnetnadel zum Vergleich der Feldstärke an verschiedenen Stellen eines Magnetfeldes verwenden? Es sind die Mitteilungen des 1. Abschnittes zu beachten.
2. Wodurch ist die Richtung der magnetischen Feldstärke festgelegt?
3. Eine Spule hat 5000 Windungen und eine Länge von 7 cm und wird von einem Strom mit der Stärke 0,1 A durchflossen. Wie groß ist die magnetische Feldstärke in der Spulenmitte?
4. In einer Spule mit 250 Windungen und einer Länge von 15 cm soll ein Magnetfeld von 20000 A/m erzeugt werden. Welche Stromstärke hat der durchfließende Strom?
5. Ein Magnetfeld hat die Stärke 1 A/m, ein anderes hat die Stärke 1 A/cm. Welches Magnetfeld ist das stärkere?

§ 51. Die Kraftwirkung eines Magnetfeldes auf einen stromdurchflossenen Leiter

1. Die Ablenkung eines Leiters im Magnetfeld. Bereits in der Grundschule haben wir mit Hilfe eines schaukelförmigen Leiters die Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld kennengelernt. Abb. 203/1 gibt den Versuch noch einmal schematisch wieder. Diese Ablenkung ist die Folge der Überlagerung zweier Magnetfelder. Es überlagert sich das homogene Feld des Feldmagneten mit dem aus konzentrischen Kreisen bestehenden Feld des stromdurchflossenen Leiterstückes (Abb. 204/1a und b). Das resultierende Feld zeigt auf der einen Seite des Leiters eine Verdichtung und auf der anderen Seite eine Auflockerung der Feldlinien.

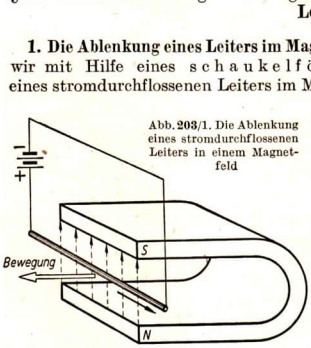


Abb. 203/1. Die Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld

Der stromdurchflossene Leiter erfährt eine Krafteinwirkung aus dem Bereich

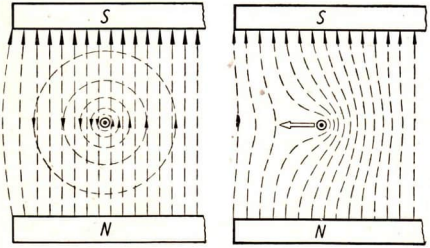


Abb. 204/1. Überlagerung eines homogenen Magnetfeldes mit dem Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters. Der Leiter steht senkrecht auf der Zeichenebene.
links: Gesonderte Darstellung beider Felder,
rechts: das resultierende Feld

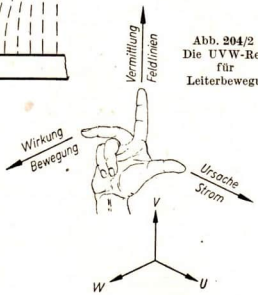


Abb. 204/2
Die UVW-Regel für Leiterbewegung

der größeren Feldstärke, gekennzeichnet durch dichter verlaufende Feldlinien, zum Bereich der geringeren Feldstärke hin, gekennzeichnet durch weniger dicht verlaufende Feldlinien. Die Ursache dieser Kraft ist die quer zu den Feldlinien auftretende Druckspannung (vgl. § 49, 2).

Die Richtung der ablenkenden Kraft wird durch die *Dreifingerregel der rechten Hand*, die sogenannte *UVW-Regel für Leiterbewegung*, angegeben (Abb. 204/2):

Spreizt man die drei ersten Finger der rechten Hand senkrecht zueinander und hält
den *Daumen* in die Richtung des Stromes — Ursache,
den *Zeigefinger* in die Richtung der Feldlinien — Vermittlung,
so gibt
der *Mittelfinger* die Richtung der Bewegung — Wirkung
an.

2. Das Drehspulgalvanometer. Wie das *Drehspulgerät* gebaut ist und wie es zum Messen der Stromstärke und der Spannung verwendet wird, ist uns schon von früher her bekannt. Hier sei nur auf einen Umstand hingewiesen, der für das Verständnis der Arbeitsweise des Gerätes von besonderer Bedeutung ist. Wir wissen, daß jedes Drehspulgerät mit einem kräftigen Dauermagneten ausgestattet ist. Seine Schenkel umfassen einen zwischen ihnen fest angebrachten massiven Eisenzylinder (Abb. 204/3). Durch diesen wird das Feld des

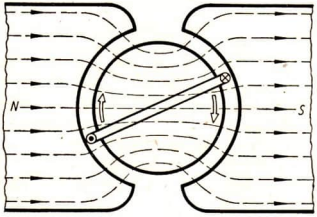


Abb. 204/3. Magnetfeld eines Drehspulgerätes

Dauermagneten so geändert, daß es in dem schmalen, zwischen den Polschuhen und dem Eisenzylinder vorhandenen *Luftspalt* fast radial verläuft. In diesem Luftspalt befinden sich die Längsseiten der Drehspule.

Wird die Spule von einem Strom durchflossen, so dreht sie sich unter dem Einfluß der im magnetischen Feld auftretenden Kräfte gemäß der UVW-Regel für Leiterbewegung so weit, bis das Gleichgewicht zwischen der Feldkraft und der Spannkraft der Spiralfedern des Gerätes erreicht ist. Da das Feld im gesamten Drehbereich radial verläuft, wirkt die Feldkraft auf die Spule überall mit der gleichen Stärke. Die *Skala* ist infolgedessen *linear* geteilt.

3. Das Dynamometer. Das *Dynamometer* ist ein elektrisches Meßinstrument, das vorwiegend zum Messen der elektrischen Leistung als *Wattmeter* verwendet wird. Seine Hauptteile sind eine feste, aus dickem Draht bestehende Spule und eine aus dünnem Draht gewickelte bewegliche Spule (Abb. **205**/1). Die bewegliche Spule ist mit einem Zeiger fest verbunden. Die feste Spule wird von dem Strom I durchflossen, dessen Leistung gemessen werden soll. Sie wird wie ein Strommesser in den Stromweg geschaltet und heißt deswegen *Stromspule*. Die drehbare Spule hat einen großen Widerstand und wird wie ein Spannungsmesser in den Nebenschluß geschaltet. Sie trägt daher den Namen *Spannungsspule* (Abb. **205**/2).
Wegen ihres hohen Widerstandes wird sie nur von einem schwachen Strom durchflossen.

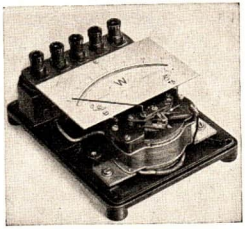


Abb. 205/1. Dynamometer, hergestellt in den Elektro-Apparate-Werken J. W. Stalin, Berlin-Treptow. Man erkennt die feststehende Stromspule und die drehbare Spannungsspule, an der der Zeiger befestigt ist.

Abb. 205/2
Schaltbild eines Dynamometers

Die Drehung der dünndrähtigen Spule wird durch die Kraftwirkung der Magnetfelder beider Spulen hervorgerufen. Die Magnetfelder entsprechen denen kurzer Stabmagnete. Fließt ein Strom der Stärke I durch die Stromspule und ein Strom der Stärke I_1 durch die Spannungsspule, so dreht sich die Spannungsspule, bis die Spannkraft einer an der Achse der Spule angreifenden Spiralfeder der auftretenden Magnetkraft das Gleichgewicht hält. Der Betrag H der magnetischen Feldstärke des in der Stromspule erzeugten Magnetfeldes ist nach § 50, 2a der Stromstärke I proportional. Die Stärke I_1 des durch die Spannungsspule fließenden Stromes ist nach dem Ohmschen Gesetz der Spannung U proportional.

Mithin bestehen für die auf die drehbare Spule wirkende magnetische Kraft P, unabhängig voneinander, folgende Abhängigkeiten:

$$P \sim H \sim I$$

und

$$P \sim I_1 \sim U.$$

Daraus folgt

$$P \sim U \cdot I.$$

Das Produkt $U \cdot I$ gibt aber die Stromleistung an. Die ablenkende Kraft und somit auch der Zeigerausschlag sind demnach der Leistung des Stromes proportional.

Ähnlich gebaut wie ein Wattmeter ist das Meßwerk eines *Elektrizitätszählers*. Bei ihm fehlt die Spiralfeder. Die Drehung wird nicht verhindert, aber magnetisch gebremst. Die Zahl der Umdrehungen wird durch ein Zählwerk festgestellt. Man erhält so einen Wert, der dem Produkt $U \cdot I \cdot t$ proportional ist. Auf diese Weise mißt ein Elektrizitätszähler die vom Strom verrichtete Arbeit, mithin die verbrauchte elektrische Energie.

4. Der Schleifenoszillograph. Der *Schleifenoszillograph*, auch *Schwingungsschreiber* genannt, dient zum Aufzeichnen von Stromschwingungen und anderen zeitlich veränderlichen Strömen auf einem Bildschirm (Abb. **206**/1). Zwischen den Polen eines kräftigen permanenten Hufeisenmagneten ist eine aus dünnem Silber- oder Kupferdraht bestehende, leicht bewegliche Schleife angebracht, die einen sehr kleinen, leichten Spiegel trägt. Fließt durch die Drahtschleife ein Strom, so werden

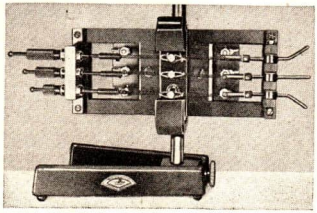


Abb. **206**/1. Dreifach-Schleifenoszillograph des VEB Labor-Prüfgerätebau Karl-Marx-Stadt

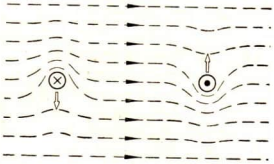


Abb. **206**/2. Überlagerung der Magnetfelder im Schleifenoszillographen (schematisch)

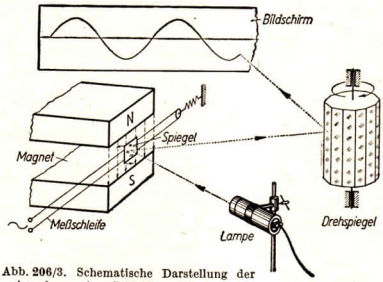


Abb. **206**/3. Schematische Darstellung der Anordnung eines Schleifenoszillographen

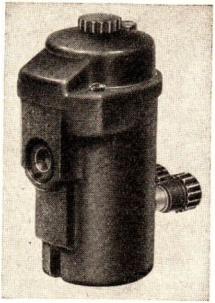
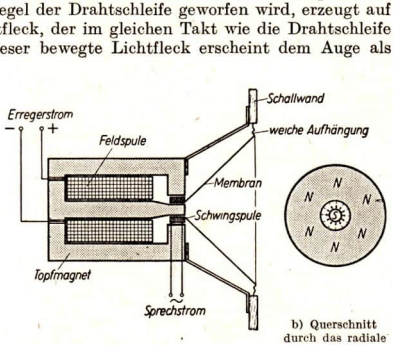


Abb. **206**/4. Technische Meßschleife aus dem RFT-Gerätewerk Zwönitz VEB

die beiden Leiterstücke der Drahtschleife durch Überlagern ihrer Magnetfelder mit dem Dauermagnetfeld in einander entgegengesetzten Richtungen aus ihrer Ruhelage abgelenkt (Abb. **206**/2). Wird die Stromrichtung umgekehrt, so erfolgt auch die Ablenkung der beiden Leiterstücke der Drahtschleife in umgekehrter Richtung wie vorher. Wird die Drahtschleife von Wechselstrom durchflossen, so schwingt sie mit der Frequenz des Wechselstromes hin und her. Ein paralleles Lichtbündel, das auf den Spiegel der Drahtschleife geworfen wird, erzeugt auf einem Bildschirm einen Lichtfleck, der im gleichen Takt wie die Drahtschleife auf und nieder schwingt. Dieser bewegte Lichtfleck erscheint dem Auge als gerader Lichtstreifen. Stellt man in den Weg des reflektierten Lichtes einen Drehspiegel, so wird der Lichtstreifen zu einer Wellenlinie auseinandergezogen (Abb. **206**/3). Abb. **206**/4 zeigt eine Meßschleife für technische und wissenschaftliche Untersuchungen.



a) Längsschnitt

b) Querschnitt durch das radiale Magnetfeld im Luftspalt

Abb. 207/1. Elektrodynamischer Lautsprecher (schematisch)

Schaltzeichen eines Lautsprechers

5. Der elektrodynamische Lautsprecher. Der *elektrodynamische Lautsprecher* besteht im wesentlichen aus einem Topfmagneten und einer Stromspule, der *Schwingspule*, die aus zahlreichen Windungen feinen Drahtes besteht und an einer kegelförmigen Membran befestigt ist (Abb. **207**/1). Im zylindrischen Luftspalt des Topfmagneten wird durch eine von konstantem Gleichstrom durchflossene Feldspule oder durch einen Permanentmagneten ein radiales Magnetfeld erzeugt. In diesem Spalt befindet sich die Schwingspule, die vom Sprechstrom durchflossen wird. Je nach der Stärke dieses Stromes wird die Schwingspule mehr oder weniger tief in den Spalt hineingezogen. Ihre Schwingungen übertragen sich auf die Membran und werden von dieser abgestrahlt. Die Schwankungen des Sprechstromes werden auf diese Weise wieder in Schallwellen umgesetzt.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Wie wirkt ein Magnetfeld auf einen in ihm befindlichen, vom Strom durchflossenen Leiter?
2. Wie lautet die UVW-Regel? Warum nennt man sie so?
3. Von welchen Größen ist die Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld abhängig? In welcher Weise wird die ablenkende Kraft von diesen Größen beeinflußt?
4. Wie wirkt der elektrodynamische Lautsprecher? Wie ist die durch ihn bewirkte Lautverstärkung zu erklären?

5. Erläutern Sie den Bau und die Wirkungsweise eines Schleifenoszillographen! Zeichnen Sie seinen Aufriß und seinen Seitenriß! Stellen Sie die Bewegungsvorgänge der Drahtschleife durch eine Zeichnung dar!
6. Beschreiben Sie den Bau und die Wirkungsweise eines Dynamometers! Welche Spulen enthält das Gerät? Wie sind sie geschaltet?
7. Zeichnen Sie ein Schaltbild für den Anschluß dreier parallelgeschalteter Glühlampen und eines Motors an ein Gleichstromnetz unter Zwischenschalten eines Leistungsmessers!

§ 52. Beeinflussung des Magnetfeldes durch Eisen

1. Die Verstärkung eines Magnetfeldes durch Einbringen von Eisen. Eine Magnetnadel wird in der Verlängerung der Achse eines Dauermagneten aufgestellt. Ist der Abstand vom Magneten genügend groß, so wird sie nur um einen kleinen Winkel aus dem *magnetischen Meridian* abgelenkt. Durch einen zwischen den Magnetstab und die Magnetnadel in das Magnetfeld gebrachten unmagnetischen Eisenkörper wird die Ablenkung der Magnetnadel wesentlich vergrößert (Abb. 208/1). Wird das Magnetfeld durch eine stromdurchflossene Spule erregt, so verstärkt das Hineinschieben eines Eisenkerns in die Spule gleichfalls die Wirkung des Magnetfeldes.

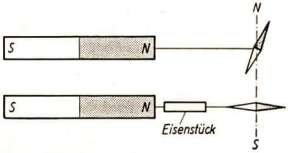


Abb. 208/1. Ablenkung einer Magnetnadel in einem Magnetfeld. Durch ein in das Feld gebrachtes Eisenstück wird die Ablenkung verstärkt.

2. Die magnetische Sättigung. Die Verstärkung eines magnetischen Feldes durch Einlagern von Eisen kann nicht beliebig gesteigert werden. Man hat die Abhängigkeit der Tragkraft eines Elektromagneten von der Stärke des Erregerstromes untersucht und hat festgestellt, daß sich die Tragkraft trotz weiterer Verstärkung des Stromes nicht über einen bestimmten Wert hinaus steigern läßt. In Abb. 208/2 sind als Beispiel Meßergebnisse graphisch dargestellt, die an einem Schwachstrom-Elektromagneten ermittelt wurden. Man sieht deutlich, daß die Kurve allmählich von einem stark ansteigenden in einen fast waagerecht verlaufenden Teil übergeht. Der ansteigende Teil der Kurve zeigt, daß bei einer Verstärkung des Spulenstromes die magnetische Feldstärke ebenfalls zunimmt. Dagegen läßt der waagerechte Teil erkennen, daß eine weitere Vergrößerung des Spulenstromes kein nennenswertes Anwachsen der magnetischen Kraftwirkung verursacht.

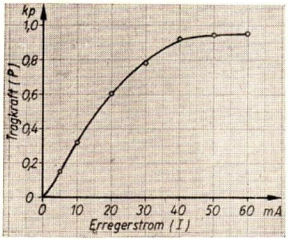


Abb. 208/2. Die Tragkraft eines Elektromagneten als Funktion des Erregerstromes

Man bezeichnet das Eisen in diesem Falle als *magnetisch gesättigt*. Der waagerechte Teil der Kurve entspricht der magnetischen Sättigung des Eisens.

3. Die Elementarmagnete. Zur Erklärung der magnetischen Sättigung des Eisens im magnetischen Feld stützte sich bereits *Ampère* auf die Vorstellung der Elementarmagnete. Man war damals der Ansicht, daß die Atome bzw. die Moleküle selbst die Elementarmagnete seien. Doch müssen diese Vorstellungen auf Grund neuerer Untersuchungen weitgehend berichtigt und ergänzt werden. Es hat sich gezeigt, daß der Magnetismus des Eisens und einiger anderer Stoffe mit ihrem Kristallaufbau zusammenhängt. Wie die meisten festen Stoffe kristallisieren auch die Metalle in bestimmten Formen, das Eisen beispielsweise würfelförmig. Man hat erkannt, daß die kleinsten *Eisenkristallwürfel*, die die Bauelemente größerer Eisenkristalle bilden, wie die Ziegel einer Mauer zu quaderförmigen Gebilden zusammengesetzt sind. Diese Quader umfassen etwa 10^5 Atome und haben Kantenlängen in der Größenordnung von etwa 10^{-3} mm.

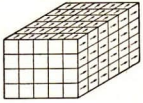


Abb. 209/1. Weißscher Bezirk (schematisch). Er besteht aus einer großen Zahl kleinster magnetischer Eisenkristalle mit gleicher Feldrichtung.

Auf Grund umfangreicher Forschungen, an denen insbesondere der deutsche Physiker *P. Weiß* beteiligt war, wurde festgestellt, daß die kleinsten Eisenkristallwürfel stets magnetisch sind und daß ihre Feldrichtung mit einer Kantenrichtung der Quader übereinstimmt. Innerhalb eines bestimmten Eisenquaders sind alle kleinsten Eisenwürfel gleichsinnig magnetisch (Abb. 209/1). Diese magnetischen Eisenquader bezeichnet man als die *Weißschen Bezirke*. Sie sind die *Elementarmagnete*. In den verschiedenen Weißschen Bezirken sind die Feldrichtungen entsprechend den sechs räumlichen Kantenrichtungen angeordnet. Es sind somit sechs verschiedene Feldrichtungen in den Weißschen Bezirken des Eisens möglich und im unmagnetischen Eisen auch vorhanden (Abb. 209/2). Da im unmagnetischen Eisen die möglichen Feldrichtungen alle in annähernd gleicher Zahl auftreten, hebt sich die magnetische Wirkung der Weißschen Bezirke nach außen hin auf.

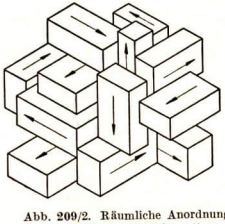


Abb. 209/2. Räumliche Anordnung einiger Weißscher Bezirke mit verschiedenen Feldrichtungen im unmagnetischen Eisen

Befindet sich das Eisen als Kern in einer stromdurchflossenen Spule und wird der Spulenstrom gesteigert, so klappen die Feldrichtungen der Weißschen Bezirke infolge der Wirkung des äußeren Magnetfeldes der Spule nach und nach in die Kantenrichtung um, die mit der Richtung des äußeren Magnetfeldes den kleinsten spitzen Winkel einschließt (Abb. 209/3a). Bei weiterer Verstärkung des Spulenstromes wird eine Parallelstellung der Feldrichtungen sämtlicher Weißscher Bezirke zur Richtung des äußeren Magnetfeldes der Spule erreicht (Abb. 209/3b).

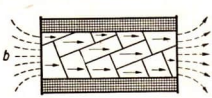


Abb. 209/3. Anpassen der Feldrichtungen der Weißschen Bezirke in die Richtung des äußeren Feldes (stark schematisiert)

a) Spitzer Winkel bei schwacher Magnetisierung, b) Zusammenfallen mit der äußeren Feldrichtung bei magnetischer Sättigung

Die Feldstärke des Magnetfeldes einer Stromspule läßt sich durch Einführen eines Eisenkerns nur so lange vergrößern, bis die Feldrichtungen aller Weißschen Bezirke des Eisens mit dem Magnetfeld der Spule gleichgerichtet sind.

4. Die Permeabilität. Mit einer eisenfreien Stromspule erreicht man dieselbe Wirkung wie mit einer einen Eisenkern enthaltenden Spule, wenn man die eisenfreie Spule mit einer entsprechend höheren Amperewindungszahl je Meter belastet. Die Verwendung eines Eisenkerns ist somit selbst gleichbedeutend einer Vergrößerung der Amperewindungszahl einer Spule. Es ist erforderlich, den Einfluß zahlenmäßig zu erfassen, den das Einbringen von Eisen auf das magnetische Feld hat. Es geschieht dies durch die Einführung des Begriffs der **Permeabilität** (Formelzeichen μ). Die Permeabilität ist von hoher Bedeutung für die Technik.

Die Permeabilität gibt an, wievielmal so groß die Feldstärke in einer mit einem Eisenkern versehenen Stromspule gegenüber der Feldstärke einer mit Luft gefüllten eisenfreien Spule ist.

Durch den im folgenden beschriebenen Versuch läßt sich eine angenäherte Bestimmung der Permeabilität durchführen:

Eine mit einem Eisenkern versehene Spule wird mit einer Spannungsquelle, einem Schiebewiderstand und einem Strommesser in Reihe geschaltet. Unmittelbar über der Spule ist ein unmagnetischer Eisenkörper an einer Federwaage befestigt (Abb. 210/1). Beim Einschalten des Stromes wird der Eisenkörper angezogen. Mit der Federwaage wird die zum Abheben des Eisenkörpers erforderliche Abreißkraft P an Stelle der Tragkraft gemessen.

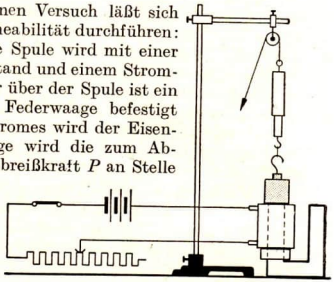


Abb. 210/1. Versuchsanordnung zur angenäherten Bestimmung der Permeabilität des Eisens

Die Stromstärke wird zunächst gering gehalten (I_1); man erhält eine bestimmte Abreißkraft, die als Maß für die Feldstärke dient. Dann wird der Eisenkern entfernt und die Stärke des Stromes (I_2) so weit erhöht, daß die Abreißkraft P wieder ebenso groß ist wie vorher. Die Spulenlänge und die Windungszahl bleiben unverändert. Nach der oben angegebenen Definition der Permeabilität ist dann

$$\mu = \frac{H_1}{H_2} = \frac{\dfrac{I_1 \cdot w}{l}}{\dfrac{I_2 \cdot w}{l}} = \frac{I_1}{I_2}.$$

Es ergibt sich etwa der Wert $\mu = 100$.

5. Die Abhängigkeit der Permeabilität von der Feldstärke. Die Permeabilität hängt von der Art des verwendeten Eisens ab. Jedoch ist sie bei ein und derselben Eisensorte nicht konstant, sondern hängt auch von der Feldstärke des äußeren Magnetfeldes ab. Die Werte der Permeabilität sind für die verschiedenen Eisensorten in ihrer Abhängigkeit von der Feldstärke des äußeren Magnetfeldes experimentell sehr genau bestimmt worden. Abb. 211/1 faßt die Ergebnisse solcher Messungen für

Weicheisen in einer graphischen Darstellung zusammen. Aus den Kurven kann man ersehen, daß bei kleinen magnetischen Feldstärken die Permeabilität etwa proportional mit der Feldstärke ansteigt. Nach Erreichen eines Maximums wird die Permeabilität mit zunehmender Feldstärke wieder kleiner. Das bedeutet, daß bei hinreichend starken Magnetfeldern die Vergrößerung der Kraftwirkung durch das Eisen nur noch gering ist. Diese Abnahme der Permeabilität bei größeren Werten der Feldstärke hat ihre Ursache in der magnetischen Sättigung des Eisens.

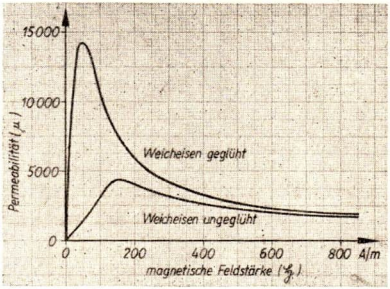
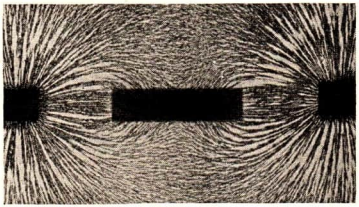


Abb. 211/1. μ-$\mathfrak{H}$-Diagramm zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Permeabilität des Eisens von der Feldstärke bei verschiedener Vorbehandlung des Eisens

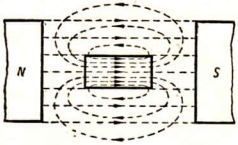
6. Der Verlauf des Magnetfeldes im Eisen. Die verstärkende Wirkung des Eisens in einem Magnetfeld macht sich in einem veränderten Feldlinienverlauf bemerkbar. Dies zeigt der folgende Versuch:

Zwei kräftige Stabmagnete werden mit ungleichnamigen Polen einander gegenübergelegt und mit einer Glas- oder einer Pappscheibe bedeckt. Unterhalb der Scheibe wird vorher noch ein kurzer unmagnetischer Eisenstab zwischen die Magnetpole gelegt. Durch Aufstreuen von Eisenfeilspänen auf die Scheibe wird das Magnetfeld sichtbar gemacht. Das magnetische Feld zwischen den einander gegenüberliegenden Magnetpolen erscheint durch den hineingebrachten Eisenstab gegenüber der ursprünglichen Feldform verändert (Abb. 211/2). Die Feldlinien verlaufen in größerer Zahl durch den Eisenstab, dagegen nur in geringerer Zahl außerhalb des Eisenstabes.

Dieser Feldverlauf hat seine Ursache in der Überlagerung zweier Einzelfelder, da auch der vorher unmagnetische Eisenstab magnetisch



a) Feldlinienbild



b) Überlagerung der beiden Felder in schematischer Darstellung

Abb. 211/2. Verformung eines Magnetfeldes durch einen eingebrachten Eisenstab

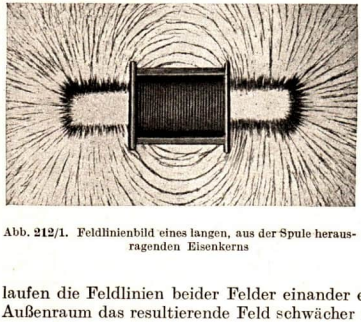


Abb. 212/1. Feldlinienbild eines langen, aus der Spule herausragenden Eisenkerns

geworden ist. Zu den Magnetfeldern der Stabmagnete tritt noch das Magnetfeld der parallel ausgerichteten Elementarmagnete im Innern des magnetisierten Eisenstabes. Die Feldlinien des magnetisierten Eisenstabes besitzen innerhalb des Eisens den gleichen Richtungssinn wie die Feldlinien des magnetisierenden Feldes. Das resultierende Feld ist daher im Eisen stärker als das magnetisierende Feld. Außerhalb des Eisens verlaufen die Feldlinien beider Felder einander entgegengesetzt; mithin wirkt im Außenraum das resultierende Feld schwächer als das magnetisierende Feld.

Das Eisen ist für magnetische Feldlinien aufnahmefähiger als Luft.

Die Bezeichnung Permeabilität, die soviel bedeutet wie magnetische Durchlässigkeit, erhält hierdurch ihre Berechtigung.

Die große Permeabilität des Eisens wird praktisch ausgenutzt, wenn man einem magnetischen Feld nicht nur eine größere Stärke, sondern auch eine bestimmte Form geben will. So zeigt Abb. 212/1 das Feldlinienbild eines langen, aus der Spule herausragenden Eisenstabes. Das Magnetfeld ist in die Länge gestreckt. Die Feldlinien treten größtenteils nicht aus den Enden der Spule, sondern aus den Enden des Eisenkerns in den umgebenden Raum aus.

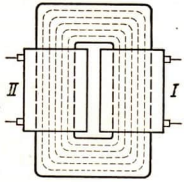


Abb. 212/2 Feldlinienverlauf im Eisenkern eines Transformators (schematisch)

Bei Transformatoren und vielen anderen technischen Einrichtungen kommt es darauf an, eine Streuung der Magnetfelder und die damit verbundenen Energieverluste möglichst zu vermeiden. Dies wird durch einen geschlossenen Eisenkern erreicht, in dem die magnetischen Feldlinien ihrer ganzen Länge nach verlaufen (Abb. 212/2). Man spricht in solchen Fällen vom *Eisenschluß*.

Abb. 212/3 zeigt das Feldlinienbild eines zwischen zwei ungleichnamigen Magnetpolen bestehenden Magnetfeldes. Zwischen den Polen befindet sich ein Eisenring. Aus dem Feldlinienbild ist zu erkennen, daß die Feldlinien in größerer Zahl im Eisenring verlaufen und daß *die vom Eisenring eingeschlossene Zone feldfrei* geblieben ist. Man bezeichnet diese feldfreie Zone als magnetisch abgeschirmt und spricht von einer

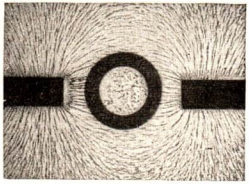


Abb. 212/3. Schirmwirkung eines Eisenringes in einem Magnetfeld

Schirmwirkung des Eisens. Sie wird in der Technik häufig verwendet, wenn es darauf ankommt, einzelne Geräteteile gegen äußere störende Magnetfelder abzuschirmen. Dies ist beispielsweise bei manchen Einzelteilen der Rundfunkempfänger erforderlich.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Wie kann man das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule verstärken? Wie kann diese Verstärkung nachgewiesen werden?
2. Was versteht man unter magnetischer Sättigung?
3. Erläutern Sie den Begriff der Elementarmagnete! Was versteht man unter Weißschen Bezirken? Wie erfolgt die Parallelstellung ihrer Feldrichtung mit dem äußeren Magnetfeld?
4. Erläutern Sie den Begriff der Permeabilität! Wie kann man die Größe der Permeabilität bestimmen?
5. Inwiefern hängt die Permeabilität von der magnetischen Feldstärke ab?
6. Aus welchem Grunde verwendet man in der Technik fast immer eisengefüllte Magnetfelder? Geben Sie Beispiele dafür an!

§ 53. Ferromagnetische Stoffe

1. Magnetisch weiche und magnetisch harte Stoffe. Die gleichen magnetischen Eigenschaften wie Eisen, nur in schwächerem Maße, zeigen die anderen beiden Metalle der Eisengruppe, Nickel und Kobalt. Der Magnetismus der Eisenmetalle wird nach ihrem wichtigsten Vertreter *Ferromagnetismus* genannt. Aber auch die magnetischen Eigenschaften der einzelnen Eisensorten sind verschieden. Dies beweist folgender Versuch:

In eine stromdurchflossene Spule werden zwei Eisenstäbe von gleicher Länge und von gleichem Querschnitt gebracht. Der eine Stab besteht aus geglühtem Schmiedeeisen, der andere aus Stahl. Durch das Magnetfeld der Stromspule werden beide Stäbe magnetisiert. Beide Stäbe werden dann aus der Spule herausgenommen und in Eisenfeilspäne getaucht. Durch die Menge der festgehaltenen Eisenfeilspäne wird die Stärke des *zurückgebliebenen Magnetismus* veranschaulicht. Es erweist sich, daß an dem Stahlstab eine weit größere Menge von Eisenfeilspänen haftenbleibt als an dem ausgeglühten Eisenstab. Dabei war der ausgeglühte Stab in der stromdurchflossenen Spule ebenfalls magnetisch. Dies kann man nachweisen, indem man den Stab mit seinem Ende in Eisenfeilspäne taucht, während er sich noch in der stromdurchflossenen Spule befindet.

Man nennt Stoffe wie geglühtes Eisen, die in einem Magnetfeld leicht magnetisiert werden, ihren Magnetismus aber außerhalb dieses Magnetfeldes wieder verlieren, *magnetisch weich.*

Solche Stoffe, die wie Stahl ihren Magnetismus außerhalb des erregenden Magnetfeldes beibehalten, nennt man *magnetisch hart.* Der nach der Magnetisierung zurückgebliebene Magnetismus wird *remanenter*[1] *Magnetismus* genannt.

Da magnetisch harte Stoffe den remanenten Magnetismus nach dem Aufhören des erregenden Magnetfeldes nicht verlieren, heißen sie auch *permanent magnetisch.*

[1] remanére (lat.) = zurückbleiben

Magnetisch weiches Eisen ist beispielsweise das seit 1920 in Deutschland hergestellte *Carbonyleisen*. Es wird aus *Eisenpentacarbonyl* $Fe(CO)_5$ als reinstes Eisen in Pulverform mit einer Korngröße von einigen tausendstel Millimetern gewonnen. Für die Eisenkerne der in der Fernmeldetechnik verwendeten Spulen wird das Carbonyleisenpulver mit einem isolierenden Kunststoff zu festen Körpern zusammengekittet. Auch zur Herstellung der Elektromotoren und Generatoren werden magnetisch weiche Stoffe gebraucht, die schon bei schwachen erregenden Strömen stark magnetisiert werden.

Magnetisch weich sind insbesondere verschiedene *Eisen-Silizium-Legierungen* mit einem Siliziumgehalt von 1% bis 4,5% und einem sehr geringen Kohlenstoffgehalt. Hochpermeable weichmagnetische Werkstoffe sind die *Eisen-Nickel-Legierungen*, von denen das besonders wirksame *Permalloy* neben dem Eisen etwa 78% Nickel enthält.

Für viele Meßinstrumente und für Lautsprecher sind magnetisch harte Stoffe erforderlich, die ihren Magnetismus jahrelang unverändert beibehalten. Ein solcher Stoff ist zum Beispiel Stahl. Stahlmagnete werden daher auch *Dauermagnete* genannt. Als magnetisch besonders hart hat sich der gehärtete *Wolframstahl* erwiesen. Er enthält vor allem Eisen, außerdem Wolfram und Kohlenstoff. Ein anderer hartmagnetischer Werkstoff ist *Alnico*, eine Legierung aus Eisen, Aluminium, Nickel und Kobalt. Es gibt sogar Legierungen, die hartmagnetisch sind, ohne daß ihnen ferromagnetische Stoffe beigemengt sind. Es sind dies die *Heuslerschen Legierungen*. Sie enthalten vorwiegend Mangan und Kupfer mit einem Zusatz eines der Metalle Aluminium, Zinn, Antimon und Wismut.

Tabelle einiger weich- und hartmagnetischer Werkstoffe

Eigenschaft	Stoff	Zusammensetzung in %	Permeabilität μ
weichmagnetisch	Carbonyleisen	Fe > 99,5	5110
	Dynamoblech II	F 98,6; C 0,25; Si 1,03; Spuren von Mn, P, S	160000
	Permalloy A	Fe 21,5; Ni 78,5	32000
hartmagnetisch	gehärteter Wolframstahl	Fe 93,8; W 5,5; C 0,7	33,2
	Alnico	Fe 63; Ni 20; Al 12; Co 5	3,6
	Heuslersche Legierungen	Mn 30; Cu 70; außerdem Al oder Sn, Bi, Sb	—

Die Magnetisierbarkeit des Eisens ist stark von der Temperatur abhängig. Ein Elektromagnet zieht einen an einem Draht hängenden leichten Eisennagel an. Wird der Nagel mittels einer Bunsenflamme bis zum Glühen erhitzt, so wird er nicht mehr angezogen. Seine Magnetisierbarkeit nimmt mit steigender Temperatur ab, bis die Temperatur von 769° C erreicht ist. Übe schreitet das Eisen diese Temperatur, die man nach ihrem Erforscher als den *Curie-Punkt* bezeichnet, so ist es nicht mehr magnetisierbar. Seine Eigenschaften haben sich geändert. Beim Abkühlen unter 769° C erlangt das Eisen seine normale Magnetisierbarkeit wieder. Die Ursache dieser Erscheinung ist die mit steigender Temperatur zunehmende Wärmebewegung der Moleküle. Sie ist größer als die ordnende Wirkung des äußeren Magnetfeldes.

2. Keramische Magnetwerkstoffe. Eine neuerdings viel verwendete Art ferromagnetischer Stoffe sind die *Ferrite*. Der uns bereits in der Grundschule be-

Abb. 215/1. Dauerabstoßung zwischen zwei Paaren ringförmiger keramischer Magnete. Die abstoßende Kraft hält in jedem Paar den oberen Magnet entgegen der Schwerkraft in der Schwebe. Die in der Mitte stehende Säule dient nur zur Führung.

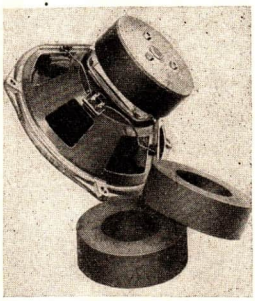


Abb. 215/2. Keramische Dauermagnete aus dem VEB Keramisches Werk, Hescho-Kahla, als Konstruktionsteile elektrodynamischer Lautsprecher, in die sie neuerdings vielfach an Stelle der elektrischen Topfmagnete eingebaut werden.

kanntgewordene *Magneteisenstein* (Magnetit Fe_3O_4) ist ein natürliches Ferrit. Ferrite bestehen aus Eisenoxyd und einem oder mehreren Oxyden zweiwertiger Metalle, z. B. $BaO \cdot 6\,Fe_2O_3$.

Solche Ferrite sind homogene Stoffe ähnlich wie Legierungen; sie lassen sich magnetisieren.

Man kann Magnete, die aus Ferriten bestehen, künstlich herstellen, und zwar nach Verfahren der keramischen Industrie. Die als Ausgangsstoffe dienenden Metalloxyde werden gemahlen und gemischt, sodann zusammen mit einem geeigneten Bindemittel in Stahlmatrizen in die jeweils gewünschte Form gepreßt und schließlich bei Temperaturen zwischen 1000° und 1400° C gebrannt. Solche keramischen Magnetwerkstoffe stellt der VEB Keramisches Werk, Hescho-Kahla, als weichmagnetische und hartmagnetische Ferrite her. Die magnetisch weichen Ferrite nennt man Manifer, die magnetisch harten Maniperm. Die hartmagnetischen Ferrite werden nach ihrer Sinterung durch ein starkes Magnetfeld magnetisiert. Es entstehen auf diese Weise sehr starke Dauermagnete (Abb. 215/1).

Sowohl die weichmagnetischen wie die hartmagnetischen Ferrite werden in steigendem Maße auf fast allen Gebieten der Nachrichtentechnik, insbesondere der Rundfunk- und Fernsehtechnik, als Magnete verwendet (Abb. 215/2).

3. Paramagnetische und diamagnetische Stoffe. Mit Hilfe starker Elektromagnete ist nachgewiesen worden, daß auch alle nicht ferromagnetischen Stoffe in geringem Maße magnetischen Einflüssen unterliegen. Man unterscheidet dabei paramagnetische und diamagnetische Stoffe, je nachdem, ob diese Stoffe beim Einbringen in eine stromdurchflossene Spule deren Feldstärke etwas erhöhen oder sie schwächen. Bei paramagnetischen Stoffen ist die Permeabilität nur wenig größer als 1, bei diamagnetischen Stoffen ist sie ein wenig kleiner als 1. Eine Übersicht über die Permeabilität einiger Stoffe gibt die beigefügte Tabelle.

Permeabilität einiger Stoffe

Stoff	Eigenschaften	Permeabilität μ
Eisen	ferromagnetisch	bis 5000
Nickel		bis 300
Kobalt ...		bis 170
Platin	paramagnetisch	1,000360
Aluminium		1,000023
Hartgummi		1,000014
Wismut ..	diamagnetisch	0,999824
Kupfer....		0,999991
Glas		0,999987

Den Para- oder den Diamagnetismus zeigen auch Flüssigkeiten und Gase. Sauerstoff und Eisenchloridlösungen sind paramagnetisch. Wasser ist diamagnetisch. Bei para- bzw. diamagnetischen Stoffen sind die Atome die Elementarmagneten. Der Ferromagnetismus dagegen hat, wie wir in § 52,3 erfuhren, seine Ursache in dem besonderen kristallinen Aufbau der ferromagnetischen Stoffe.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Wodurch unterscheiden sich magnetisch harte und magnetisch weiche Werkstoffe?
2. Welche eisenfreien Legierungen mit ferromagnetischen Eigenschaften kennen Sie?
3. Nennen Sie Verwendungsmöglichkeiten für magnetisch harte und magnetisch weiche Werkstoffe!
4. Auf welche Weise kann man ein magnetisches Stück Eisen unmagnetisch machen?
5. Was versteht man unter keramischen Magnetwerkstoffen? Wie werden sie hergestellt und wozu verwendet man sie?
6. Wodurch unterscheiden sich para- und diamagnetische Stoffe? Wie verhalten sie sich in einem Magnetfeld?

§ 54. Der Elektromagnet und seine Anwendungen

1. Allgemeines über den Elektromagneten. Der Grundbestandteil eines jeden *Elektromagneten* ist eine vom elektrischen Strom durchflossene Spule, die zur Verstärkung des Magnetfeldes mit einem Weicheisenkern versehen ist.

Die Kraftwirkung eines Elektromagneten ist wesentlich vom Verlauf der magnetischen Feldlinien abhängig.

Es ist uns bereits bekannt, daß das Magnetfeld eines Elektromagneten mit offenem Eisenkern stark streut. So hat ein Elektromagnet, der mit einem geraden Eisenkern versehen ist, nur eine geringe Tragkraft. Weit größer ist die Tragkraft eines Elektromagneten, der mit einem U-förmigen Eisenkern ausgestattet ist. Durch den vorgelegten **Anker** ist der Eisenweg geschlossen, so daß nur eine geringe Streuung der Feldlinien eintritt. Bei dem als Magnetgreifer verwendeten Topfmagneten bildet die zu hebende Eisenlast selbst den Anker.

Man erkennt, daß die Kraftwirkung eines Elektromagneten um so größer ist, je geringer die Streuung der Feldlinien ist.

Der das Magnetfeld erregende Strom heißt der *Erregerstrom*. Der Elektromagnet hat gegenüber einem Dauermagneten den Vorteil, daß sein Magnetfeld in einfacher Weise ein- und ausgeschaltet oder durch Verstärken und Schwächen eines Stromes gesteuert werden kann. Diesen Vorteil eines Elektromagneten macht man sich in der Technik weitgehend zunutze.

Uns sind bereits eine Reihe sehr wichtiger technischer Anwendungen des Elektromagneten bekannt. Wir denken dabei an den *Elektrokran*, die *elektrische Klingel*, den *Morsetelegraphen*, das *Telephon*, den *Elektromotor*, den *elektrischen Weichensteller* u. a. m. Wir werden nunmehr noch weitere wichtige technische Anwendungen des Elektromagneten kennenlernen, wobei wir uns auf einige wenige Beispiele beschränken.

2. Der elektromagnetische Lautsprecher. Zwischen den Polen eines starken permanenten Hufeisenmagneten ist an einer Blattfeder eine *Zunge* aus weichem Eisen befestigt (Abb. **217**/1). Die Eisenzunge ist von einer weiträumigen Stromspule umgeben, durch die der von dem Mikrophon beeinflußte Strom fließt. Er ändert seine Stärke im Rhythmus der Sprechschwingungen. Den Stromänderungen entsprechend wird die Zunge verschieden stark magnetisiert. Sie wird infolgedessen verschieden stark angezogen und führt im Rhythmus der Sprechschwingungen selbst Schwingungen aus, die durch einen Stab auf die kegelförmige Membran des Lautsprechers übertragen werden.

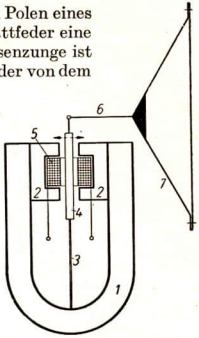


Abb. 217/1. Elektromagnetischer Lautsprecher, Freischwinger (schematisch)

1 Hufeisenmagnet, *2* Polschuhe, *3* Blattfeder, *4* Eisenzunge, *5* Spule, *6* Übertragungsstab, *7* Kegelmembran

3. Der elektromagnetische Fernschalter — Das Relais. *Elektromagnetische Fernschalter* oder *Relais*[1] sind Schaltvorrichtungen, mit deren Hilfe durch einen schwachen Fernstrom ein stärkerer örtlicher Strom ein- oder ausgeschaltet werden kann. Je nachdem, ob der örtliche Stromkreis nur an eine Niederspannungsquelle oder an eine Spannungsquelle mit höherer Spannung, etwa an das Stromnetz, angeschlossen ist, unterscheidet man *Schwachstromrelais* und *Starkstromrelais*.

Abb. **217**/2 gibt ein einfaches Schwachstromrelais schematisch wieder. An die Klemmschrauben *1* und *2* wird der Fernstrom angeschlossen. Zum Anschluß des örtlichen Stromkreises dienen die Klemmschrauben *3* und *5* oder die Klemmschrauben *5* und *4*. Der Fernstrom erregt einen kleinen Elektromagneten, der einen leicht beweglichen, sehr empfindlichen Anker anzieht. Es kommt infolgedessen zu einer Berührung des Ankers mit dem linken Kontaktstift. Dadurch wird der Kontakt zwischen den Anschlußschrauben *3* und *5* hergestellt. Gleichzeitig wird der Kontakt zwischen den Anschlußschrauben *4* und *5* und damit ein daran angeschlossener örtlicher Stromkreis unterbrochen.

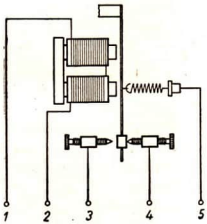


Abb. 217/2. Schwachstromrelais (schematisch)

1 und *2* Fernstromanschluß, *3* und *5* Schwachstromanschluß bei Arbeitsstromschaltung. Der örtliche Stromkreis wird beim Schließen des Fernstromes geschlossen. *4* und *5* Schwachstromanschluß bei Ruhestromschaltung. Der örtliche Stromkreis wird beim Öffnen des Fernstromes geschlossen.

Für jedes Relais bestehen zwei verschiedene Arbeitsmöglichkeiten. In der *Arbeitsstromschaltung* zieht der Magnet den Anker an und schließt den örtlichen Stromkreis, solange der Fernstromkreis geschlossen ist (Abb. **218**/1a). In der *Ruhestromschaltung* ist der Anker dauernd angezogen und der zu steuernde Stromkreis geöffnet. Wird der Fernstromkreis geöffnet, so schließt der

[1] relais (franz.) = Vorspann. Das Relais ist dem zu steuernden Stromkreis als Schaltorgan vorgespannt.

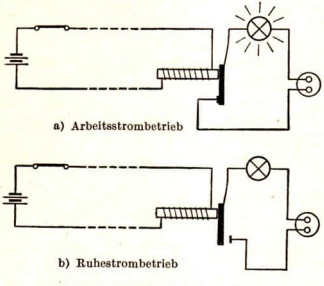
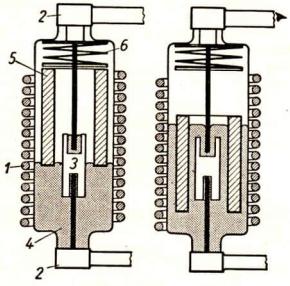


Abb. 218/1. Relaisanlage (schematisch)



a) gesteuerter Stromkreis geöffnet b) gesteuerter Stromkreis geschlossen

Abb. 218/2. Arbeitsweise des Vertex-Schaltschützes (schematisch)

1 Erregerspule, *2-2* Elektroden, *3* Quarzkörper, *4* Quecksilber, *5* eiserner Tauchkörper, *6* Schutzfeder

abfallende Anker den örtlichen Stromkreis (Abb. **218**/1 b). Diese Schaltung wird bei Sicherungsanlagen in Betrieben häufig verwendet, da sie beim Beschädigen der Fernstromleitung Alarm auslöst.

Fernschalter für Starkstrom werden heute in der Technik in großem Ausmaß verwendet. Man kann mit ihrer Hilfe Motoren und andere große elektrische Anlagen aus der Ferne steuern. Man bezeichnet solche Fernschalter in der Technik meist als *Schaltschütze*. Wir greifen aus der Fülle der verschiedenen Konstruktionsarten nur ein Beispiel heraus und beschränken uns auf das weitverbreitete *Vertex-Schaltschütz* aus dem VEB(K) Statex, Ilmenau/Thür.

Dieser Fernschalter arbeitet nur, wenn er in vertikaler Lage befestigt ist (Abb. **218**/2). Eine vom Erregerstrom durchflossene Spule umfaßt das eigentliche Schaltorgan, eine zum Teil mit Quecksilber gefüllte Glasröhre. Auf dem Quecksilber schwimmt ein eiserner Hohlzylinder. Er wird beim Einschalten des Erregerstromes durch das Magnetfeld der Spule nach unten gezogen und drängt dabei das Quecksilber nach oben. Auf diese Weise wird durch das Quecksilber der Kontakt zwischen den Elektroden hergestellt. Er wird wieder unterbrochen sobald der Erregerstrom ausgeschaltet wird.

4. Die elektromagnetische Kupplung. Bei ortsfesten Maschinenanlagen, beispielsweise bei manchen Werkzeugmaschinen, Walzwerken u. a., verwendet man heute vielfach *elektromagnetische Kupplungen* (Abb. **218**/3). Bei ihnen erfolgt das Andrücken der *Reibungsflächen* durch Elektromagnete. Die Erregerspulen sind in den Radkranz der *Mitnehmerscheibe* der treibenden Welle eingebaut. Die Enden der Erregerspulen sind mit

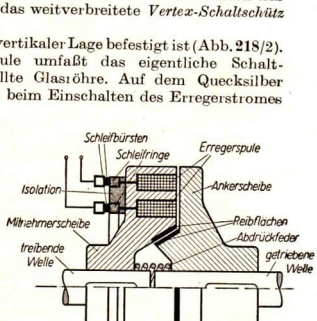


Abb. 218/3 Elektromagnetische Kupplung (schematisch)

zwei Schleifringen verbunden, auf denen die zur Übertragung des elektrischen Stromes dienenden Bürsten schleifen. Wird der Strom eingeschaltet, so wird die *Ankerscheibe* der anzutreibenden Welle von den Elektromagneten angezogen. Dabei werden die kegelstumpfförmigen Reibungsflächen aneinandergepreßt. Die anzutreibende Welle wird durch die Reibung mitgenommen.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Beschreiben Sie den Bau und die Wirkungsweise eines Elektromagneten!
2. Von welchen Eigenschaften hängt die Tragkraft eines Elektromagneten ab? Wie wirkt sich das Streufeld aus?
3. Beschreiben Sie den Bau und die Wirkungsweise eines elektromagnetischen Lautsprechers! Wie unterscheidet er sich vom elektrodynamischen Lautsprecher?
4. Wie sind die Elektromagneten einer elektromagnetischen Kupplung angeordnet?
5. Erläutern Sie den Bau, die Schaltung und die Wirkungsweise eines Starkstrom- und eines Schwachstromrelais!
6. Wodurch unterscheiden sich die Arbeitsstrom- und die Ruhestromschaltung eines Relais?

XI. Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten und in festen Körpern

§ 55. Die elektrolytische oder Ionenleitung in wäßrigen Lösungen

1. Die experimentellen Erscheinungen der Elektrolyse. Wir wissen bereits, daß man die Flüssigkeiten nach ihrer Leitfähigkeit als *Leiter* und *Nichtleiter* unterscheiden kann, und führen zur Veranschaulichung dieser Feststellung mehrere Versuche durch.

Wir tauchen zwei Elektroden aus Kohle oder Zink in Benzol oder Chloroform und legen an sie eine elektrische Spannung. Vermittels eines empfindlichen Amperemeters stellen wir fest, daß beide Flüssigkeiten Nichtleiter sind. Verwenden wir dagegen als Flüssigkeiten eine *verdünnte Säure*, eine *verdünnte Lauge* oder eine *wäßrige Salzlösung*, so beobachten wir am Amperemeter einen Ausschlag und schließen daraus auf einen Stromdurchgang.

Wäßrige Lösungen wie die oben genannten, die einen elektrischen Strom leiten, bezeichnet man als **Elektrolyte.** Der Stromdurchgang durch einen Elektrolyten ist stets mit chemischen Vorgängen im Elektrolyten verbunden. Man nennt einen solchen Ablauf eine **Elektrolyse.** Als Beispiele für Elektrolysen führen wir folgende Versuche durch.

Wir benutzen dazu zunächst zwei Elektroden aus dem gleichen Metall, das im Elektrolyten als Metallsalz gelöst ist, beispielsweise Kupferelektroden in Kupfersulfatlösung.

An eine Waage hängen wir als Elektroden zwei Kupferbleche gleicher Masse isoliert auf. Die Bleche tauchen wir in eine wäßrige Kupfersulfatlösung (Abb. 220/1).

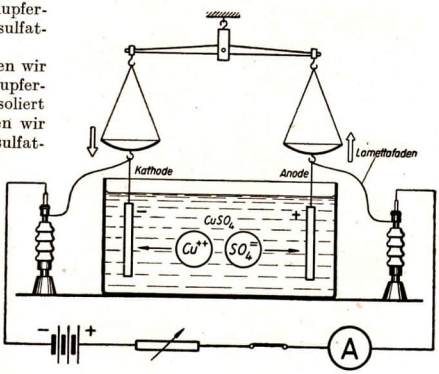


Abb. 220/1. Massenveränderung zweier Kupferelektroden bei der Elektrolyse von Kupfersulfatlösung (schematische Wiedergabe der Versuchsanordnung)

Die Kathode wird schwerer, die Anode leichter. An der Kathode scheidet sich so viel Kupfer ab, wie an der Anode gelöst wird.

Der Strom wird den Elektroden durch Lamettafäden zugeführt, die die Beweglichkeit der Waage nicht beeinträchtigen. In den Stromkreis schaltet man ein Amperemeter, an dessen Ausschlag man erkennen kann, daß ein Strom fließt.

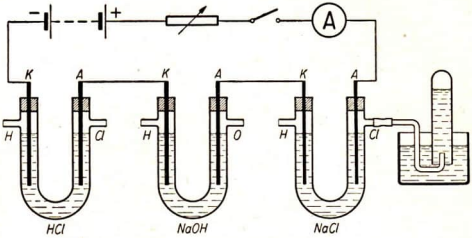


Abb. 221/1. Elektrolyse von Salzsäure, Natronlauge und Kochsalz

Während der Elektrolyse sinkt die Waagschale auf der Kathodenseite, auf der Anodenseite steigt sie. Wägen wir die Elektroden vor und nach der Elektrolyse, so finden wir, daß das Kathodenblech schwerer und das Anodenblech leichter als zuvor geworden sind. Weitere Vorgänge, beispielsweise das Auftreten von Gasblasen an den Elektroden während der Elektrolyse, können wir bei diesem Versuch nicht feststellen.

Für einen zweiten Versuch füllen wir von drei U-Rohren das erste mit verdünnter Salzsäure, das zweite mit verdünnter Natronlauge, das dritte mit Kochsalzlösung und schalten die Rohre hintereinander in einen Stromkreis (Abb. 221/1). Durch fest eingepaßte Korken sind Kohlestäbe als Elektroden in die Lösungen eingeführt. Es ist zu beobachten, daß während der Elektrolyse Gasblasen an den Elektroden aufsteigen. Wir leiten die Gase durch seitliche Ansatzröhren ab, fangen sie auf und stellen fest, daß das an den Kathoden entstehende Gas brennbar ist. Es erweist sich als *Wasserstoff*. An der Anode des zweiten Rohres weisen wir durch Prüfung mit einem glimmenden Span *Sauerstoff* nach. An der Anode des ersten und des dritten Rohres ermitteln wir am Geruch Chlor.

Jetzt setzen wir der Kochsalzlösung etwas Lackmuslösung zu. Man kann an der Anode, an der eine Chlorentwicklung stattfindet, bald ein Bleichen des Farbstoffes beobachten. An der Kathode stellen wir eine Blaufärbung des Farbstoffes fest und schließen daraus auf das Entstehen einer Lauge.

2. Die Dissoziation. Der bedeutende schwedische Physiker und Chemiker *Svante Arrhenius*[1] gab 1887 die Erklärung der Elektrolyse wäßriger Lösungen von Säuren, Laugen und Salzen. Für andere Lösungsmittel gelten die Überlegungen nicht ohne weiteres. Bei der Auflösung eines Salzes in Wasser spalten sich die Salzmoleküle sofort teilweise in positiv und negativ geladene Atome bzw. Molekülreste. Dieser von selbst eintretende Zerfall heißt **Dissoziation.** Man nennt die geladenen Teilchen **Ionen**[2]. Die positiv geladenen Ionen heißen *Kationen*, die negativ geladenen Teilchen *Anionen*. Man kennzeichnet die Kationen durch ein

[1] Svante Arrhenius (1859–1927), ein hervorragender schwedischer Naturforscher, Professor in Stockholm, erkannte die Bedeutung der Dissoziation und schuf durch seine Arbeiten die Grundlage für die moderne Elektrochemie.

[2] ion (griech.) = wandernd; Ionen = die Wandernden

an das Atomsymbol oben rechts angefügtes +Zeichen, die Anionen durch ein −Zeichen, beispielsweise (H^+), (Cl^-).

In der wäßrigen Lösung des Chlorwasserstoffs, der Salzsäure (HCl) sind zum Beispiel Wasserstoffionen (H^+) und Chlorionen (Cl^-) enthalten. Natronlauge enthält in wäßriger Lösung Natriumionen (Na^+) und Hydroxylionen (OH^-). Der Anteil der entstehenden Ionen ist von der Konzentration der Lösung abhängig. Es bildet sich ein *chemisches Gleichgewicht* zwischen den entstehenden Ionen und den nicht dissoziierten Molekülen:

$$HCl \rightleftarrows H^+ + Cl^-$$

und

$$NaOH \rightleftarrows Na^+ + (OH)^-.$$

Die Atome werden in den Verbindungen durch elektrische Kräfte zusammengehalten. Bei der Lösung eines Salzes schieben sich die Wassermoleküle in die Moleküle der Verbindung. Infolge der hohen Dielektrizitätskonstante des Wassers, die den Wert $\varepsilon_{rel} = 81$ hat, wird die elektrische Kraftwirkung so weit geschwächt, daß die Moleküle in Ionen zerfallen. Liegt an den Elektroden eine elektrische Spannung, so wandern die Ionen ihren elektrischen Ladungen entsprechend längs der elektrischen Feldlinien zu den entgegengesetzt geladenen Elektroden. Sie tragen auf Grund dieses Verhaltens ihren Namen.

Die Kationen wandern zur Kathode. Sie werden an ihr durch die Aufnahme von Elektronen neutralisiert. Die negativ geladenen Anionen geben an der Anode Elektronen ab. Auf diese Weise werden die Ionen wieder in Atome umgewandelt. Diese werden entweder aus dem Elektrolyten ausgeschieden oder setzen sich in einem sekundären Prozeß mit dem Lösungsmittel chemisch um.

Säuremoleküle dissoziieren in positiv geladene Wasserstoffionen und negativ geladene Säurerestionen, Laugen in Metallkationen und negativ geladene Hydroxylionen. *Wasser selbst ist nur sehr schwach dissoziiert.* Mit reinem Wasser durchgeführte Messungen haben ergeben, daß von 12,5 Millionen Litern Wasser nur 1 *Mol* (gleich 18 g) Wasser in Ionen zerfallen ist.

Neuere Forschungen lassen erkennen, daß die Vorgänge nicht so einfach verlaufen, wie es zunächst scheint. Die positiv geladenen Wasserstoffionen der Säuren bilden mit Wassermolekülen Komplexe, positiv geladene *Hydroniumionen* $(H_3O)^+$. Bei Salzsäure beispielsweise erfolgt die chemische Umsetzung nach der Gleichung

$$HCl + H_2O = (H_3O)^+ + Cl^-.$$

Es kann hier auf diese Vorgänge nicht näher eingegangen werden.

3. Die Beweglichkeit der Ionen. Bei der Elektrolyse erfolgt eine Stoffabscheidung an den Elektroden nur dann, wenn die Ionen unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes wandern. Diese Wanderung machen wir durch einen Versuch sichtbar, der in Abb. 222/1 dargestellt wird. Wir tränken einen Streifen Filtrierpapier mit einer schwachen Kaliumnitratlösung. Den Streifen legen wir auf eine Glasplatte und drücken an die Enden als Elektroden zwei Metallbleche auf.

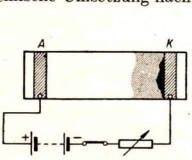


Abb. 222/1. Wanderung von MnO_4-Ionen längs eines mit Kaliumnitratlösung getränkten Filtrierpapierstreifens unter dem Einfluß eines zwischen den Elektroden *A* und *K* bestehenden Feldes

Unmittelbar neben die Kathode bringen wir etwas rotviolettfarbige *Kaliumpermanganatlösung* auf das Papier. In der Lösung sind farblose Kaliumionen K^+, farblose Nitrationen NO_3^- und farbige Manganationen MnO_4^- enthalten. Legen wir unter Zwischenschalten eines Schiebewiderstandes eine Spannung von etwa 100 V an die Elektroden, so sehen wir die farbigen Ionen als rotvioletten Flüssigkeitsbereich zur Anode hin wandern. Ändern wir die Stromrichtung, so wechseln die Ionen bei ihrer Wanderung auch die Richtung. Messungen haben ergeben, daß die Geschwindigkeit der Ionen im Durchschnitt einige tausendstel Zentimeter je Sekunde beträgt. Sie ist sehr stark von der Temperatur und von der elektrischen Feldstärke abhängig.

In der Tabelle sind die *Wanderungsgeschwindigkeiten* einiger *Kationen* (Formelzeichen u) bzw. einiger *Anionen* (Formelzeichen v) bei einer Temperatur von 18° C und bei einer Spannung von 100 V zusammengestellt. Der Elektrodenabstand betrug 20 cm.

Die Geschwindigkeiten u und v einiger Ionen
Temperatur 18° C, *Spannung* 100 V, *Weglänge* 20 cm

Kationen	u cm/s	Anionen	v cm/s
H^+	$16.5 \cdot 10^{-3}$	OH^-	$9.1 \cdot 10^{-3}$
Na^+	$2.3 \cdot 10^{-3}$	Cl^-	$3.4 \cdot 10^{-3}$
K^+	$3.3 \cdot 10^{-3}$	NO_3^-	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Ag^+	$2.8 \cdot 10^{-3}$	MnO_4^-	$2.8 \cdot 10^{-3}$
Zn^{++}	$2.4 \cdot 10^{-3}$	SO_4^-	$3.0 \cdot 10^{-3}$

4. Fragen und Aufgaben:

1. Warum kann man einen Streifen Filtrierpapier, der mit einer Lösung von Kochsalz und Phenolphthalein getränkt ist, als Polreagenzpapier verwenden?
2. Worin besteht der Unterschied zwischen Atomen und Ionen?
3. Was folgt auf Grund der Vorgänge bei der Elektrolyse über die chemische Zusammensetzung der Säuren und Laugen?

§ 56. Die Faradayschen Gesetze – Die Ionenleitung in Salzen

1. Quantitative Ergebnisse der Elektrolyse. Der englische Physiker *Faraday* hat 1833 auf Grund sorgfältiger Untersuchungen die Gesetze gefunden, die die Umsetzungen der Stoffe in einem Elektrolyten unter dem Einfluß des elektrischen Stromes quantitativ wiedergeben.

Wir leiten diese Gesetze durch eine Versuchsreihe ab. Zu diesem Zweck schalten wir einen mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Hofmannschen Zersetzungsapparat in Reihe mit einem Amperemeter in einen Stromkreis und lassen bei unveränderter Stromstärke den Strom erst drei Minuten, dann sechs Minuten und eine noch längere Zeit durch den Elektrolyten fließen. Wir messen bei jedem Versuch die entstandenen Wasserstoff- bzw. Sauerstoffmengen. Wir sehen, daß die Bildpunkte in dem dazugehörigen Volumen-Zeit-Diagramm fast

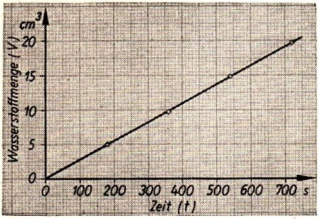


Abb. 224/1. Volumen-Zeit-Diagramm der bei einer Elektrolyse von einem Strom gleichbleibender Stärke ausgeschiedenen Wasserstoffmengen. Stromstärke während der ganzen Versuchsdauer 0,2 A

genau auf einer Geraden liegen (Abb. 224/1), und erkennen daran, daß die abgeschiedene Wasserstoffmenge V der bei der Elektrolyse verflossenen Zeit t proportional ist:

$$V \sim t.$$

Die abgeschiedenen Wasserstoffmengen stehen zu den Sauerstoffmengen stets im Verhältnis 2 : 1.

Wir führen nun den Versuch mit verschiedenen Stromstärken durch und erstrecken ihn immer wieder über die gleiche Zeitspanne, etwa über 6 Min. Auch hierbei liefert das dazugehörige Volumen-Stromstärke-Diagramm annähernd eine Gerade (Abb. 224/2). Die in gleichen Zeiten abgeschiedenen Wasserstoffmengen sind der Stromstärke proportional:

$$V \sim I.$$

Beide Abhängigkeiten, die unabhängig voneinander gelten, fassen wir zu einem Ausdruck zusammen. Es ergibt sich

$$V \sim I \cdot t.$$

Dieselbe Abhängigkeit gilt nicht nur für das Volumen, sondern auch für die Masse der abgeschiedenen Wasserstoffmenge und ganz allgemein für jede Art einer Elektrolyse. Wir erhalten so das *1. Faradaysche Gesetz*:

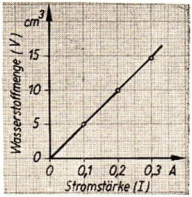


Abb. 224/2. Volumen-Stromstärke-Diagramm der bei einer Elektrolyse in gleichen Zeiten ausgeschiedenen Wasserstoffmenge. Versuchsdauer 6 min

Die Masse der an den Elektroden abgeschiedenen Stoffe ist proportional der Stromstärke und der Zeit:

$$m \sim I \cdot t \quad \text{oder} \quad \boldsymbol{m = \ddot{A} \cdot I \cdot t}.$$

Der Proportionalitätsfaktor $\ddot{A}$ wird so gewählt, daß er zahlenmäßig gleich der in Milligramm gemessenen Stoffmenge ist, die ein Strom von der Stärke 1 A in 1 s abscheidet. Er wird gemessen in mg/As. $\ddot{A}$ wird das *elektrochemische Äquivalent* genannt.

Als Beispiel bestimmen wir das elektrochemische Äquivalent des Kupfers durch Elektrolyse einer Kupfersulfatlösung. Zu diesem Zweck lösen wir 125 g Kupfersulfat unter Zusatz von 50 g konzentrierter Schwefelsäure und 50 g Alkohol in Wasser zu einem Liter. Die Elektroden, zwei blanke Kupferbleche, werden gewogen. Ebenso bestimmen wir die Größe der Kathodenfläche. Denn wenn das elektrolytisch abgeschiedene Kupfer festhaften soll, darf die Stromstärke je Quadratzentimeter den Betrag von 15 Milliampere nicht wesentlich überschreiten. Man bezeichnet die auf den Quadratzentimeter bezogene Stromstärke als die Stromdichte.

Bei einem Versuch wurden folgende Werte gefunden: Fläche der Kathode 18 cm², Masse der Kathode zu Beginn des Versuches 15,36 g, am Ende des Versuches 15,50 g, abgeschiedene Kupfermasse demnach 0,14 g, Zeit 2340 s, Stromstärke 0,188 A. Daraus berechnen wir das elektrochemische Äquivalent des Kupfers

$$\ddot{A}_{\mathrm{Cu}} = \frac{140\ \mathrm{mg}}{0{,}188\ \mathrm{A} \cdot 2340\ \mathrm{s}} \approx 0{,}318\ \mathrm{mg/As}.$$

Vergleichen wir diesen Wert mit dem Atomgewicht des Kupfers $A = 63{,}5$, so finden wir, daß die hundertfache Maßzahl des elektrochemischen Äquivalents etwa die Hälfte davon beträgt.

Das elektrochemische Äquivalent des Wasserstoffs ist $\ddot{A}_{\mathrm{H}} = 0{,}0104$ mg/As. Man erkennt, daß beim Wasserstoff die hundertfache Maßzahl des elektrochemischen Äquivalents dem Atomgewicht annähernd gleich ist.

Faraday fand durch weitere Versuche, daß die elektrochemischen Äquivalente der abgeschiedenen Stoffe den Quotienten aus den Atomgewichten und den Wertigkeiten der Elemente verhältnisgleich sind. Dieser Zusammenhang wird durch das *2. Faradayche Gesetz* wiedergegeben.

Die elektrochemischen Äquivalente verschiedener chemischer Elemente verhalten sich wie die Quotienten aus ihrem Atomgewicht und ihrer Wertigkeit.

$$\ddot{A}_1 : \ddot{A}_2 = \frac{A_1}{n_1} : \frac{A_2}{n_2}.$$

Hierin bedeutet A das Atomgewicht und n die Wertigkeit.

Auf Grund sehr genau durchgeführter Messungen wurden folgende elektrochemische Äquivalente festgestellt:

Silber 1,118 mg/As, Kupfer 0,3294 mg/As, Wasserstoff 0,010446 mg/As, Sauerstoff 0,08289 mg/As.

Die Abscheidung eines Stoffes durch Elektrolyse erfolgt mit so großer Genauigkeit, daß die auf elektrolytischer Grundlage definierte technische Einheit der Stromstärke seit dem 1. Juni 1898 als gesetzliche Einheit der Stromstärke festgelegt ist (vgl. dazu § 34,3).

2. Die Faradaysche Zahl und das elektrische Elementarquantum. Bei der Elektrolyse werden an den Elektroden Elektrizitätsmengen abgeschieden, die als Ladungen der Ionen dorthin gelangt sind. Bekanntlich wird durch eine Amperesekunde oder ein Coulomb 1,118 mg Silber ausgeschieden. Demnach sind zum Niederschlag von 1 g Silber $\frac{1}{0{,}001118}$ As erforderlich. Zum Abscheiden des chemischen Äquivalentgewichts des Silbers, mithin von 107,88 g Silber, ist eine Elektrizitätsmenge von $\frac{1}{0{,}001118} \cdot 107{,}88\ \mathrm{As} = 96494\ \mathrm{As}$ erforderlich. Man nennt diese Elektrizitätsmenge die *Faradaysche Zahl.*

Die Faradaysche Zahl ist die Elektrizitätsmenge, die durch einen elektrischen Strom beim Durchgang durch eine wäßrige Lösung von einem Grammäquivalent des gelösten Stoffes befördert wird.

In einem Grammäquivalent sind, wie wir vom chemischen Unterricht her wissen, $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Atome enthalten. Da ein Grammäquivalent die Elektrizitätsmenge 96494 As befördert, so beträgt die Ladung eines einwertigen Ions

$$\frac{96\,494}{6{,}02 \cdot 10^{23}}\,\mathrm{As} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As}.$$

Es hat sich ergeben, daß diese Ladungsmenge mit dem elektrischen Elementarquantum übereinstimmt. Seine Bestimmung durch den amerikanischen Physiker *Millikan* haben wir bereits in § 45,2 kennengelernt.

n-wertige Ionen tragen n Elementarladungen; denn die Anzahl der Elementarladungen entspricht der Wertigkeit des Stoffes. Da aber das Äquivalentgewicht gleich dem Quotienten aus dem Atomgewicht bzw. dem Molekulargewicht und der Wertigkeit ist, entfällt auch bei mehrwertigen Ionen auf ein Grammäquivalent die gleiche Ladungsmenge 96494 As.

3. Der elektrische Widerstand der Elektrolyte. Bei Stoffen, die beim Stromdurchgang keiner chemischen Änderung unterworfen sind, beispielsweise bei den Metallen, ändert sich der elektrische Widerstand mit der Temperatur. Die Leitfähigkeit der Lösungen dagegen ist noch von anderen Umständen abhängig. Außer der Temperatur wirken sich auf den Widerstand von Lösungen insbesondere noch Änderungen des *Dissoziationsgrades* stark aus, denn sie beeinflussen den Stromdurchgang. Will man Störungen bei technischen Elektrolysen vermeiden, so muß man den Dissoziationsgrad der Lösung und die Temperatur sorgfältig überwachen.

4. Ionenleitung in Salzen bei hohen Temperaturen. An eine Gleichspannung von 220 V schalten wir hintereinander einen etwa 10 cm langen Glasstab oder eine Glasröhre, ein Amperemeter und einen Sicherheitswiderstand von 10 Ω. Wir schließen den Stromkreis (Abb. 226/1). Es fließt aber kein Strom, wie wir an einem eingeschalteten Amperemeter feststellen, denn Glas ist bei einer Temperatur von etwa 20° C ein Nichtleiter. Wir erwärmen den Glasstab allmählich mit einer Bunsenflamme. Hat er die Temperatur von einigen hundert Grad erreicht, so ist am Amperemeter ein Ausschlag zu beobachten. Das Glas leitet jetzt den Strom. Dabei wird, wie bei jedem Stromdurchgang, in dem Leiter Wärme frei. Wir können nunmehr die Bunsenflamme entfernen. Die Stromwärme allein genügt, den Stab immer weiter zu erwärmen. Die Temperatur steigt dadurch immer höher, schließlich schmilzt der Stab durch.

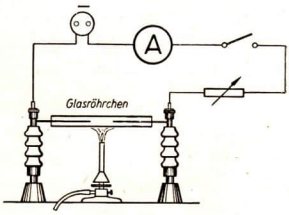


Abb. 226/1. Elektrolytische Leitung im Glas bei hohen Temperaturen. Infolge des negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes nimmt die Stromstärke mit steigender Temperatur zu.

Diese Erscheinungen werden dadurch verursacht, daß das Glas aus Ionen zusammengesetzt ist, die bei Zimmertemperatur nicht beweglich sind. Erst bei höheren Temperaturen beginnen sie sich unter dem Einfluß der angelegten Spannung zu bewegen. Damit setzt die Leitfähigkeit ein; mit wachsender Temperatur nimmt der Widerstand immer mehr

ab. Wie Glas zeigen auch andere geschmolzene Salze, beispielsweise geschmolzenes Kochsalz oder Natriumhydroxyd, elektrolytische Leitung.

5. Die Bedeutung der Elektrolyse für die Industrie. Für die chemische Großindustrie und für die Metallurgie sind heute elektrochemische Vorgänge von größter Bedeutung. Viele wichtige industrielle Verfahren beruhen auf der Ausnutzung der Elektrolyse. Einzelheiten darüber erfahren wir im chemischen Unterricht. Hier kann nur ganz allgemein auf die physikalischen Zusammenhänge hingewiesen werden.

Die technischen elektrochemischen Prozesse umfassen vor allem die *Elektrolyse wäßriger Lösungen* und die *Schmelzflußelektrolyse*.

a) Galvanotechnik. Mit wäßrigen Lösungen arbeitet man in der Galvanotechnik. Man unterscheidet dabei die *Galvanostegie*, die Herstellung metallischer Überzüge auf Werkstücken, und die *Galvanoplastik*, die Nachbildung von Gegenständen auf galvanischem Wege. Die Grundlagen der Galvanoplastik schuf 1838 durch seine Untersuchungen das russische Akademiemitglied *Moritz Hermann Jacobi*[1].

Die Reinigung der in den Hütten erzeugten Rohmetalle, insbesondere des Kupfers, die als Raffination bezeichnet wird, erfolgt ebenfalls meist elektrolytisch. Auch hierüber vermittelt der chemische Unterricht nähere Einzelheiten.

b) Die Schmelzflußelektrolyse. Manche Metalle werden dadurch gewonnen, daß man geschmolzene Salze dieser Metalle elektrolysiert. Auf diese Weise werden zum Beispiel Natrium, Kalium, Magnesium, Beryllium und die seltenen Erden rein dargestellt.

Im großen Maßstabe wendet man das Verfahren der *Schmelzflußelektrolyse* zur Gewinnung von Aluminium an. Der Ausgangsstoff ist Tonerde (Al_2O_3), die aus dem Mineral *Bauxit* gewonnen wird. Sie wird in geschmolzenem Kryolith ($Na_3Al\ F_6$) gelöst. Der Prozeß vollzieht sich in großen eisernen Kästen, deren Wände innen mit einer festgestampften, kohlehaltigen Masse bekleidet sind. Die Wände und insbesondere die Kohleschicht dienen als Kathode. Als Anode werden von oben her große quaderförmige Kohleblöcke eingeführt (Abb. **227**/1).

Große Aluminiumöfen arbeiten mit einer Spannung von etwa 7 V, aber mit Stromstärken bis zu 16000 A. Trotzdem beträgt an den Anoden die *Stromdichte* infolge der großen Oberfläche der Kohleanoden nur 1 bis 2 A/cm².

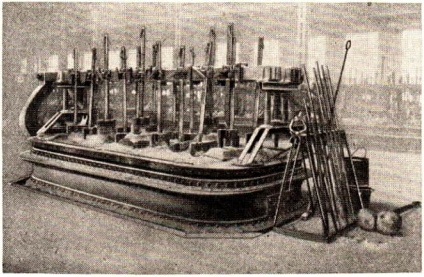


Abb. **227**/1. Aluminiumofen in einem Aluminiumwerk

[1] Moritz Hermann Jacobi (1801–1874), bedeutender Physiker und Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Petersburg, dem heutigen Leningrad.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Schildern Sie die Vorgänge bei der Elektrolyse einer wäßrigen Zinksulfatlösung!
2. Wie lange dauert die Abscheidung von 1 g Silber aus einer wäßrigen Silbernitratlösung bei einer Stromstärke von 200 mA? Welche Elektrizitätsmenge wird dabei transportiert?
3. Warum ist bei der Elektrolyse die Elektrizitätsmenge, die zur Kathode befördert wird, ebenso groß wie diejenige, die an der Anode wirksam wird?
4. Erklären Sie durch die Faradayschen Gesetze, weshalb beim Niederschlag eines Stoffes durch Elektrolyse Ströme von großer Stärke notwendig sind, wenn der Prozeß wirtschaftlich verlaufen soll!
5. Zur Durchführung eines elektrolytischen Vorganges ist eine Spannung von 4 V erforderlich. Warum ist es wirtschaftlicher, bei einer Spannung von 110 V mehrere Elektrolysegefäße hintereinanderzuschalten, statt Widerstände einzuschalten?
6. Bei der Elektrolyse einer Kupfersulfatlösung betrug die Stromstärke 50 A während einer Stunde. Es wurden 56 g Kupfer abgeschieden. Wieviel Prozent des hindurchfließenden Stromes wurden für die Elektrolyse ausgenutzt?
7. Erläutern Sie den Unterschied zwischen Galvanostegie und Galvanoplastik!
   Nennen Sie Beispiele für die Anwendung beider Verfahren!
8. Warum brauchen die in Abb. **227/1** sichtbaren Stromzuführungsbänder des Aluminiumofens trotz der großen Stärke des hindurchfließenden Stromes nicht isoliert zu sein?
9. Wie groß ist der Energieverbrauch für die Gewinnung von 1 kg Aluminium bei einer Betriebsspannung von 7 V und einer Stromausbeute von 80 %? Wie groß ist in einem Aluminiumwerk bei ununterbrochenem Betriebe die Jahresproduktion an Aluminium bei einer Leistungsaufnahme von 300 kW?
10. Die Gesamtstärke eines durch einen Aluminiumofen fließenden Stromes beträgt 15000 A. Jede der 10 Kohleanoden hat eine wirksame Oberfläche von 0,125 m². Wie groß ist die Stromdichte an den Anoden?

§ 57. Galvanische Elemente und Akkumulatoren

1. Das Entstehen der Spannung im galvanischen Element. Wir haben uns schon oft der galvanischen Elemente als Spannungsquellen bedient und werden nunmehr sehen, daß die Ursache für das Entstehen der Spannung im galvanischen Element in elektrochemischen Zusammenhängen begründet ist.

Nach den Forschungsergebnissen über den Aufbau der Metalle bestehen diese aus positiven Metallionen, zwischen denen sich Elektronen frei bewegen. Bei der Auflösung eines Metalles in einer Metallsalzlösung oder Säure gehen nur die Metallionen in Lösung. Die freien Elektronen bleiben im ungelösten Metall zurück (Abb. **229/1**). Der *Lösungsdruck* und der *osmotische Druck* der Metallionen halten sich das Gleichgewicht. Es entsteht an der Grenzschicht zwischen

dem Metall und der Flüssigkeit eine Spannung, die für jede Kombination zwischen Metall und Lösung einen bestimmten Wert hat.

Befinden sich zwei verschiedene Metalle in einer Lösung, so entstehen zwischen jedem Metall und der Lösung verschiedene Spannungen. Infolgedessen besteht zwischen den beiden Metallen infolge des Unterschiedes ihrer Einzelspannungen wiederum eine Spannung.

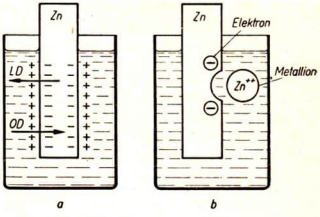


Abb. 229/1. Bildung einer elektrischen Doppelschicht beim Eintauchen eines Metallstabes in eine Metallsalzlösung. Die Metallionen gehen in Lösung, während die Elektronen das Metall negativ aufladen.
a) Schematische Darstellung der Doppelschicht, *LD* Lösungsdruck, *OD* osmotischer Druck
b) Ablösung eines einzelnen Metallions

Wir bringen beispielsweise in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure je einen Streifen Kupferblech und chemisch reines Zinkblech. Eine Veränderung an den Metallen ist nicht zu beobachten. Wir verbinden nunmehr die beiden Pole des Elementes durch einen Leiter. In den Stromkreis legen wir ein Amperemeter. An dem Ausschlag erkennen wir, daß ein Strom fließt. Am *Kupferblech* ist eine *Gasentwicklung* zu bemerken, während sich das *Zink allmählich auflöst.*

Bei der Auflösung des Zinks bleiben die Elektronen im ungelösten Zink zurück. In Lösung gehen die Zinkkationen, diese binden die in der Säure vorhandenen Schwefelsäurerestanionen. Dadurch werden die Wasserstoffionen der Schwefelsäure frei. Diese geben an der Kupferkathode ihre Ladungen ab und entweichen als gasförmiger Wasserstoff. *Im Element findet demnach eine Wanderung positiver Ladungen vom Zink zum Kupfer statt. Im Außenkreis dagegen fließen Elektronen vom Zink zum Kupfer*; dem entspricht im technischen Sprachgebrauch ein positiver Strom vom Kupfer zum Zink. Während des Stromflusses wird dauernd Zink gelöst. Bei einem offenen Element erfolgt keine Veränderung.

Walter Nernst
(1864—1941)

2. Die elektrochemische Spannungsreihe. Wir haben bereits erfahren, daß zwischen einem Metall und der Lösung, in die das Metall eintaucht, eine Spannung besteht. Man bezieht diese Spannung auf die von dem deutschen Physiker *Walter Nernst*[1] vorgeschlagene *Normal-Wasserstoffelektrode.* Diese besteht aus Platinblech, das in einer 1-normalen Säurelösung vom Wasserstoff umspült wird. In der beigefügten

[1] Walter Nernst (1864–1941) war Professor der Physikalischen Chemie in Göttingen und Berlin. Er hat grundlegende Untersuchungen in der physikalischen Chemie angestellt.

Tabelle sind für einige Metalle die Spannungen angegeben, die gegen die Normal-Wasserstoffelektrode auftreten. Die Vorzeichen stimmen dabei mit dem Vorzeichen des Poles überein, den die Metallelektroden zusammen mit der Wasserstoffelektrode als galvanisches Element bilden. Man bezeichnet die entstehende Anordnung der Elemente als die *elektrochemische Spannungsreihe*. Sie ist, wie wir im chemischen Unterricht erfahren werden, für das chemische Verhalten der Elemente von großer Bedeutung.

Spannungsreihe einiger chemischer Elemente in 1-normaler Ionenkonzentration, bezogen auf die Normal-Wasserstoffelektrode

Elektrode	K	Na	Mg	Zn	Fe	Pb
Spannung in V.....	−2,92	−2,71	−2,35	−0,76	−0,44	−0,13
Elektrode	H	Cu	Ag	Hg	Cl	Au
Spannung in V.....	+0,0	+0,34	+0,81	+0,86	+1,36	+1,5

Auch Nichtmetalle zeigen Spannungen gegenüber der Normal-Wasserstoffelektrode, zum Beispiel Chlor + 1,36 V.

3. Polarisation galvanischer Elemente. Nach unseren Beobachtungen tritt bei der Stromentnahme aus einem Kupfer-Zink-Element an der Kupferplatte ein Überzug von Wasserstoffbläschen auf. Dadurch wird aber die Spannung zwischen den Elektroden geändert. Wir können dies durch einen Versuch nachweisen. Zu diesem Zwecke verbinden wir die Pole eines Elementes über einen regelbaren Widerstand und ein Amperemeter. Die Spannung zwischen den Polen bestimmen wir durch ein angeschlossenes Voltmeter (Abb. **230**/1). Zunächst wird die Spannung des unbelasteten Elementes gemessen. Nach Schließen des Stromkreises regeln wir mittels des Widerstandes die Stromstärke auf etwa 0,2 A. Wir beobachten mit steigender Einschaltdauer ein Absinken der Spannung.

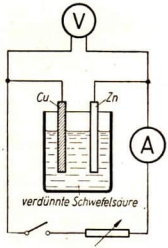


Abb. 230/1. Nachweis der Polarisation eines Kupfer-Zink-Elementes bei einer dauernden Stromentnahme. Bei einer Strombelastung sinkt die Spannung des Elementes ab.

Die Abnahme der ursprünglichen Spannung kommt dadurch zustande, daß die an der Kupferelektrode ausgeschiedenen Wasserstoffbläschen zusammen mit der Zinkplatte wie ein neues elektrisches Element wirken, dessen Spannung der Spannung des ursprünglichen Elementes entgegengesetzt gerichtet ist. Diese Gegenspannung heißt *Polarisationsspannung*. Infolge des Auftretens dieser Polarisationsspannung bleibt bei einer Stromentnahme die anfängliche Spannung nicht konstant; sie nimmt allmählich ab.

Durch Zugabe von Oxydationsmitteln zu den Elektroden, beispielsweise von Braunstein, wird der Wasserstoff wieder oxydiert. Auf Grund der Wirkung derartiger *Depolarisatoren* bleibt die Spannung eines galvanischen Elementes längere Zeit praktisch unverändert. So befindet sich bei

dem Salmiak- und dem Trockenelement Braunstein als Depolarisator in einem Beutel, der die Kohleelektrode umgibt.

4. Das Weston-Normalelement. Bei manchen wissenschaftlichen und technischen Messungen sind Elemente unentbehrlich, die eine absolut konstante Spannung haben. Als besonders geeignet haben sich die *Quecksilber-Cadmium-Elemente* erwiesen, die man nach ihrem Erfinder auch als Westonelemente bezeichnet. Die Anode besteht aus *Cadmium*, die Kathode aus *Quecksilber*. Als Elektrolyt wird Cadmiumsulfatlösung verwendet (vgl. Abb. **133**/1). Wird das Element nicht länger als nur wenige Sekunden bei der Stromentnahme mit höchstens 0,1 mA belastet, so bleibt die Spannung bei 20° C immer konstant, nämlich 1,0183 V. Man nennt daher dieses Element auch ein *Normalelement*. Über die Verwendung dieses Elementes zur Festlegung der internationalen Spannungseinheit berichtete § 33,3.

Als Stromquellen sind die Westonelemente nicht verwendbar, da ihre Spannung bei Strombelastung merklich absinkt. Sie dienen lediglich als Kontrollelemente bei Spannungsmessungen.

5. Lokalströme. Bei einem Kupfer-Zink-Element wird eine chemisch reine Zinkplatte bei offenem Stromkreis von der Säure nicht angegriffen. Dasselbe ist an einer Zinkplatte zu beobachten, die vorher mit Quecksilber amalgamiert wurde. Vom chemischen Unterricht her wissen wir aber, daß Säure verunreinigtes Zink stark zersetzt. Durch die Verhüttung des Zinks ist diesem immer etwas Kohlenstoff beigemengt. Der Kohlenstoff und das Zink bilden mit der Säure ein *lokales galvanisches Element*. Durch die entstehenden *Lokalströme* wird das Zink unter kräftiger Wasserstoffentwicklung elektrochemisch gelöst. Durch die Amalgamierung wird die Oberfläche des Zinks sehr gleichmäßig; die Ausbildung der Lokalströme unterbleibt. Bei anderen verunreinigten Metallen entstehen diese Ströme ebenfalls.

6. Der Akkumulator. Wie wir schon wissen, besteht ein *Bleiakkumulator* aus zwei in verdünnte Schwefelsäure gestellte Bleiplatten, die in besonderer Weise hergerichtet sind (Abb. **231**/1). Unsere Kenntnisse über die Elektrolyse ermöglichen es uns jetzt, die elektrochemischen Vorgänge eingehender zu verfolgen, die beim Laden und beim Entladen eines Akkumulators auftreten.

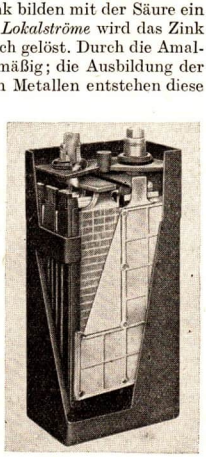
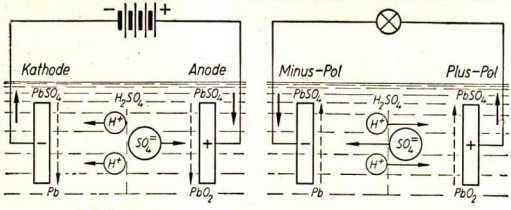


Abb. 231/1. Schnittmodell eines Bleiakkumulators

Wir tauchen zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure. Auf der Oberfläche der beiden Platten bildet sich eine dünne Schicht *Bleisulfat*. Ein an die Pole angeschlossenes Voltmeter zeigt keinen Ausschlag. Beide Platten verhalten sich dem Elektrolyten gegenüber gleichartig.

a) Ladevorgang: Wir schließen nunmehr beide Bleiplatten an eine Gleichstromquelle mit einer Spannung von mindestens 4 V an und lassen durch die Zelle einige Zeit einen Strom fließen. An der Anode bildet sich aus dem Bleisulfat durch



a) Ladevorgang b) Entladevorgang

Abb. 232/1 Schematische Wiedergabe der Vorgänge beim Laden und beim Entladen eines Bleiakkumulators

Umsatz mit den Schwefelsäurerestionen und Wasser braunes *Bleidioxyd*. An der Kathode reduzieren die Wasserstoffionen der Säure das Bleisulfat zu *Blei*. Dabei werden je Molekül an der Anode zwei negative Elementarladungen, an der Kathode zwei positive Elementarladungen frei. Sie werden durch die zugeführten entgegengesetzten Ladungen kompensiert (Abb. 232/1a). *Beim Laden eines Akkumulators entsteht ein galvanisches Element, das aus Blei und Bleidioxyd besteht.*

b) Entladevorgang: Wir unterbrechen die Ladung und verbinden die Pole durch einen Draht über eine Glühlampe. Es fließt jetzt ein Strom, dessen Richtung der des Ladestromes entgegengesetzt ist. Während der Entladung wandeln sich die Platten wieder in *Bleisulfat* um (Abb. 232/1b).

Neben dem Bleiakkumulator werden in neuerer Zeit in zunehmendem Maße *Nickel-Eisen-Akkumulatoren* und *Nickel-Cadmium-Akkumulatoren* verwendet. Bei ihnen besteht die Kathode aus fein verteiltem Eisen bzw. aus Cadmium, die Anode aus Nickelhydroxyd. Der Elektrolyt ist bei diesen Akkumulatoren Kalilauge und wirkt durch seine Hydroxylgruppe. Die chemischen Vorgänge sind hier noch verwickelter als beim Bleiakkumulator.

Beim Laden von Akkumulatoren, die man in der Technik auch als *Sammler* bezeichnet, verrichtet der elektrische Strom eine *chemische Arbeit*. Beim Entladen wird die gespeicherte chemische Energie zu etwa 80% wieder in elektrische Arbeit zurückverwandelt. 20% gehen durch den Widerstand des Elektrolyten, durch Selbstentladung und durch andere Einflüsse für die Nutzung verloren. Man bezeichnet die Aufnahmefähigkeit eines Akkumulators als seine *Kapazität*. Sie wird meist in **Amperestunden** (Ah) angegeben. Die Kapazität eines Akkumulators darf aber nicht mit der Kapazität eines Kondensators verwechselt werden. Der Kondensator speichert die Elektrizität direkt, der Akkumulator dagegen unter Umwandlung in chemische Energie. Wenn ein Akkumulator eine Kapazität von 40 Ah hat, so können bei einem Wirkungsgrad von 80% 32 Ah entnommen werden. Es fließt dann beispielsweise 32 Stunden lang ein Entladestrom von 1 A oder 8 Stunden ein Strom von 4 A.

7. Wartung und Pflege der galvanischen Elemente und der Akkumulatoren. Trokkenelemente und Kohle-Zink-Elemente dürfen im Winter *nicht zu kalt* stehen, da sonst durch Frosteinwirkungen Beschädigungen, unter Umständen sogar Zerstörungen eintreten können.

In den Behältern muß immer genügend Wasser vorhanden sein. Der *Wasserspiegel* muß mindestens 1 cm über dem Kohlebeutel stehen. Ist infolge von Verdunstung das

Wasserniveau zu weit gesunken, so ist destilliertes Wasser nachzufüllen. Ebenso muß bei längerem Gebrauch der Elektrolyt, nämlich Salmiak, ergänzt werden.

Sachgemäße Wartung der Akkumulatoren erfordert das *Einhalten des richtigen Säurestandes.* Die Säure soll 1 cm über dem oberen Plattenrand stehen. Ist das Niveau abgesunken, so ist der alte Stand durch *Nachfüllen von destilliertem Wasser* wieder herzustellen. Einfaches Leitungswasser darf nicht verwendet werden, da die Bleiplatten infolge der im Leitungswasser enthaltenen gelösten Bestandteile durch chemische Reaktionen mit der Zeit angegriffen werden.

Infolge von Erschütterungen, denen die Akkumulatoren zuweilen ausgesetzt sind, oder auch infolge einer zu hohen stoßweisen Stromentnahme, werden oft Teilchen aus der Plattenmasse herausgelöst. Diese Teilchen fallen zu Boden und bilden den *Bodenschlamm.* Erreicht dieser die untere Plattengrenze, so kann er einen inneren Kurzschluß verursachen. Größere Mengen Bodenschlamm sind daher zu entfernen.

Entlädt man einen Akkumulator zu stark oder läßt ihn lange Zeit ohne Zwischenladung stehen, so geht zuweilen die Bleisulfatmasse in kristallisierte Form über. Dieser Vorgang wird als *Sulfatisieren* bezeichnet. Er macht die Akkumulatoren mit der Zeit unbrauchbar. Es ist daher notwendig, auch unbenutzte Akkumulatoren *monatlich einmal nachzuladen.* Dabei darf, wie bei jeder Ladung, die vorgeschriebene Ladestromstärke nicht überschritten werden. Beim Laden sind die Pole des Akkumulators mit den gleichnamigen Polen der Gleichstromquelle zu verbinden (+ mit +, — mit —).

Wesentlich ist ferner das *Einhalten der richtigen Säuredichte.* Diese ändert sich nämlich beim Laden und beim Entladen. Ist der Akkumulator frisch geladen, so soll die Säuredichte 1,21 g/cm³ betragen. Ist sie während des Entladens auf 1,16 g/cm³ abgesunken, so muß der Akkumulator nachgeladen werden. Die Dichte bestimmt man mit Hilfe eines Aräometers.

Im Gegensatz zu den empfindlichen Bleiakkumulatoren sind die Nickel-Eisen- und die Nickel-Cadmium-Akkumulatoren wesentlich einfacher zu pflegen. Sie können monatelang unbenutzt stehen, ohne Schaden zu nehmen.

8. Fragen und Aufgaben:

1. Warum dürfen Normalelemente nicht zur Stromentnahme benutzt werden? Welchem Zweck dienen sie?
2. Ein Akkumulator hat eine Kapazität von 20 Ah. Wie lange kann bei einem Wirkungsgrad von 75% ein Strom von 2 A entnommen werden?
3. Wie lange dauert das Laden eines Akkumulators, wenn er nach dem Laden 40 Ah abgeben soll? Der Wirkungsgrad sei 85%, der Ladestrom betrage 2,5 A.
4. Aus 5 hintereinandergeschalteten Akkumulatoren mit einer Spannung von je 2 V und einem inneren Widerstand von je 0,01 Ω fließt ein Strom durch einen Draht mit einem Widerstand von 30 Ω. Die im Draht erzeugte Wärmemenge erwärmt 100 g Wasser um 75°. Welche Zeit ist dazu erforderlich, wenn man von Wärmeverlusten absieht?

§ 58. Elektronentheorie der Leitung in festen Körpern

1. Durchgang der Elektrizität durch Metalle. Auf Grund umfassender Forschungen ist man zu der Erkenntnis gelangt, daß sich bei den Metallen die freien Elektronen in den zwischen den Metallatomen bzw. Metallionen bestehenden Zwischenräumen des *Atomgitters* wie die Moleküle eines Gases bewegen. Die Be-

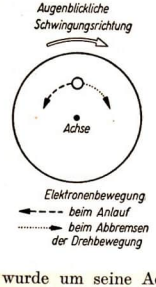


Abb. 234/1. Schematische Wiedergabe des Tolman-Versuches. Der Metallzylinder vollführt Drehschwingungen um seine Längsachse. Die Elektronen bleiben infolge ihrer Trägheit beim Anlaufen der Zylinderschwingung hinter dem Gitter zurück, beim schnellen Abbremsen bewegen sie sich in gleicher Richtung wie das Gitter weiter. Es entsteht zwischen dem Gitter und den Elektronen eine Wechselspannung.

wegung der Elektronen erfolgt in keiner bestimmten Richtung. Besteht aber zwischen zwei Stellen eines Leiters eine Spannung, so bewegen sich die freien Elektronen der Feldrichtung entgegen. Die Bewegungsrichtung der Elektronen ist entgegengesetzt zu der Richtung, die in der Technik als die Stromrichtung bezeichnet wird.

Den Nachweis der freien Elektronen in Metallen erbrachte der amerikanische Physiker *Richard Chase Tolman*[1]. Ein Kupferzylinder wurde um seine Achse in periodische Drehschwingungen versetzt. Das starre Atomgitter des Metalls führt dabei Schwingungen mit periodisch wechselnder Geschwindigkeit aus. Die frei beweglichen Elektronen dagegen erfahren beim Beginn jeder Einzelschwingung keine Beschleunigung und beim Abklingen der Schwingung keine Verzögerung. Es kommt zu einer Relativbewegung zwischen den Atomen und den Elektronen (Abb. 234/1). Dadurch entstehen *Wechselspannungen*, die von *Tolman* nachgewiesen wurden.

2. Die Geschwindigkeit der Elektronen in Metallen. Wird zwischen zwei Stellen eines metallischen Leiters eine Spannung gelegt, so breitet sich das dadurch hervorgerufene elektrische Feld mit Lichtgeschwindigkeit im Leiter aus. Die Elektronen werden durch dieses Feld infolge seiner großen Ausbreitungsgeschwindigkeit im Leiter praktisch gleichzeitig in Bewegung gesetzt, erreichen aber selbst nur eine sehr geringe Geschwindigkeit.

Eine einfache Überschlagsrechnung läßt dies deutlich werden. Fließt durch einen Draht t Sekunden lang ein Strom von der Stärke I Ampere, so ist die in Fluß befindliche Ladungsmenge

$$Q = I \cdot t\,.$$

Wir nehmen zur Vereinfachung an, daß daran sämtliche im Draht enthaltenen freien Elektronen beteiligt seien.

Ihre Anzahl ermittelt man, indem man den durch das Produkt $F \cdot l$ aus Querschnitt und Länge bestimmten Rauminhalt mit der Zahl n der in 1 cm³ enthaltenen freien Elektronen multipliziert. Dabei sind F in cm² und l in cm zu messen. Eine weitere Multiplikation mit der Ladungsgröße e eines Elektrons ergibt dann die Größe der Gesamtladung Q aller freien Elektronen. Es ist demnach

$$Q = n \cdot e \cdot F \cdot l\,.$$

Hierin ist $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As (vgl. § 45,2). So erhält man die Gleichung

$$I \cdot t = n \cdot e \cdot F \cdot l\,.$$

Dividiert man beide Seiten der Gleichung durch t, so tritt auf der rechten Seite an Stelle des Faktors l der Quotient $\frac{l}{t}$ auf. Er ist gleich der Durchschnittsgeschwindig-

[1] Richard Chase Tolman (geb. 1881), amerikanischer Naturforscher, Professor der physikalischen Chemie am California-Institut

keit, mit der sich die Elektronen im Leiter bewegen, und wird mit dem Buchstaben u bezeichnet. So ergibt sich

$$I = n \cdot e \cdot F \cdot u.$$

Es handelt sich hier um einen Kupferdraht mit einem Querschnitt von 1 mm². Nach dem Gesetz von Avogadro enthält 1 Mol jedes Stoffes $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Moleküle bzw. Atome. Wir setzen vereinfachend voraus, daß jedes Kupferatom ein Elektron freigibt. Dann sind in einem Mol Kupfer, mithin in 63,5 g Kupfer, $6{,}02 \cdot 10^{23}$ freie Elektronen enthalten. Auf 1 g entfallen $\frac{1}{63{,}5} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}$ freie Elektronen. Da Kupfer die Dichte 8,9 g/cm³ hat, enthält 1 cm³ Kupfer $\frac{8{,}9}{63{,}5} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \approx 8{,}4 \cdot 10^{22}$ freie Elektronen.

Als Stromstärkewert nehmen wir 12 A an. Es gilt dann die Gleichung

$$12 = 8{,}4 \cdot 10^{22} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot u.$$

Demnach ist

$$u = \frac{12}{8{,}4 \cdot 1{,}6 \cdot 10} \text{ cm/s} \approx 0{,}9 \text{ mm/s}.$$

Der wahre Wert der Elektronengeschwindigkeit kann hiervon etwas abweichen. Doch kann man sich zur Kennzeichnung der Größenordnung merken, daß sich die freien Elektronen in einem Kupferdraht mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ungefähr 1 mm/s bewegen.

3. Die Supraleitfähigkeit. Wir erfuhren in § 36,2, daß die Widerstände metallischer Leiter mit wachsender Temperatur zunehmen. Die Beweglichkeit der Elektronen wird nämlich bei steigender Temperatur durch die Wärmebewegung der Metallatome etwas behindert.

Umgekehrt nimmt der Widerstand eines Leiters bei sinkender Temperatur immer mehr ab, vor allem bei sehr tiefen Temperaturen. Eine ganz besonders auffallende Erscheinung entdeckte 1911 der holländische Physiker *Heike Kamerlingh-Onnes*[1]. Er fand, daß der spezifische Widerstand einer Reihe von Stoffen beim Annähern an den absoluten Nullpunkt plötzlich bei einer bestimmten Temperatur sprunghaft fast auf Null absinkt. Man nennt diese Temperatur die *Sprungtemperatur*. Die Leitfähigkeit der Stoffe unterhalb der Sprungtemperatur bezeichnet man als **Supraleitfähigkeit.** Abb. 235/1 veranschaulicht graphisch das Verhalten einiger supraleitender Metalle. Die Supraleitfähigkeit hat zur Folge, daß in einem geschlossenen Stromkreis, der aus einem supraleitenden

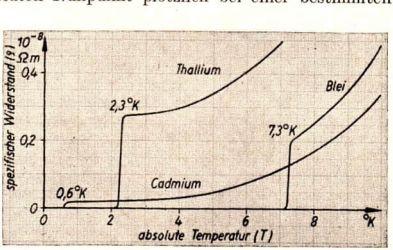


Abb. 235/1. Diagramm zur Darstellung der Supraleitfähigkeit einiger Metalle

[1] Heike Kamerlingh-Onnes (1853–1926), bedeutender holländischer Physiker, Professor in Leiden. Er erforschte vor allem das Verhalten der Stoffe bei sehr tiefen Temperaturen und verflüssigte 1908 als erster das Helium nach dem Linde-Verfahren.

Stoff besteht, unterhalb der Sprungtemperatur ein einmal erregter Strom mehrere Stunden, unter besonders günstigen Versuchsbedingungen sogar mehrere Tage, weiterfließt, ohne merklich schwächer zu werden. Man erkennt am Beispiel der Supraleitfähigkeit, daß sich Eigenschaften eines Stoffes sprunghaft ändern können. Die Forschungen nach den Ursachen der Supraleitfähigkeit sind noch nicht abgeschlossen.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Warum setzt beim Anlegen einer Spannung an zwei Stellen eines Leiters der Stromfluß der Elektronen praktisch an allen Stellen gleichzeitig ein?
2. Welchen Einfluß hat es auf den im 2. Abschnitt für die Elektronengeschwindigkeit gefundenen Wert, wenn
   a) die Zahl der freien Elektronen kleiner ist als die Zahl der Atome,
   b) die Stromstärke geringer als 12 A ist?
3. Führen Sie die im 2. Abschnitt vorgenommene Rechnung an folgenden Beispielen durch:
   a) Aluminiumdraht: Querschnitt 4 mm², Stromstärke 4 A, Atomgewicht **27**, Dichte 2,7 g/cm³,
   b) Stahldraht: Querschnitt 2,5 mm², Stromstärke 7 A, Atomgewicht **56**, Dichte 7,8 g/cm³!

§ 59. Elektrische Vorgänge in der Grenzschicht zweier fester Leiter

1. Das Kohlemikrophon. Wir legen zwei Kohlestäbe, die aus einer Taschenlampenbatterie entnommen sind, kreuzweise übereinander und schalten sie in Reihe mit einer Stromquelle, einem Amperemeter und einem regelbaren Sicherheitswiderstand (Abb. **236**/1). Dabei stellen wir fest, daß die Stromstärke sehr schwankt, je nachdem, ob wir die Kohlestäbe mehr oder weniger stark aneinanderdrücken. Zwischen zwei Kohlestäben besteht ein *Übergangswiderstand*, der durch die an der Berührungsstelle wirkende Druckkraft erheblich beeinflußt wird. Auch zwischen zwei sich berührenden Metallstäben treten Übergangswiderstände auf; sie sind aber bei weitem nicht in dem Maße druckabhängig wie zwischen zwei Kohlestäben.

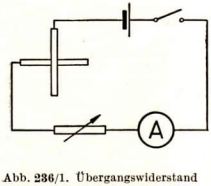


Abb. **236**/1. Übergangswiderstand zwischen zwei kreuzweise übereinandergelegten Kohlestäben

Eine sehr wichtige technische Anwendung dieser Vorgänge ist das *Kohlemikrophon*. Der Zwischenraum zwischen einem Kohleblock und einer davon isolierten Metallmembran ist mit Kohlekörnern gefüllt. An die Membran und an den Kohleblock ist unter Zwischenschalten eines Amperemeters eine Stromquelle angeschlossen. Drückt man leicht gegen die Membran, so ändert sich die Stromstärke. Selbst ganz geringe Druckschwankungen, wie sie durch auftreffende Schallwellen verursacht werden, rufen Widerstandsänderungen hervor. Verbindet man das Mikrophon mit einem Telephon und spricht gegen das Mikrophon, so wird die Telephonmembran in gleicher Weise wie die Mikrophonmembran

bewegt. Es entsteht ein Ton, der mit dem der Schallquelle genau übereinstimmt. Auf diese Weise kann die Sprache auf weite Entfernungen übertragen werden. Abb. 237/1 zeigt den Hörer eines Tischtelephons.

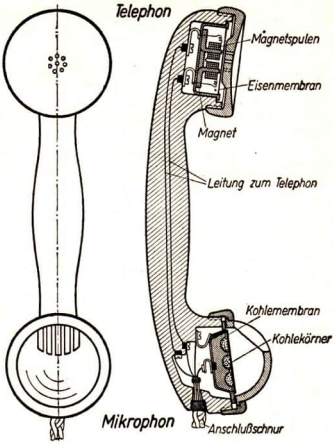


Abb. 237/1. Längsschnitt durch den Hörer eines Tischtelephons

2. Der Detektor. Zwischen zwei festen, sich berührenden Körpern erfolgt zuweilen der Übergang der Elektronen in beiden Richtungen verschieden stark.

Man verbindet zum Beispiel unter Zwischenschalten einer kleinen Glühlampe als Schutzwiderstand und eines Drehspulamperemeters einen *Molybdän-*, *Bleiglanz-* oder *Pyritkristall* mit dem negativen Pol einer Akkumulatorzelle, die gegen den Kristall gedrückte Spitze einer Grammophonnadel mit dem positiven Pol (Abb. 237/2a). Ein Ausschlag ist am Amperemeter nicht zu beobachten.

Vertauscht man dagegen die Anschlüsse am Akkumulator, so daß die Nadelspitze mit dem negativen Pol verbunden ist (Abb. 237/2b), so entsteht sofort ein Ausschlag. *Die Elektronen treten leichter von der Spitze in den Kristall als vom Kristall in die Spitze über.*

Wir ändern den Versuch dadurch ab, daß wir an Stelle des Akkumulators einen kleinen Wechselstromgenerator, etwa einen Kurbelinduktor, wie er in älteren Telephonapparaten zum Geben von Klingelzeichen verwendet wird, in den Stromkreis schalten (Abb. 237/3). Drücken wir dabei die Nadelspitze gegen das Mineral, so schlägt das Instrument immer nur nach einer Seite aus. Infolge der Verschiedenheit der Übergangswider-

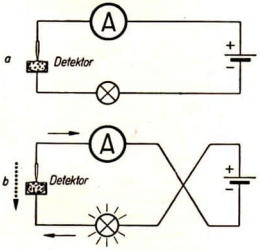


Abb. 237/2. Detektorwirkung eines Molybdänkristalles in einem Gleichstromkreis (schematische Wiedergabe der Versuchsanordnung). a) Kein Stromfluß beim Anschluß der Detektorspitze an den positiven Pol des Elementes, b) Auftreten eines Stromes beim Anschluß der Detektorspitze an den negativen Pol

technische Stromrichtung ←

Richtung des Elektronenstromes ····· →

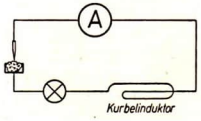


Abb. 237/3. Detektorwirkung eines Molybdänkristalles im Wechselstromkreis. Das Drehspulamperemeter zeigt durch die gleichbleibende Richtung des Ausschlages an, daß nur eine Phase des Wechselstromes an der Berührungsstelle zwischen dem Kristall und der Nadel hindurchgelassen wird.

stände in den beiden Richtungen wird der Strom in der einen Richtung stark geschwächt bzw. ganz unterbrochen.

Man bezeichnet Vorrichtungen der beschriebenen Art als *Detektoren*. Ihre Wirkung bezeichnet man auch als *Gleichrichten*.

3. Der Gleichrichter. Der *Gleichrichtereffekt* wird in der Technik vielfach verwendet, wenn ein Wechselstrom in einen Gleichstrom umgewandelt werden soll. Wir beschränken uns hier auf die *Trockengleichrichter*, die in der Technik für Ströme bis zu einigen Hunderten Ampere vielfach verwendet werden. Sie enthalten eine Kupferplatte, die mit einer Schicht aus Kupfer-1-oxyd überzogen ist. Den Abschluß bildet eine Bleiplatte (Abb. 238/1). Der Widerstand eines Gleichrichters ist sehr groß, wenn die Kupferplatte mit dem positiven Pol, die Kupfer-1-oyxd-Schicht mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden ist. Weit geringer dagegen ist der Widerstand dieses Gleichrichters beim Stromdurchgang in der umgekehrten Richtung. In ähnlicher Weise arbeiten Gleichrichter, die aus einer *Selenschicht* und einer vernickelten Eisenscheibe bestehen.

Der an einem Trockengleichrichter infolge seines Widerstandes auftretende Spannungsabfall beträgt etwa 1,2 V. Eine Kupfer-1-oxyd-Zelle sperrt bis etwa 15 V. Bei Wechselspannungen, die höher sind als 15 V, werden mehrere Gleichrichterzellen hintereinandergeschaltet. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Gleichrichters verwendet man Schaltungen, bei denen beide Richtungen des Wechselstromes ausgenützt werden. Eine derartige Schaltung zeigt die in Abb. 238/2 und Abb. 238/3 wiedergegebene, nach ihrem Erfinder benannte *Graetzschaltung*. In der Technik werden Gleichrichter beim Aufladen von Batterien, beim Elektroschweißen und beim Durchführen von Elektrolysen vielfach verwendet.

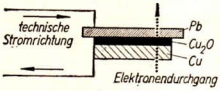


Abb. 238/1. Einzelglied eines Kupfer-1-oxyd-Gleichrichters. Der Durchgang der Elektronen erfolgt vom Kupfer zum Kupfer-1-oxyd.

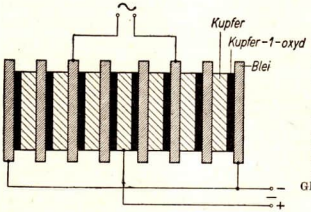


Abb. 238/2. Gruppe von 8 Gleichrichterzellen in Graetzschaltung zum Gleichrichten der beiden entgegengesetzten Stromrichtungen eines Wechselstromes (schematisch). Vollweg-Gleichrichterschaltung

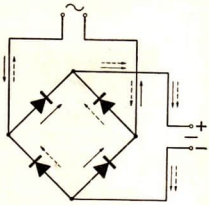
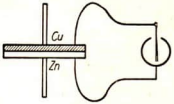


Abb. 238/3. Schaltbild der Graetzschaltung von 4 Gleichrichtern in Vierecksform.

Schaltzeichen eines Gleichrichters

4. Die Thermoelektrizität. Wir legen zwei an isolierenden Handgriffen befestigte, glatt geschliffene Metallplatten aus Kupfer und Zink aufeinander und verbinden sie mit einem empfindlichen Elektrometer. Trennen wir die beiden Platten voneinander, so beobachten wir am Elektrometer eine Spannung



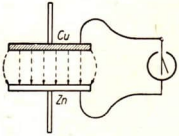


Abb. 239/1
Berührungsspannung. In der Grenzschicht zwischen einer Kupfer- und einer Zinkplatte entsteht eine Spannung, die sich durch Trennen der Platten nachweisen läßt. Zwischen den getrennten Platten besteht ein elektrisches Feld.

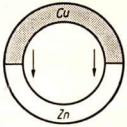


Abb. 239/2
Gleichheit der Berührungsspannungen in einem aus zwei Metallen bestehenden Stromkreis (schematisch).

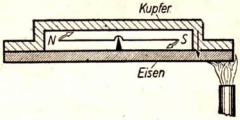


Abb. 239/3. Geschlossenes Leiterrechteck, bestehend aus zwei zusammengelöteten Metallen. Die in der Mitte angebrachte Magnetnadel schlägt aus, sobald die eine Lötstelle erwärmt wird.

(Abb. 239/1). Sie ist dadurch entstanden, daß von dem einen Metall auf das andere Elektronen übergehen. Es entsteht so in der Grenzschicht ein elektrisches Feld. Die Spannung beträgt etwa 1 V und heißt *Berührungsspannung*.

Werden zwei Bügel aus Kupfer und Zink zu einem geschlossenen Kreis vereinigt, so fließt kein Strom, denn die Berührungsspannungen sind an beiden Berührungsstellen im Gleichgewicht (Abb. 239/2). Wird aber die eine Berührungsstelle erwärmt, so beobachten wir an dem Ausschlag einer Magnetnadel, daß in dem Leiterrechteck ein Strom fließt (Abb. 239/3). Es besteht an der erwärmten Stelle eine höhere Berührungsspannung als an der kalten. Diese Differenz zwischen beiden Spannungen heißt *thermoelektrische Spannung*. Will man die Berührung möglichst innig machen, so verlötet man die beiden Metalle an der Berührungsstelle miteinander. Man bezeichnet ein derartiges Metallpaar als ein *Thermoelement*.

Die bei einer Erwärmung um je 1° an einer Lötstelle auftretende Spannung hängt von der Wahl der Metalle ab und ist gering. Sie beträgt bei einer Erwärmung um 100° für Wismut/Antimon 0,011 V, für Eisen/Konstantan 0,0056 V, für Platin/Platinrhodium 0,0006 V. Durch Hintereinanderschalten von Thermoelementen wird die Wirkung vervielfacht (Abb. 239/4). Man erhält so eine *Thermosäule*, die bei Strahlungsmessungen vielfach verwendet wird.

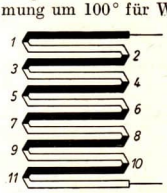


Abb. 239/4
Thermosäule (schematisch). Die ungeradzahligen wie die geradzahligen Lötstellen liegen auf je einer Seite der Säule. Dadurch ergänzen sich die einzelnen Thermoelemente zu einer Batterie.

Abb. 240/1 zeigt als Schauversuch die Erregung eines nur e i n e Stromschleife enthaltenden Elektromagneten durch ein Thermoelement. Die Stromschleife besteht aus einem dicken Eisenbügel, dessen beide Schenkel durch zwei kurze dicke Konstantanstifte miteinander verbunden sind. Der Eisenschluß des Magneten wird durch einen um die beiden Schenkel herumreichenden, aus zwei Teilen bestehenden Eisenklotz hergestellt. Die eine Lötstelle wird durch eine Bunsenflamme erwärmt, die andere durch kaltes Wasser abgekühlt. Dieser einfache Elektromagnet ist imstande, ein Gewicht von 5 kp zu tragen.

In der Meßtechnik werden Thermoelemente als elektrische Thermometer vielfach verwendet. Infolge der sehr geringen Masse erwärmen sie sich schnell und geben durch den Ausschlag eines mit ihnen verbundenen empfindlichen Millivoltmeters die Temperatur an der Meßstelle ohne Verzug an. Die zweite Lötstelle des Thermoelementes muß dabei durch einen Thermostaten immer auf einer konstanten Temperatur gehalten werden. Abb. **240/2** zeigt das Schaltbild eines technischen Thermoelementes. Die Temperatur der Meßstelle wird in der Praxis meist einer graphischen Darstellung entnommen, die die Temperatur in Abhängigkeit von der Spannung des Thermoelementes zeigt. Meist ist die Voltskala des Instrumentes direkt auf Temperaturgrade umgeschrieben.

Ein großer Vorteil, der den Thermoelementen wie den Widerstandsthermometern zu eigen ist, ist die Möglichkeit der elektrischen *Fernübertragung*. Thermoelemente werden daher bei der *technischen Betriebskontrolle* großer Werke besonders häufig verwendet.

An Stelle der nicht sehr genau arbeitenden Hitzdrahtgeräte verwendet man heute zum Messen von Wechselströmen vielfach *Thermomeßgeräte*. Sie enthalten ein meist aus Eisen und Konstantan zusammengelötetes kreuzförmiges Thermoelement, ein *Thermokreuz* (Abb. **240/3a**). Der eine Kreuzarm wird vom Wechselstrom durchflossen, wobei sich die Lötstelle erwärmt. Die Enden des anderen Kreuzarmes sind an ein Drehspulsystem angeschlossen, das auf die entstehende Thermospannung anspricht. Eine andere Ausführungsform der Thermomeßgeräte zeigt Abb. **240/3b**, bei der die Eisen-Konstantan-Lötstelle an einem kurzen, dünnen Platindraht angelötet ist, der sich unter dem Einfluß des Wechselstromes etwas erwärmt. Die Kaltlötstellen der Thermomeßgeräte sind die Anschlußstellen der Verbindungsdrähte des Meßwerks mit dem Thermoelement.

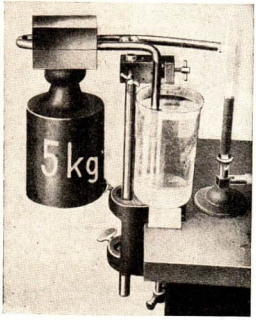


Abb. **240/1**. Thermoelektrischer Elektromagnet. Eine einzige Stromwindung verleiht dem Magneten eine Tragkraft von 5 kp.

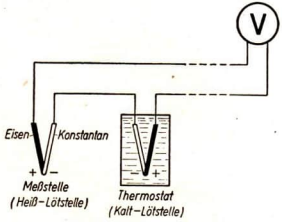


Abb. **240/2**. Schaltbild eines technischen Thermoelementes

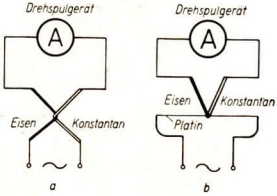


Abb. **240/3**. Thermo-Drehspulgerät
a) Vorgeschaltetes Thermokreuz,
b) vorgeschalteter Platinheizdraht

5. Fragen und Aufgaben:

1. Wie würde der im 1. Abschnitt angegebene Versuch mit den gekreuzten Kohlestäben verlaufen, wenn an Stelle des Amperemeters ein Lautsprecher benutzt wird?

2. Berechnen Sie die Stromstärke eines Thermokreises, der aus zwei je 40 cm langen Eisen- und Konstantanbügeln mit einem Querschnitt von je 1 cm^2 besteht, bei einer Temperaturdifferenz von 300° C!
3. An ein Voltmeter mit einem Widerstand von 5000 Ω wird ein Thermoelement aus Wismut/Antimon angeschlossen. Der Temperaturunterschied der Lötstellen ist 200°. Der Widerstand des Thermoelementes sei gleich 0,5 Ω. Wie groß ist der Ausschlag des Voltmeters? Für den Endausschlag des Zeigers ist ein Strom von 0,00001 A erforderlich. Die Skala umfaßt hundert Teile.
4. Geben Sie in den Abbildungen **238**/2 und **238**/3 den Stromverlauf für beide Flußrichtungen des Wechselstromes an!
5. Zeichnen Sie das Schaltbild einer Graetzschaltung aus 4 Gleichrichtern in Rechteckform! In jeder Längsseite des Rechtecks liegen je zwei Gleichrichter hintereinander. Die Wechselstromleitung ist an die Mitten der Längsseiten angeschlossen; die Entnahme der Gleichspannung erfolgt in den Mitten der Kurzseiten.

Namen- und Sachverzeichnis

Abbe, Ernst 98, 113
Aberration, chromatische 95
—, sphärische 95
Ablenkprisma 109
Absorption 70
Absorptionsspektrum 121
Achromat 96
Akkommodation 100
Akkommodationsruhe 100
Ampère, André Marie 136, 209
Ampere (A) 136
Ampere je Meter (A/m) 202 u. f.
Amperesekunde (As) 166
Amperestunde (Ah) 232
Amperewindung je Meter (Aw/m) 202 u. f.
Amplitude 6, 24, 37, 42, 44
Anastigmat 97
Anion 221 u. ff.
Anker 216
Aplanat 96
Äquivalent, elektrochemisches 224 u. ff.
Arbeit, elektrische 158
Arrhenius, Svante 221
Astigmatismus 97
Aufteilungsprisma 109 u. f.
Auge 99 u. ff.
Augenkammer 99
Augenmodell 101, 108
Ausbreitungsgeschwindigkeit 25 u. ff.

Bandenspektrum 119
Bandgenerator 161, 167, 169, 193
Beleuchtung, indirekte 71
Beleuchtungsstärke 126 u. ff.
Beleuchtungstechnik 126
Berührungsspannung 239
Bewegung, aperiodische 12
—, kriechende 12
—, periodische 5, 26, 45
Bikonkavlinse 90
Bikonvexlinse 90
Bildfeldwölbung 96
Bildgröße 78 u. f., 91 u. f.
Bildweite 76 u. f., 79, 91 u. f., 108
Bildwerfer 104
Biotar 98
Bleiakkumulator 231 u. f.
Braunsches Elektrometer 132
Brechkraft 93 u. f.
Brechung 33 u. ff.
Brechungsgesetz 34 u. f., 82
Brechungsverhältnis 34 u. f., 81 u. f.
Brechungswinkel 34, 80 u. ff.
Brennfläche 75
Brennpunkt 75, 90
—, negativer 79
—, scheinbarer 92
Brennpunktsstrahl 75, 90
Brennweite 77, 91, 112 u. f.
Brille 100
Brückenschaltung 151 u.ff.
Bunsen, Robert Wilhelm 122

Cadmium-Normalelement 133, 231
Candela (cd) 126
Chladni, Ernst Florens Friedrich 57
Chladnische Klangfiguren 58
Coelostat 72
Coulomb, Charles Augustin 162
Coulomb (C) 166, 181
Coulombsches Gesetz 165, 168
Curie-Punkt 214

Dachkantprisma 103
Dämpfung 11 u. ff., 24
Dauermagnet 214 u. f.
Depolarisator 230 u. f.
Detektor 237 u. f.
Diamagnetische Stoffe 215 u. f.
Diaskop 104 u. f.
Dielektrikum 183 u. ff.
Dielektrizitätskonstante 183 u. ff.
—, absolute 184 u. ff.
—, relative 185 u. ff.
Diopter 73
Dioptrie (dptr) 93

Dispersion 87
Dissoziation 221 u. f.
Dissoziationsgrad 226
Doppler, Christian 49
Doppler-Effekt 49 u. ff.
Dosenoszillograph 43
Dreheisengerät 135
Drehkondensator 187
Drehspulgerät 135, 204 u. f.
Drehwaage 163 u. f.
Dreifachspiegel 74
Dreifarbendruck 124
Dreifingerregel der rechten Hand 204
Dünnschliff 70, 110
Dur-Dreiklang 41
Dynamometer 205 u. f.

Echo 47
Echolotung 47 u. f.
Ehrenhaft, Felix 179
Eigenschwingung 13, 52 u. f., 55
Einfallslot 32, 34
Einfallswinkel 32 u. ff.
Elektrizitätszähler 206
Elektrofilter 174
Elektro-Filterschlot 174
Elektrolyse 220 u. ff.
Elektrolyte 220 u. ff.
Elektrolytkondensator 187
Elektromagnet 216 u. ff.
Elektrometer 132
Elektromotorische Kraft 134
Elektron 161, 233 u. ff.
Elektroskop 132
Element, galvanisches 228 u. f., 232 u. f.
Elementarladung 168, 178 u. ff., 225 u. f.
Elementarmagnet 209
Elementarquantum, elektrisches 168, 178 u. ff., 225 u. f.
Elementarwelle 28 u. ff.
Elmsfeuer 192 u. f.
Elongation 6
Emissionsspektrum 121
Entfernungsgesetz 128
Episkop 105
Epsilan 187
Ergänzungsfarbe 89

Fadenpendel 5 u. ff., 13 u. f.
Farad (F) 181
Faraday, Michael 169, 172, 194, 223 u. ff.
Faradaybecher 190 u. f.
Faradaykäfig 189 u. f.
Faradaysche Gesetze 223 u. ff.
Faradaysche Zahl 225 u. f.
Farbenphotographie 124
Farbmischung, additive 123
—, objektive 123
—, subjektive 123
—, subtraktive 123
Fata Morgana 85
Federschwinger 5 u. ff.
Feld, elektrisches 169 u. ff., 188 u. ff.
—, homogenes 172, 175 u. ff.
—, magnetisches 194 u. ff.
—, radiales 171
Feldlinien, elektrische 170 u. ff.
—, magnetische 194 u. ff.
Feldlinse 108
Feldstärke, elektrische 172 u. f., 175 u. ff.
—, magnetische 200 u. ff.
Fernpunkt 100
Fernrohr 111 u. ff.
—, astronomisches 112
—, Galileisches 113
—, Holländisches 113
—, Keplersches 112
Fernschalter, elektromagnetischer 217 u. f.
Ferrite 214 u. f.
Ferromagnetismus 213 u. ff.
Fettfleckphotometer 128
Filmaufnahmegerät 105
Filmvorführgerät 106
Fizeau, Hippolyte Louis 69
Flimmern 85
Flintglasprisma 87 u. f.
Foucault, Léon 69, 82
Fraunhofer, Josef 98, 122
Fraunhofersche Linien 122
Frequenz 7, 23, 26, 40 u. f., 44, 49 u. ff. 53, 54 u. ff., 60 u. f., 63 u. f.

Galilei, Galileo 113
Galton, Francis 62
Galtonpfeife 62 u. f.
Galvanometer, ballistisches 167 u. f.
Galvanoplastik 227
Galvanostegie 227
Gasreinigung, elektrische 173 u. f.
Gauß, Karl Friedrich 136
Gegenstandsweite 76 u. f., 79, 91 u. f., 108
Geradsichtprisma 88, 118
Glaskörper 99
Gleichgewicht, chemisches 222
Gleichrichter 238
Gletscherbrand 120
Gong 57
Graetzschaltung 238
Grenzfrequenz 40
Grenzwinkel der totalen Reflexion 83
Grundfarbe 86, 89
Grundton 54 u. ff., 59

Handspektroskop 88, 118
Hauptlinse 108
Hauptstrahl 71, 90
Helmholtz, Hermann von 44
Hertz, Heinrich 7
Hertz (Hz) 7, 23
Heuslersche Legierungen 214
Hitzdrahtamperemeter 135 u. f.
Hochspannung 134
Hochspannungskondensator 186
Höhensonne 120
Hohlglasprisma 87
Hohlspiegel 75 u. ff., 105, 114
Hohlspiegelgleichung 77
Hörbarkeitsgrenze 64

Hornhaut 99
Huygens, Christian 29
Huygenssches Doppelokular 108
Huygenssches Prinzip 30 u. ff.
Hydroniumionen 222

Impuls 22, 36
Influenz 188 u. ff.
Infrarote Strahlen 120
Innerer Widerstand (R_i) 147
Ion 221 u. ff.
Ionenleitung 223 u. ff.

Jacobi, Moritz Hermann 227
Joule, James Prescott 157
Joule (J) 158
Joulesches Gesetz 157 u. f.

Kaltstrahler 67
Kamerlingh-Onnes, Heike 235
Kapazität (eines Kondensators) 180 u. ff.
—, (eines Akkumulators) 232
Katakaustik 76
Kation 221 u. ff.
Kepler, Johannes 83, 112
Kilohertz (kHz) 7
Kilovolt (kV) 133
Kilowatt (kW) 158
Kilowattstunde (kWh) 158 u. f.
Kinokamera 105
Kinoprojektor 106
Kirchhoff, Gustav Robert 122, 149
Klang 44
Klangfarbe 42 u. ff.
Kleinbildkamera 102
Kleinbildwerfer 105
Kleinspannung 134
Klemmenspannung 134, 146
Kohlemikrophon 236 u. f.
Kondensator 132, 175 u. ff., 180 u. ff., 186 u. f.
Kollimatorrohr 117
Koma 97
Komplementärfarbe 89
Kondensor 104 u. ff.
Konkavkonvexlinse 90
Konkavlinse 90, 92 u. f.
Konkavspiegel 75
Konvexkonkavlinse 90
Konvexlinse 90 u. ff., 107, 111
Konvexspiegel 79
Kopplung 17 u. f., 20
Kopplungskräfte 22, 25
Körperfarbe 123 u. f.
Kristallinse 99
Kronglasprisma 87 u. f.
Krümmungsmittelpunkt 75
Kundt, August 59
Kundtsche Röhre 59 u. f., 63 u. f.
Kupplung, elektromagnetische 218 u. f.
Kurbelrheostat 141 u. f.
Kurzstrom 167

Ladung, elektrische 161 u. ff., 165 u. f.
Lambert, Johann Heinrich 128
Längswelle 19
Lautsprecher, elektrodynamischer 207
—, elektromagnetischer 217
Leidener Flasche 186
Leistung, elektrische 158, 160
Leuchtdichte 126 u. f.
Leuchtdichtenormal 126
Leuchtstoffröhre 67, 124 u. f.
Lichtdurchlässigkeit 70
Lichtgeschwindigkeit 69 u. f.
Lichtmenge 127
Lichtschacht 103
Lichtstärke 126 u. ff.
Lichtstrahl 67
Lichtstrom 126 u. f.
Lichtverteilung 129
Linienspektrum 119
Linse 89 u. ff.
Linsenfehler 94 u. ff.
Linsengleichung 92
Linsenkombination 96 u. ff.
Linsensystem 98 u. f.
Lippe 60
Lippenpfeife 61 u. ff.
Lippershey, Hans 113
Lochsirene 41, 54
Lokalströme 231
Longitudinalschwingung 57, 59
Longitudinalwelle 19 u. ff., 39
Lösungsdruck 228 u. f.
Luftdämpfung 12
Luftsäule, schwingende 58 u. f.
Luftverdichtung 45 u. f., 60
Luftwelle, stehende 60
Lumen (lm) 127
Luminophor 125
Lupe 107 u. f., 111
Lux (lx) 127

Magnetismus, remanenter 213 u. ff.
Maniperm 215
Medium 18, 24, 33 u. ff., 45, 51
Metallmikroskop 110
Mikrofarad (μF) 181
Mikroskop 99, 108 u. ff.
Mikroskopobjektiv 99
Milliampere 136
Millikan, Robert Andrew 179, 226
Millivolt 133
Mischfarbe 89
Mittelpunktsstrahl 90
Megawatt (MW) 158
Meßinstrument, statisches 131 u. f.
Monochord 42, 55

Nachhall 48
Nahpunkt 100
Netzhaut 100
Newton, Isaak 86 u. f.
Niederspannung 134
Nivellierinstrument 116
Nernst, Walter 229
Normalelement 133, 231
Normal-Wasserstoffelektrode 229 u. f.

Oberflächenwelle 21 27 u. f.
Oberschwingung 55
Oberton 55, 61
Objektiv 98, 102 u. ff., 108, 110 u. ff.
Oersted, Hans Christian 195
Öffnungswinkel 75
Ohm, Georg Simon 138
Ohm (Ω) 138, 141
Ohmsches Gesetz 137 u.f., 143, 146 u. f.
Oktave 41, 54 u. f.
Okular 108 u. ff.
Optimeter 115
Optische Achse 75, 79, 90
Optischer Mittelpunkt 75 u. f., 79, 90
Optische Scheibe 81
Osmotischer Druck 228 u.f.

Parabolspiegel 76, 115
Parallaxenfehler 102
Parallelstrahl 90
Paramagnetische Stoffe 215 u. f.
Permalloy 214
Permeabilität 210 u. f., 215
Pfeife, gedeckte 61
—, offene 61
Phase 7, 25, 46
Phasenunterschied 25
Phasenverschiebung 25
Phasenverzögerung 25
Phasenvoraneilung 25
Phosphor 125
Photometer 128
Photometrie 126
Picofarad (pF) 181
Pigmentfarbe 123
Plankonkavlinse 90
Plankonvexlinse 90, 103 u. f., 108
Planparallele Platte 84
Platten, schwingende 57 u. f.
Plattenkamera 102
Polarisationsspannung 230
Positronen 161
Potentiometer 151
Prisma 84, 86 u. ff., 117
—, achromatisches 88
—, totalreflektierendes 83, 114 u. f.
Prismenfeldstecher 114
Prismenfernrohr 114
Prismenkombination 88

Quarte 54 u. f.
Querstrom 151
Querwelle 18
Quinte 54 u. f.

Radiant (rad) 126
Räumlicher Winkel 126 u. f.
Reflektor 105, 114
Reflexion 31 u. ff., 35 u. ff., 47
—, diffuse 71
—, regelmäßige 71
—, totale 83
Reflexionsgesetz 33, 71
Regenbogenhaut 100
Reihenschaltung 145 u. ff.
Relais 217 u. f.
Resonanz, akustische 52
—, mechanische 14 u. f.
Resonanzkurve 14
Ringspule 199
Rheostat 141 u. ff.
Rollfilmkamera 102
Römer, Olaf 69
Rotationsparaboloid 76
Rückstrahler 74

Sammellinse 90, 96, 99, 101, 108, 111
Sammler 231 u. ff.
Sandpendel 10, 12
Sättigung, magnetische 208
Schall 40
Schallgeschwindigkeit 46 u. f.
Schallquelle 45, 48
Schallwelle 46, 48
Schaltschütz 218
Schleifenoszillograph 206
Schmelzflußelektrolyse 227
Schneidenton 60
Schott, Otto 98
Schwachstromrelais 217
Schwebemethode 179
Schwebung, akustische 53
Schwebungsfrequenz 53
Schwebungskurve 53
Schwingung 5 u. ff., 17 u. f., 23, 36
Schwingung, elastische 8
—, erzwungene 13
—, gedämpfte 11 u. f.
—, harmonische 42
—, ungedämpfte 11 u. f.
Schwingungsbauch 37, 60 u. f.
Schwingungsdauer 6 u. f. 26
Schwingungsform 44
Schwingungsknoten 37, 60 u. f.
Schwingungsschreiber 206
Schwingungsweite 6, 44
Schwingungszahl 7, 44
Sehwinkel 100 u. f., 107 u. f., 112
Seilwelle 18, 35
Snell van Royen, Willibrord 82
Spaltrohr 117
Spannung 131 u. ff., 137 u. f., 146
—, thermoelektrische 239
Spannungseinheit 133
Spannungsmesser 132 u. f.
Spannungsreihe, elektrochemische 229 u. f.
Spannungsteiler 150 u. f.
Spannungswaage 131 u. f.
Spektralanalyse 119
Spektralapparat 117
Spektralfarbe 86 u. ff.
Spektrograph 120
Spektrum 86 u. ff., 124
—, infrarotes 120
—, kontinuierliches 118
—, ultrarotes 120 u. f.
—, ultraviolettes 119 u. f.
Spiegelfernrohr 114 u. f.
Spiegelgalvanometer 135
Spiegelreflexeinrichtung 102
Spiegelsextant 72

Spitzenwirkung 191 u. ff.
Sprühentladung 174
Sprungtemperatur 235 u. f.
Spulenregel 198
Stab, schwingender 56 u. f.
Starkstromrelais 217
Steinheil, Carl August 96
Stilb (sb) 126
Stimmgabel 40, 42 u. f., 52 u. f., 57, 59
Stöpselrheostat 142 u. f.
Stoß, elastischer 22 u. f.
Stoßausschlag 166 u. f.
Stoßionisation 192
Streufeld, magnetisches 199
Strom, elektrischer 135 u. f.
Strommesser 135 u. f.
Stromregler 147 u. f.
Stromstärke 137 u. f.
Stromstärkeeinheit 136
Stromstoß 167
Stromverteilungsgesetze 149 u. f.
Stromwärme 155 u. ff.
Sucher 102
Sulfatisieren 233
Supraleitfähigkeit 235 u. f.

T-Belag 99
Teleobjektiv 104
Temperaturfühler 143 u. ff.
Temperaturstrahler 67, 125
Terz 54
Tessar 99
Theatermaschine 106
Theodolit 116
Thermoelektrizität 238 u. ff.
Thermoelement 239 u. f.
Thermokreuz 240
Thermomeßgerät 239 u. f.
Thermosäule 239
Tolman, Richard Chase 234
Ton 41 u. ff., 54
Tonhöhe 41, 44
Tonleiter 41
Tonreihe, harmonische 56
Tonstärke 42, 44
Topfmagnet 207
Totale Reflexion 83
Transversalschwingung 56
Transversalwelle 18 u. ff., 38 u. f., 55, 57
Tripelspiegel 74
Trockengleichrichter 238
Tubus 108 u. f., 112

Übergangswiderstand 236
Überlagerung von Wellen 37
Ultraschall 47, 64 u. ff.
Ultrarote Strahlen 120
Ultraviolette Strahlen 119 u. f.
Universal-Meßmikroskop 111
Urspannung 134
UVW-Regel 204

Volta, Alessandro 133
Volt (V) 133
Voltampere (VA) 158
Voltamperesekunde (VAs) 158
Volt je Meter (V/m) 177
Voltmeter 133

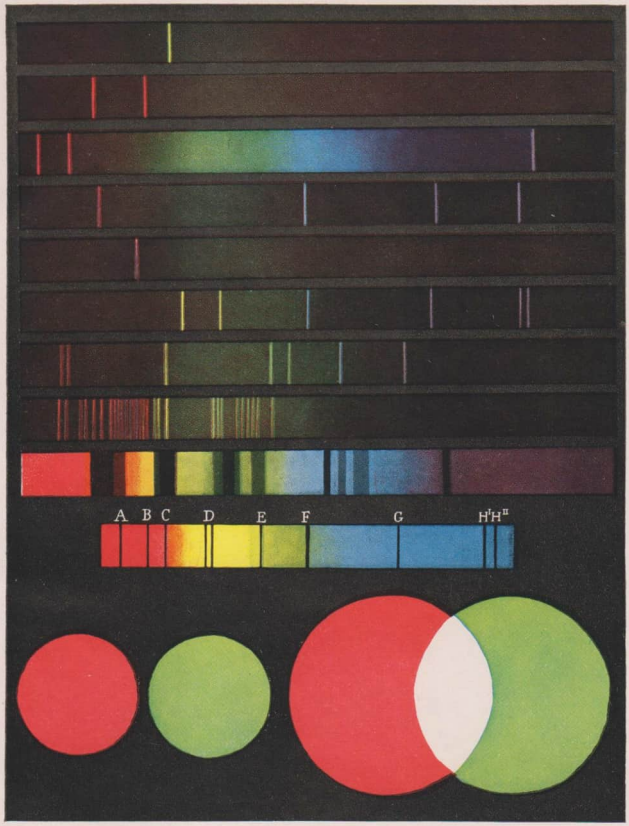
Wärmeäquivalent 157 u. f.
Wasserwellen 17, 21, 27
Watt (W) 158
Wattsekunde (Ws) 158
Weber, Wilhelm Eduard 136
Weißsche Bezirke 209 u. f.
Welle 17 u. f., 23 u. ff., 31 u. ff.
Welle, fortschreitende 18
—, kreisförmige 28
—, lineare 28 u. f., 31 u. ff.
—, resultierende 37
—, stehende 37 u. ff.
Wellenberg 24
Wellenfront 30 u. ff.
Wellenlänge 24, 26, 37 u. f., 46, 55, 61, 63
Wellenlinie 10
Wellennormale 32, 34, 46
Wellental 24
Wellenwanne 27 u. f.
Wellenwinkel 32
Werkstoffprüfung 65 u. f.
Wheatstone, Charles 152
Wheatstonesche Brückenschaltung 151 u. ff.
Widerstand 137 u. ff., 146 u. f., 150
—, spezifischer 139 u. f., 143
Widerstandseinheit 138, 141
Widerstandsgesetz 138 u. f.
Widerstandsmeßgeräte 153 u. f.
Widerstandsofen 159
Widerstandsthermometer 143 u. ff., 154
Winkelmeßgerät 116
Winkelspiegel 73

Zahnradsirene 40
Zeitdehnungsaufnahme 107
Zeitlupenaufnahme 107
Zeitrafferaufnahme 107
Zerstreuungslinse 92 u. f., 96
Zerstreuungspunkt 92 u. f.
Zungenfrequenzmesser 15
Zungenpfeife 61 u. f.
Zylinderkondensator 186

Quellenverzeichnis der Abbildungen

Herbert Blunk, Berlin: Abbildung 72/2 · Dewag, Berlin: Abbildungen 125/1, 142/1 · Werkphoto Elektro-Apparate-Werke J. W. Stalin, Berlin: Abbildungen 15/2, 205/1 · Werkphoto RFT Funkwerk Erfurt: Abbildung 65/2 · Werkphoto RFT Funkwerk Köpenick: Abbildungen 47/2, 48/1 · Werkphoto VEB Funkwerk Zittau: Abbildung 215/2 · Werkphoto VEB Elektrochemisches Kombinat Bitterfeld: Abbildung 227/1 · Werkphoto VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt: Abbildung 132/2 · Rudolf Girke, Berlin: Abbildungen 11/2, 43/2, 43/3, 53/1, 58/1 · Günter Guillaume, Berlin: Abbildung 197/1 · Werkphoto Ihagee Kamerawerk AG., Dresden: Abbildungen 102/1, 103/1, 103/2 · Werkphoto IKA Akkumulatorenfabrik Berlin-Oberschöneweide: Abbildung 231/1 · Werkphoto VEB Jenaer Glaswerk Schott & Gen.: Abbildungen 186/1, 186/2 · Werkphoto Keramisches Werk Hescho-Kahla VEB: Abbildungen 187/1, 215/1 · Photokino Krütgen, Halle (Saale): Abbildungen 5/1, 8/1, 10/2, 12/1, 17/1, 17/2, 19/3, 39/1, 39/2, 40/1, 41/1, 63/1, 63/3, 64/1, 73/2, 104/3, 116/1, 117/1, 132/1, 143/1, 153/1, 194/1, 194/2, 195/1, 198/1, 198/2, 198/3, 199/1, 200/1, 211/2a, 212/1, 212/3, 240/1 · Werkphoto VEB Labor-Prüfgerätebau, Karl-Marx-Stadt: Abbildung 206/1 · Werkphoto VEB Leuchtenbau, Leipzig: Abbildung 129/1 · Werkphoto Meßgeräte- und Armaturenwerk Karl Marx, Magdeburg: Abbildung 144/1a · Werkphoto VEB Meßgerätewerk Zwönitz: Abbildung 206/4 · Werkphoto Metallbau Apolda VEB(K): Abbildung 28/1 · Helmut Mucke, Dresden: Abbildungen 28/2, 29/1, 30/1, 31/1, 33/1 · Wolf Mucke, Leipzig: Abbildung 154/1 · Archiv PKM: Abbildungen 174/1, 174/2 · Werkphoto VEB Siemens-Plania, Berlin-Lichtenberg: Abbildungen 159/1, 159/2 · Werner Steinrück, Schulpforta: Abbildungen 131/1, 163/1, 169/1, 170/1a, 171/1a, 171/2, 172/1a, 172/2a, 173/1, 189/1, 189/2, 190/1, 191/2 · B. G. Teubner, Leipzig: Abbildungen 21/2, 42/1, 42/3, 76/1, 97/2 und Spektraltafel aus Grimsehl, Lehrbuch der Physik, Band 3 · Werkphoto VEB Transformatoren- und Röntgenwerk, Dresden: Abbildung 192/2 · Kurt Wunsch, Berlin: Abbildung 106/1 · Werkphoto VEB Mechanik Zeiss Ikon, Dresden: Abbildungen 103/3, 106/3 · Werkphoto Optik Carl Zeiss Jena VEB: Abbildungen 65/1, 72/1, 90/1, 98/1, 99/2, 104/1, 105/1, 109/3, 110/3, 111/1, 113/1, 114/2, 115/2, 118/1, 119/1, 120/1.

Physiker-Bildnisse: Dewag, Berlin: Heinrich Hertz, Hermann von Helmholtz · B. G. Teubner, Leipzig: Ernst Abbe, Johannes Kepler · Volk und Wissen, Volkseigener Verlag, Berlin, Bildarchiv: Robert Wilhelm Bunsen, Josef Fraunhofer, Christian Huygens · Zentralbild, Berlin: Michael Faraday, Karl Friedrich Gauß, Gustav Robert Kirchhoff, Walter Nernst, Georg Simon Ohm, Wilhelm Eduard Weber.



Emissionsspektren: *1* Natrium, *2* Lithium, *3* Kalium, *4* Wasserstoff, *5* Sauerstoff, *6* Quecksilber, *7* Helium, *8* Neon.

Absorptionsspektren: *9* Neodym, *10* Sonnenspektrum mit den wichtigsten Fraunhoferschen Linien.

11 Die Komplementärfarben Rot und Grün vereinigen sich zu Weiß (§ 22, 3).