GRUNDRISS DER PHYSIK

I. TEIL

FÜR HÖHERE SCHULEN

MIT 234 FIGUREN

VOLK UND WISSEN VERLAGSGESELLSCHAFT M. B. H.
BERLIN — LEIPZIG
1945

GRUNDRISS DER PHYSIK

I. TEIL

FÜR HÖHERE SCHULEN

MIT 234 FIGUREN

VOLK UND WISSEN VERLAGSGESELLSCHAFT M. B. H.
BERLIN — LEIPZIG
1945

Buchdruckerei Richard Hahn (H. Otto) in Leipzig M 134

Inhaltsverzeichnis

Seite

I. Meßkunde 5

1. Das Volumen. 2. Das Gewicht. 3. Die Zeit. 4. Die Temperatur. 5. Geschichtliche Entwicklung.

II. Mechanische und thermische Eigenschaften der Körper 11

6. Der feste Körper. 7. Die Flüssigkeit. 8. Das Gas. 9. Der luftleere Raum und die Atmosphäre. 10. Der Aggregatzustand. 11. Der Dampf. 12. Geschichtliche Entwicklung.

III. Kraftumformende Maschinen 36

13. Kraft und Arbeit. 14. Die einfachen Maschinen. 15. Verwendung der einfachen Maschinen in der Technik. 16. Verwendung der einfachen Maschinen als Meßinstrumente. 17. Übertragung der Kraft durch Flüssigkeiten und Gase. 18. Geschichtliche Entwicklung.

IV. Krafterzeugende Maschinen 52

19. Wasserkraftmaschinen, Windmotore. 20. Dampfmaschinen. 21. Explosionsmotore. 22. Geschichtliche Entwicklung

V. Die Energie 59

23. Energiequellen. 24. Übertragung mechanischer Energie. 25. Übertragung von Wärmeenergie. 26. Das mechanische Wärmeäquivalent. 27. Das Gesetz der Erhaltung der Energie. 28. Energiehaushalt. 29. Kältemaschinen. 30. Geschichtliche Entwicklung.

VI. Die Gesetze der Bewegung 69

31. Die geradlinige Bewegung. 32. Der freie Fall und der Wurf. 33. Die bewegende Kraft und die Masse. 34. Potentielle und kinetische Energie. 35. Die Schwingungsbewegung. 36. Die Zentralbewegung. 37. Das Gravitationsgesetz. 38. Geschichtliche Entwicklung.

VII. Der Schall 85

39. Das Wesen des Schalles. 40. Tonerregung. 41. Tonempfang. 42. Sprechen und Hören. 43. Geschichtliche Entwicklung.

VIII. Magnetismus 93

44. Die Eigenschaften magnetischer Körper. 45. Das magnetische Feld. 46. Der Erdmagnetismus. 47. Geschichtliche Entwicklung.

IX. Die ruhende Elektrizität 97

48. Die Eigenschaften elektrischer Körper. 49. Elektrizitätsmenge und elektrische Spannung. 50. Das elektrische Feld. 51. Erzeugung und Entladung von Elektrizität. 52. Geschichtliche Entwicklung.

Seite

X. Die strömende Elektrizität 108

53. Elektrizitätsquellen chemischer Art. 54. Stromwirkung und Stromstärke. 55. Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes. 56. Die Gesetze des Stromkreises. 57. Strom, Magnetfeld und Bewegung. 58. Geschichtliche Entwicklung.

XI. Stromerzeugende Maschinen 123

59. Die Gleichstromdynamomaschine. 60. Die Wechselstromdynamomaschine. 61. Der Funkeninduktor. 62. Der Transformator (Umspanner). 63. Geschichtliche Entwicklung.

XII. Elektrische Energie 130

64. Das Maß der elektrischen Arbeit. 65. Das elektrische Leitungsnetz. 66. Übertragung elektrischer Energie. 67. Geschichtliche Entwicklung.

XIII. Energieumformende elektrische Methoden 135

68. Der Elektromotor. 69. Das elektrische Licht. 70. Die elektrische Heizung. 71. Die technische Verwendung der Elektrolyse. 72. Geschichtliche Entwicklung.

XIV. Elektrische Zeichenübermittlung 141

73. Die elektrische Klingel. 74. Der Telegraph. 75. Das Telephon. 76. Die drahtlose Telegraphie und Telephonie. 77. Geschichtliche Entwicklung.

XV. Die Ausbreitung des Lichtes im Raum 150

78. Lichtquellen und Lichtausbreitung. 79. Die Reflexion des Lichtes an ebenen Flächen. 80. Der Kugelspiegel. 81. Die Brechung des Lichtes. 82. Das optische Prisma. 83. Die Linsen. 84. Geschichtliche Entwicklung.

XVI. Die optischen Instrumente 164

85. Der photographische Apparat. 86. Das Auge. 87. Der Bildwerfer (Projektionsapparat). 88. Instrumente zur optischen Vergrößerung. 89. Die Fernrohre. 90. Geschichtliche Entwicklung.

XVII. Lichtenergie und Farben 175

91. Licht als Energieform. 92. Die Ausbreitung der Lichtenergie. 93. Spektralfarben. 94. Die Körperfarben. 95. Optische Erscheinungen in der Atmosphäre. 96. Geschichtliche Entwicklung.

XVIII. Elektrische Strahlen 185

97. Kathoden-, Kanal- und Röntgenstrahlen. 98. Radioaktivität. 99. Geschichtliche Entwicklung.

Anhang 188

I. Verzeichnis geeigneter Schülerübungsversuche.
II. Übungsaufgaben.

Register 195

I. Meßkunde

§ 1. Das Volumen

Das Volumen eines Körpers ist der Raum, den der Körper einnimmt. Die Einheit des Volumens besitzt ein Würfel von 1 cm Seitenlänge.

Bestimmung des Volumens eines Würfels, eines Quaders, eines Zylinders usw. durch Längenmessung und Rechnung.

Bestimmung des Volumens eines Körpers mit dem Überlaufgefäß und dem Meßzylinder.

1. Die räumlichen Maße.

|| Die Einheit des Längenmaßes ist das Zentimeter.

Das Zentimeter ist gleich dem 100. Teil der Länge eines Maßstabes, des Meters, der in Paris als Grundmaß für die Länge aufbewahrt wird.

Die Längenmaße verhalten sich zueinander wie Potenzen von 10.

1 Meter (m) = 10 Dezimeter (dm) = 100 Zentimeter (cm) = 1000 Millimeter (mm).
1000 m = 1 Kilometer.

Die Flächenmaße verhalten sich zueinander wie Potenzen von 100.

1 Quadratmeter (m^2) = 100 dm^2 = 10000 cm^2 = 1000000 mm^2.
1 Quadratkilometer (km^2) = 100 Hektar = 10000 Ar = 1000000 m^2.

Die Volumenmaße verhalten sich zueinander wie Potenzen von 1000.

1 Kubikmeter (m^3) = 1000 dm^3 = 1000000 cm^3 = 1000000000 mm^3.
1 Kubikdezimeter führt auch den Namen 1 Liter.

2. Die Meßinstrumente. a) Maßstab, Meßband, Meßkette, Meßstange.

b) Spiegelmaßstab, Schublehre (Fig. 1), Schraubenmikrometer (Fig. 2).

c) Hohlmaße, Meßglas (Fig. 3).

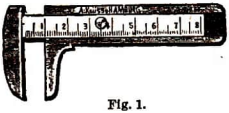


Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

§ 2. Das Gewicht

Das Gewicht eines Körpers ist der Druck, den er im Ruhezustand auf seine Unterlage ausübt.

|| Die Einheit des Gewichtes ist das Gramm.

1. Die Gewichtsmaße. Die Einheit, nach der alle Gewichte geeicht werden, heißt Kilogramm. Diese Gewichtseinheit ist durch Vereinbarung geschaffen worden. Ein in Paris aufbewahrter Körper aus Platin dient als Urmaß für das Kilogramm. Alle Körper, die denselben Druck wie dieser Körper auf die Unterlage ausüben, besitzen das Gewicht 1 Kilogramm.

Man hat das Urmaß so groß gewählt, daß es dem Gewicht von 1 cdm Wasser bei 4° C entspricht. Da 1 Gramm (g) der tausendste Teil von 1 Kilogramm (kg) ist, können wir auch sagen:

‖ 1 Gramm ist das Gewicht von 1 ccm Wasser bei 4° C.

1 Gramm = 10 Dezigramm = 100 Zentigramm = 1000 Milligramm (mg).
1000 kg = 1 Tonne.

Gewichtssatz heißt die Zusammenstellung von Metallstücken, die ein bestimmtes Gewicht haben. Ein Gewichtssatz enthält z. B. die Gewichtsstücke:

500, 200, 100, 100, 50, 20, 20, 10, 5, 2, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,2, 0,1 g

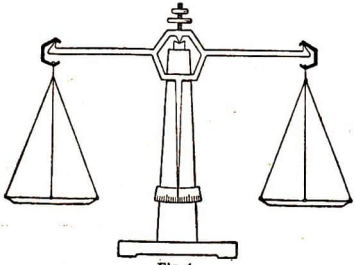


Fig. 4.

2. Die Waagen. Die gewöhnliche Waage (Fig. 4) besteht aus dem Waagebalken, der horizontal steht, wenn die Waage im Gleichgewicht ist, den beiden Waagschalen und dem Zeiger. Die Gewichtsstücke werden auf die eine, der zu wägende Körper auf die andere Waagschale gelegt.

Andere Waagen sind die Federwaage (§ 6, 1) und die ungleicharmige Waage (§ 16, 2).

3. Das spezifische Gewicht. Das spezifische Gewicht eines Körpers, auch Wichte genannt, ist das in Gramm ausgedrückte Gewicht der Volumeinheit des Körpers.

Fig. 5.

Das spezifische Gewicht eines Körpers ergibt sich, wenn man Gewicht und Volumen des Körpers mißt und beide Maßzahlen durcheinander dividiert.

Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester Körper mit Überlaufgefäß (Fig. 5) *und Waage.*

Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Flüssigkeiten mit der Maßflasche (*Pyknometer*, Fig. 6). *Es wird bestimmt: das Gewicht g_1 der leeren Flasche, das Gewicht g_2 der vollständig mit der Flüssigkeit gefüllten Flasche und das Gewicht g_3 der vollständig mit Wasser gefüllten Flasche. Dann ist das Gewicht der Flüssigkeit $G = g_2 - g_1$ und das Volumen der Flüssigkeit $V = g_3 - g_1$. Daraus ergibt sich das spezifische Gewicht s der Flüssigkeit zu*

Fig. 6.

$$s = \frac{G}{V} = \frac{g_2 - g_1}{g_3 - g_1}.$$

4. Die Größe des spezifischen Gewichtes. Das spezifische Gewicht des Wassers ist 1 g pro cm^3 oder kurzweg 1.

Das spezifische Gewicht einiger Körper beträgt[1]):

Platin	21,4	Eisen	7,2—7,8	Holz	0,5—0,7	Wasser	1
Gold	19,2	Zink	7,1	Kork	0,2	Spiritus	0,8
Blei	11,3	Aluminium	2,7	Quecksilber	13,6	Petroleum	0,8
Silber	10,5	Marmor	2,7	Schwefelsäure	1,8	Äther	0,72
Kupfer	8,9	Glas	2,4—2,6	Salzwasser	1,03		

§ 3. Die Zeit

Die Zeit wird am Ablauf gleicher Vorgänge gemessen.

Die Zeiteinheit ist die Sekunde.

1. Die Uhren. Uhr nennt man einen Apparat, in dem sich ein Vorgang in stets gleicher Weise so abspielt, daß mit der Dauer dieses Vorganges die Zeit gemessen werden kann.

Fig. 7.

a) Sand- und Wasseruhren. In der Sanduhr braucht der Sand stets dieselbe Zeit, um aus dem oberen Gefäß durch die enge Öffnung in das untere zu fallen. Die Wasseruhr ist ein Gefäß mit einer engen Öffnung im Boden. Die Zeit wird bei ihr durch die Menge des ausgelaufenen Wassers bestimmt.

b) Pendeluhren. Die Schwingungen eines Pendels dienen bei der Wanduhr (Fig. 7) als Zeitmesser. Das Pendel AB ist mit einem Bügel SE, der Hemmung, verbunden, der in die Zähne eines Zahnrades eingreift. Das Zahnrad wird durch ein Gewicht P in Drehung versetzt. Bei einer Pendelschwingung kann das Zahnrad sich nur um einen Zahn drehen, weil der Bügel nur einen Zahn freigibt. Die Drehung des Zahnrades wird auf andere Zahnräder übertragen und schließlich auf Zeiger, die über ein Zifferblatt hinwandern. Das Übersetzungsverhältnis zwischen den Zahnrädern wird so gewählt, daß der große Zeiger in 60×60 Sekunden und der kleine Zeiger in $12 \times 60 \times 60$ Sekunden einen Umlauf vollendet.

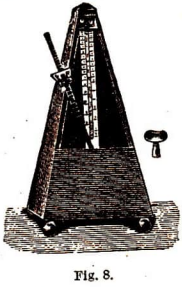


Fig. 8.

Ein mit einem Schlagwerk versehenes Pendel wird Metronom genannt (Fig. 8). Das Pendelgewicht des Metronoms ist verschiebbar. Die Marken, bei denen das Laufgewicht einsteht, geben die Anzahl der Schläge pro Minute an.

Ein Pendel von 1 m Länge braucht für jede Hin- und jede Herschwingung etwa 1 Sekunde.

c) Federuhren. Elastische Körper führen Schwingungen aus, die kürzer als die gebräuchlichen Pendelschwingungen sind. Einseitig eingespannte Stäbe oder

1) Spez. Gewicht der Gase in § 8, 1.

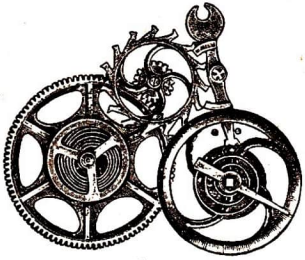


Fig. 9.

die Zinken einer Stimmgabel schwingen, angestoßen, so regelmäßig hin und her, daß ihre Schwingungen zur Messung kurzer Zeiträume benutzt werden können. Die Schwingungen werden sichtbar und zählbar gemacht, indem man an dem Ende der schwingenden Gabel einen Schreibstift anbringt, der auf eine vorbeigeführte berußte Glasscheibe schreibt.

In der Taschenuhr befindet sich als Zeitmesser statt des Pendels eine kleine Spiralfeder, die Unruhe, die mit einem Schwungrade verbunden ist (Fig. 9). Die Unruhe braucht zu einer Schwingung etwa $^1/_5$ Sekunde.

2. Die Sonnenzeit. Die ursprünglichste Uhr besitzt der Mensch in der Sonne. Nach ihr wird der Gang der irdischen Uhren geregelt, und aus dem Wechsel von Tag und Nacht hat der Mensch die Einheit hergeleitet, nach der er die Zeit mißt.

Die Sonne führt zwei scheinbare Bewegungen aus, eine tägliche, deren Ursache die Drehung der Erde um sich selbst ist, und eine jährliche, deren Ursache die Bewegung der Erde auf einer Ellipse um die Sonne ist. Die tägliche Bewegung der Erde ist an dem Weg zu erkennen, den die Sonne von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang am Himmel beschreibt, die jährliche Bewegung der Erde daran, daß die Sonne im Sommer um Mittag höher über dem Horizont steht als im Winter. Am 21. Juni steht sie am höchsten, dann fallen ihre Strahlen an Orten des $23^1/_2{}^0$ nördl. Breite der Erde senkrecht auf (Wendekreis des Krebses), am 21. Dezember steht sie am tiefsten, dann fallen ihre Strahlen senkrecht auf den $23^1/_2{}^0$ südl. Breite der Erde, den Wendekreis des Steinbocks. Am 21. März und am 23. September scheint sie senkrecht auf den Äquator, dann ist Tag- und Nachtgleiche, Frühlings- bzw. Herbstanfang.

Ein Tag ist die Zeit von Mittag zu Mittag.
Mittag ist der Zeitpunkt, in dem die Sonne genau im Süden steht.
Ein Sonnenjahr ist die Zeit von Frühlingsanfang bis Frühlingsanfang.

Fig. 10.

Die Lage der Südrichtung wird mit dem Gnomon bestimmt. Dieser besteht aus einem vertikal auf einer horizontalen Ebene aufgestellten Stab (Fig. 10), *der einen Schatten auf die Ebene wirft. Die Länge des Schattens kann an Kreisen gemessen werden, die um den Fußpunkt des Stabes beschrieben sind. Die Südrichtung ist die Richtung des kürzesten Schattens (weil die Sonne am Mittag am höchsten steht).*

Mißt man die Länge des Tages zu verschiedenen Jahreszeiten, so ergibt sich, daß die einzelnen Tage nicht genau in ihrer Dauer übereinstimmen. Das kommt daher, daß die Erde ihren Weg um die Sonne anstatt auf einem Kreis auf einer Ellipse zurücklegt und ihre Geschwindigkeit ungleichförmig ist. Würde man

also die wahren Längen des Tages zur Regelung des Ganges unserer Uhren benutzen, so müßten diese bald rascher, bald langsamer gehen. Man ist daher übereingekommen, den Durchschnitt der Tageslänge während des Jahres als Tageslänge zu wählen. Man teilt also die Zeit vom 21. März mittags bis zum 21. März mittags des nächsten Jahres in 365 gleiche Teile und nennt einen solchen Teil einen mittleren Sonnentag. Diesen mittleren Sonnentag teilt man in 24 Stunden, jede Stunde in 60 Minuten und jede Minute in 60 Sekunden. Diese Sekunde ist die Zeiteinheit.

|| Eine Sekunde ist der 86400. Teil eines mittleren Sonnentages.

Aus dem Vorstehenden ergibt sich, daß eine Sonnenuhr (meist ein schattenwerfender Stab auf einer Hauswand), auch wenn sie sehr fein konstruiert ist, nicht sehr genau gehen wird. Die genaue Bestimmung der Zeit ist eine Aufgabe der Astronomie.

§ 4. Die Temperatur

Die physikalischen Eigenschaften der Körper sind in den meisten Fällen von dem Wärmezustand abhängig, in dem sich die Körper befinden. Es ist daher wichtig, den Wärmezustand eines Körpers, den man mit dem Wort Temperatur bezeichnet, messen zu können.

Mit unserem Gefühl können wir wohl gewisse Temperaturunterschiede feststellen, zum Messen der Temperatur ist es aber viel zu unsicher. Man benutzt zum Messen der Temperatur die Eigenschaft des Quecksilbers, sich bei der Erwärmung auszudehnen. Man schließt das Quecksilber in eine enge, in ihrer ganzen Länge gleichweite Glasröhre ein, die unten eine Kugel trägt. Oben ist die Glasröhre zugeschmolzen. Das Quecksilber füllt nur die Kugel und einen Teil der Röhre aus, der übrige Teil der Röhre ist luftleer. Eine solche Röhre wird Thermometer genannt (Fig. 11).

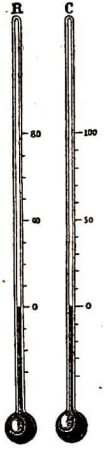


Fig. 11.

Das Thermometer ist nur dann zum Messen der Temperatur geeignet, wenn es geeicht ist, d. h. wenn es eine Skala mit Temperaturgraden besitzt. Diese Skala erhält man dadurch, daß man das Thermometer einmal in schmelzendes Eis und einmal in siedendes Wasser bringt und jedesmal den Stand des Endes des Quecksilberfadens in der Röhre bezeichnet. Teilt man den Abstand zwischen diesen beiden Zeichen in 100 gleiche Teile, so ist die Änderung der Temperatur, bei der der Quecksilberfaden um einen Teilstrich vorwärts rückt, ein Wärmegrad. Wir bezeichnen die Temperatur des schmelzenden Eises und die Temperatur des siedenden Wassers als die Fundamentalpunkte der Temperatur.

|| Ein Wärmegrad ist der 100. Teil der Temperaturdifferenz zwischen den Fundamentalpunkten der Temperatur.

Die Temperatur des schmelzenden Eises bezeichnen wir als 0°, die des siedenden Wassers als 100°. Setzt man die Teilung der Skala über 100° hinaus nach oben und unter 0° nach unten fort, so kann man das Thermometer auch

für höhere und tiefere Temperaturen benutzen. Die Temperaturen, die unter 0° liegen, werden mit Minus bezeichnet. —8° bedeutet eine Temperatur, bei der der Quecksilberfaden 8 Teilstriche unterhalb des Teilstriches 0° liegt. Wir sagen auch 8° Kälte.

Meist fügt man zur Bezeichnung Grad noch das Wort Celsius hinzu. Es soll damit gesagt werden, daß die 100teilige Skala, die Celsius zuerst verwendet hat, gemeint ist. Außer der 100teiligen Skala wird bei uns noch vielfach die Teilung nach Réaumur, die 80teilige Skala, benutzt. Bei Réaumur ist der Abstand der Fundamentalpunkte der Temperatur in 80 Teile geteilt. Das Wasser siedet nach seiner Skala bei 80° R. Demnach entsprechen 4° R derselben Temperaturdifferenz wie 5° C.

Außer Quecksilber können auch noch andere Flüssigkeiten, z. B. Alkohol, Äther, Öl im Thermometer verwendet werden.

§ 5. Geschichtliche Entwicklung

Die Geschichte der Maße und Gewichte führt uns in die ältesten Zeiten zurück. Viele Jahrtausende vor Christi Geburt hat es in Babylon und in Ägypten schon Beamte gegeben, die die Gleichheit der Maße und Gewichte überwachen mußten. Jedes Volk hatte sein besonderes Maßsystem. Handel und Bautätigkeit waren ohne Meßgeräte nicht möglich. Selbst das Geld wurde gewogen.

In vielen Fällen wurde der Maßstab, wie noch in unserer Zeit Elle, Spanne, Fuß, Schritt usw. vom menschlichen Körper entlehnt. Maße, die dieselbe Bezeichnung trugen, wichen oft beträchtlich voneinander ab. Dies machte sich besonders mißlich bemerkbar, als im 17. Jahrhundert die Naturwissenschaft durch messende Versuche die Gesetze der Natur zu finden bestrebt war. Es wurde das Bedürfnis nach einem einheitlichen Maßsystem wach. Französische Forscher unternahmen es, ein neues Maß aus der Gestalt der Erde herzuleiten. Im 18. Jahrhundert war die Länge des Erdmeridians mehrmals bestimmt worden. Im Jahre 1799 beschloß die französische Regierung, den 10000000. Teil der Länge des Erdquadranten zur Einheit des Längenmaßes zu wählen. Sie nannte dieses Maß 1 Meter und teilte es in dekadische Unterabschnitte, z. B. Dezimeter, Zentimeter usw. Gleichzeitig führte sie als Einheit des Gewichtes das Gewicht von 1 Kubikdezimeter Wasser ein, das Kilogramm und dessen 1000. Teil 1 Gramm genannt wurde. Es wurden aus Platin Originalmaße des Meters und des Kilogramms hergestellt, die in Paris aufbewahrt werden. Von ihnen wurden Kopien angefertigt, die in den einzelnen Ländern als Vergleichsmaße für die Eichämter dienen.

Dieses von den Franzosen geschaffene, im Grunde genommen ebenso willkürliche Maßsystem wie jedes andere, ist von den meisten Staaten heute übernommen worden. Seine Vorzüge bestehen in der dezimalen Einteilung der Maßeinheiten, in der Verknüpfung des Gewichtsmaßes mit dem Längenmaße und heute schließlich auch darin, daß eine große Anzahl wissenschaftlicher Messungen in diesem Maße ausgeführt ist und nur mit diesem Maße benutzt werden kann.

Im Altertum und im Mittelalter wurde die Zeit nach Stunden gemessen, die mit der Tageslänge veränderlich waren. Im Winter waren die Stunden kurz, im

Sommer lang. Als Uhren benutzte man im Altertum, soweit man die Zeit nicht einfach nach dem Stand der Sonne oder der Gestirne schätzte, Wasseruhren und im Mittelalter Sanduhren. Seit dem 13. Jahrhundert kamen als Turmuhren Räderuhren auf, die nicht sehr genau gingen. Erst im Jahre 1675 wurde von dem Holländer Huygens die Uhr erfunden, die Pendelschwingungen zur Zeitmessung benutzte, und die wir in dieser Form noch heute verwenden. Derselbe Gelehrte hat auch die Federuhr geschaffen, nach der heute unsere Taschenuhren hergestellt werden.

Die ersten Thermometer stammen aus dem 16. Jahrhundert. Sie wurden in Florenz zuerst benutzt. Etwa 100 Jahre später ist die Thermometerskala durch Einführung der Fundamentalpunkte sehr vervollkommnet worden. Die Einteilungen in Réaumur- und Celsiusgrade sind nach Gelehrten so genannt, die im Anfang des 18. Jahrhunderts gelebt haben.

II. Mechanische und thermische Eigenschaften der Körper

§ 6. Der feste Körper

1. Die elastische Formveränderung des festen Körpers. *Läßt man eine Elfenbeinkugel auf eine berußte Marmorplatte fallen, so wird die Kugel beim Auftreffen stark abgeplattet. Die Stärke der Abplattung ist aus der Größe des Rußfleckes zu erkennen. Die Abplattung der Kugel ist vollkommen verschwunden, wenn die Kugel zurückgesprungen ist. Eine Bleikugel behält die Formveränderung bei.*

Bestimmung der Verlängerung eines vertikal aufgehängten Stahl- oder Messingdrahtes bei Belastung mit verschieden großen Gewichten (Fig. 12). *Denselben Versuch für eine Gummischnur.*

Bestimmung der Senkung des freien Endes eines einseitig eingespannten Stabes aus Holz oder Stahl (Fig. 13) *in ihrer Abhängigkeit von der Belastung, der Länge, der Breite und der Höhe des Stabes.*

Vergleich der Verlängerung einer Schraubenfeder durch Zug mit der Verkürzung, die sie durch Druck erfährt.

Fig. 12.

Ein Körper heißt elastisch, wenn er unter der Einwirkung einer Kraft seine Gestalt verändert und diese Änderung nach Aufhören der Kraftwirkung sofort wieder vollkommen rückgängig macht.

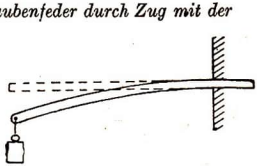


Fig. 13.

In hohem Grade elastisch sind z. B. Stahl, gehämmertes Messing, Holz, Elfenbein. Wenig elastisch ist z. B. Blei.

Körper, die jede Form annehmen und beibehalten, heißen plastisch. Gummi zeigt sowohl plastische als auch elastische Eigenschaften, denn es bildet, wie der Versuch zeigt, seine Formveränderung nicht sofort zurück.

Elastische Formveränderungen des Körpers können durch Zug oder Druck, durch Biegung oder durch Drehung (Torsion) hervorgerufen sein.

Aus den Versuchen lassen sich folgende Gesetze erkennen:

a) Die Verlängerung eines Drahtes ist proportional[1]) der Belastung und der Länge des Drahtes und indirekt proportional dem Querschnitt des Drahtes.

Ein Draht von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt dehnt sich bei der Belastung mit 1 kg aus bei: Stahl um 0,00005 m, Messing um 0,00009 m.

b) Die Senkung eines Stabes ist proportional der Belastung und der 3. Potenz der Länge und indirekt proportional der Breite und der 3. Potenz der Höhe des Stabes.

Fig. 14.

Ein Balken von rechteckigem Querschnitt ist tragfähiger, wenn er mit der schmalen anstatt der breiten Seite aufliegt. Eiserne Träger und Schienen besitzen daher stets eine größere Höhe als Breite. Der Querschnitt der Träger gleicht meist einem zweifachen gegeneinandergestellten T (Doppel-T-Träger). In dieser Form ist der Träger beim geringsten Eigengewicht am tragfähigsten (Fig. 14).

Fig. 15.

Die gleichmäßige Ausdehnung oder Verkürzung einer Schraubenfeder wird in der Federwaage (Fig. 15) zur Bestimmung des Gewichtes benutzt. Der am Ende der Feder befindliche Zeiger spielt auf einer in kg geeichten Skala.

2. Die Festigkeit des festen Körpers. Überschreitet die Belastung eines elastischen Körpers eine gewisse Größe, so wird der Körper unelastisch und zerreißt.

Die Belastung, die ausreicht, um einen Körper von 1 mm² Querschnitt zu zerreißen, heißt die Zerreißfestigkeit. Bezogen auf 1 mm² heißt Bruchfestigkeit die Belastung, die das Zerbrechen, Druckfestigkeit die Belastung, die das Zerdrücken des Körpers gerade bewirkt.

Die Druckfestigkeit pro mm² Querschnitt beträgt durchschnittlich bei:

Stahl	100 kg	Granit	8 kg	Ziegelstein	0,5 kg	Sandsteinmauerwerk	1,5 kg
Eisen	60 ,,	Sandstein	6 ,,	Holz	5 ,,	Ziegelsteinmauerwerk	0,3 ,,

Bei der Ausführung von Bauten ist der Querschnitt so zu wählen, daß die Belastung pro mm² höchstens $^1/_6$ dieser Werte beträgt.

Ein Körper heißt spröde, wenn er schon bei einer geringen Formveränderung zerspringt (z. B. Glas). Er heißt härter als ein anderer, wenn er diesen ritzt.

3. Ausdehnung durch Erwärmung. *Eine Metallkugel, die in kaltem Zustand leicht durch einen Ring hindurchgeht, wird nicht durchgelassen, wenn sie erhitzt ist. — Bestimmung der Verlängerung eines Stabes bei der Erwärmung auf* 100° *C* (Fig. 16, die Pfeile deuten den Dampfstrom an).

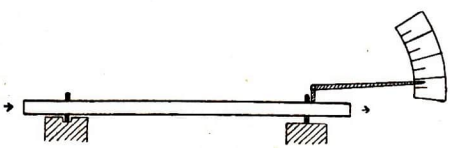


Fig. 16.

Feste Körper dehnen sich bei der Erwärmung aus.

1) Zwei Größen heißen proportional zueinander, wenn ihr Quotient eine konstante Zahl ist.

Die Verlängerung, die ein Stab bei der Erwärmung um 1° C im Verhältnis zu seiner Länge bei 0° C erfährt, heißt der lineare Ausdehnungskoeffizient.

Ein Stab von 1 m Länge dehnt sich bei 1° C Temperaturerhöhung aus bei

Glas um 0,000009 m,	Messing um 0,000019 m,
Eisen um 0,000012 m,	Aluminium um 0,000023 m.

Auf Gegenstände, die einen Körper daran hindern, sich auszudehnen, wenn er erwärmt wird, oder sich zusammenzuziehen, wenn er sich abkühlt, wird ein sehr bedeutender Druck durch den Körper ausgeübt.

Ein Eisenstab z. B. verkürzt oder verlängert sich bei einer Temperaturänderung von 4° C etwa ebenso stark wie bei der Belastung durch 1 kg pro mm^2 seines Querschnittes. Eiserne Reifen werden glühend auf Räder gezogen. Sie halten den Radkranz nach dem Erkalten mit großer Kraft zusammen. Eiserne Brücken werden so gebaut, daß die Enden des Brückenträgers beweglich sind. Eisenbahnschienen werden auf geradliniger Strecke so verlegt, daß zwischen je zwei Schienen ein kleiner Zwischenraum bleibt, damit die Schienen sich im Sommer bei starker Erwärmung ausdehnen können, ohne die anstoßenden Schienen allzusehr zu drücken oder zu verschieben.

4. Die äußere Form des festen Körpers. Durch Hämmern, Pressen oder Walzen kann ein fester Körper eine bleibende Gestaltsänderung erfahren. Durch Zerschneiden, Zerstoßen, Zerreiben oder Mahlen kann er in kleinere Teile zerlegt werden, die alle noch dieselben Eigenschaften wie der ursprüngliche Körper haben. Jeder feste Körper setzt seiner Zerkleinerung einen Widerstand entgegen.

Wir schließen aus dieser Eigenschaft des Körpers auf eine Kraft, die den festen Körper zusammenhält und zwischen den Teilchen des Körpers wirkt. Die Kraft nennen wir Kohäsion[1]).

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Teilen des festen Körpers ist so groß, daß der Körper in jeder Lage seine Gestalt nahezu unverändert beibehält. Der feste Körper ist starr.

Ist ein fester Körper in Teile zerlegt worden, so zeigen diese Teile keine Kohäsion mehr gegeneinander. Kohäsionskräfte machen sich erst wieder bemerkbar, wenn die Teilchen sehr nahe aneinander gepreßt werden. Starke Kohäsionskräfte treten erst auf, wenn der zerkleinerte Körper in formbaren Zustand übergeführt worden ist und aus diesem nach dem Zusammenpressen wieder fest wird (z. B. durch Schweißen, Löten, Leimen, Umschmelzen).

Alle Körper sind mehr oder weniger porös. Dies läßt sich daran erkennen, daß Flüssigkeiten oder Gase durch sie hindurchtreten können. Auch Metalle sind porös, wenn sie genügend dünn gewalzt sind.

5. Die Schwere des festen Körpers. Jeder feste Körper übt auf den Körper, auf dem er liegt, einen Druck oder auf einen Faden, an dem er hängt, einen Zug aus. Der Körper ist schwer.

Das Maß für die Schwere des Körpers ist sein Gewicht.

---

1) cohaerere = zusammenhaften.

Ein Faden, an dessen Ende ein fester Körper hängt, heißt Senklot (Fig. 26). Ein Senklot stellt sich in der Richtung nach dem Mittelpunkt der Erde ein. Diese Richtung heißt vertikal.[1])

Ein beweglicher Körper fällt, sobald er in seiner Ruhelage nicht mehr festgehalten wird, in vertikaler Richtung gegen die Erde, wenn seine Bewegung in keiner Richtung willkürlich beeinflußt wird.

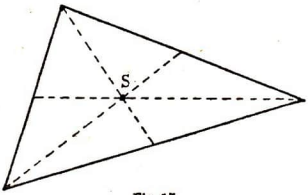


Fig. 17.

Jeder feste Körper besitzt einen Punkt, der so liegt, daß der Körper sich in jeder Lage im Gleichgewicht befindet, wenn er in diesem Punkte festgehalten ist. Dieser Punkt heißt der Schwerpunkt des Körpers.

Bei einer Kugel liegt dieser Punkt im Mittelpunkt, bei einem Würfel auf dem Schnittpunkt der Diagonalen, bei einem Dreieck auf dem Schnittpunkt der Mittellinien, bei einem Wagenrad auf der Achse usw. (Fig. 17).

Ein Körper, der nicht im Schwerpunkt, sondern im Punkte A festgehalten wird, dreht sich so lange, bis der Schwerpunkt S die tiefste Lage einnimmt, die er unter den gegebenen Umständen haben kann. Wird er aus dieser Lage herausgebracht, so kehrt er von selbst wieder in sie zurück. Wir nennen diese Lage das stabile[2]) Gleichgewicht (Fig. 18).

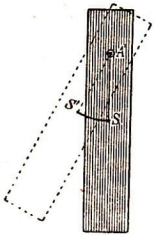


Fig. 18.

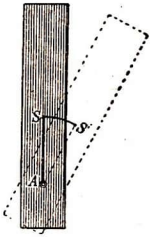


Fig. 19.

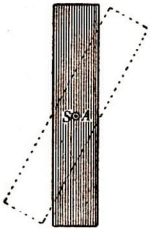


Fig. 20.

Ein Körper kann auch im Gleichgewicht sein, wenn der Schwerpunkt senkrecht über dem Punkte A liegt, in dem der Körper festgehalten wird. Eine geringe Bewegung des Körpers wird dann aber zur Folge haben, daß der Körper sich dreht, bis der Schwerpunkt senkrecht unter dem Aufhängepunkt liegt. Wir bezeichnen eine Lage dieser Art als labiles[3]) Gleichgewicht (Fig. 19).

Das Gleichgewicht, bei dem der Körper im Schwerpunkt festgehalten ist, bezeichnen wir als indifferentes[4]) Gleichgewicht (Fig. 20).

1) vertex = Gipfel, Scheitel, verticalis = senkrecht. 2) stabilis = feststehend
3) labilis = leicht gleitend. 4) indifferens = ohne Unterschied.

§ 7. Die Flüssigkeit

1. Elastische Ausdehnung. Flüssigkeiten sind nicht starr und besitzen keine Formelastizität wie die festen Körper, sondern nehmen die Form des Gefäßes an, in dem man sie aufbewahrt. Sie setzen aber der Veränderung des Volumens, das sie einnehmen, einen sehr großen Widerstand entgegen.

Preßt man eine Flüssigkeit in einem Gefäße zusammen, dessen Volumen sich dabei nicht ändert, so zeigt sich, daß die Flüssigkeit ihr Volumen ein wenig verringert, nach Aufhören des Druckes sich aber wieder ausdehnt (Fig. 21).

Fig. 21.

Flüssigkeiten besitzen Volumelastizität.

1 Liter Wasser vermindert sein Volumen unter einem Druck von 1 kg auf 1 cm^2 der Gefäßwand etwa um 0,00005 Liter.

Der Druck, der auf eine in einem Gefäße eingeschlossene Flüssigkeit an irgendeiner Stelle ausgeübt wird, pflanzt sich nach allen Seiten in der Flüssigkeit mit gleicher Stärke fort.

Z. B. strömt Wasser unter starkem Druck aus einem Gefäße mit vielen Öffnungen nach allen Seiten mit derselben Geschwindigkeit aus. Der Druck, den man auf einen wassergefüllten Gummischlauch an irgendeiner Stelle ausübt, macht sich an allen Stellen des Schlauches bemerkbar.

2. Ausdehnung durch Erwärmung. *Eine Flüssigkeit wird in einem Gefäße, wie es* Fig. 22 *darstellt, erwärmt.*

Bestimmung der relativen Wärmeausdehnung des Quecksilbers gegen Glas durch die Menge des Quecksilbers, die beim Erwärmen eines mit Quecksilber vollständig gefüllten Pyknometers ausläuft.

Fig. 22.

Flüssigkeiten dehnen sich aus, wenn sie erwärmt werden, und ziehen sich zusammen, wenn man sie abkühlt.

Die durch Änderung der Temperatur bedingte Veränderung des Volumens flüssiger Körper ist gewöhnlich größer als bei festen Körpern.

1 Liter Wasser vergrößert bei Zimmertemperatur sein Volumen bei 1° C Temperaturerhöhung um 0,0002 Liter. Quecksilber zeigt etwa dieselbe Ausdehnung. Alkohol dehnt sich bei gleicher Temperaturänderung etwa sechsmal so stark wie Wasser oder Quecksilber aus.

Bei Temperaturen, die unter 4° C liegen, verhält sich Wasser anders. Kühlen wir Wasser ab, so vermindert es sein Volumen, bis es eine Temperatur von 4° C erreicht hat, dann dehnt es sich wieder aus. Besonders stark wird die Ausdehnung, wenn das Wasser zu Eis wird.

Aus 1 Liter Wasser werden etwa 1,1 Liter Eis.

Wasser, das in die Spalten der Felsen dringt und dann gefriert, hat nicht genügend Raum zur Ausdehnung und drückt mit sehr großer Kraft den Spalt auseinander. So verursacht das Wasser die Verwitterung der Gesteine.

Infolge des abnormen Verhaltens des Wassers besitzt das Eis ein geringeres spezifisches Gewicht als das Wasser. In stehenden Gewässern sammelt sich auf

dem Grund Wasser von etwa 4° C an, während das Eis auf der Oberfläche bleibt. Daher frieren die Teiche und Seen im Winter nicht bis zum Grunde aus.

3. Die äußere Form der Flüssigkeit. Flüssigkeiten schmiegen sich in ihrer äußeren Gestalt der Form des Gefäßes an und lassen sich leicht teilen. Je kleiner die Flüssigkeitsteilchen sind, desto mehr zeigt die Flüssigkeit das Bestreben, eine selbständige äußere Form anzunehmen. Sie bildet Tropfen.

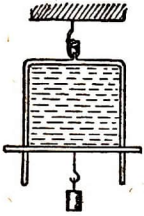


Fig. 23.

Versuche an Seifenblasen lassen erkennen, daß eine Flüssigkeit bestrebt ist, ihre Oberfläche zu vermindern. Öl in einem Gemisch von Wasser und Alkohol nimmt Kugelgestalt an. Tropfen nehmen um so mehr Kugelgestalt an, je kleiner sie sind. Eine Seifenwasserlamelle vermag ein Gewicht zu tragen (Fig. 23).

Da die Kugel sich vor anderen Körperformen dadurch auszeichnet, daß sie bei gegebenem Volumen die kleinste Oberfläche besitzt, so läßt sich zusammenfassend das Verhalten einer Flüssigkeit in folgender Weise beschreiben:

Eine Flüssigkeit ist bestrebt, ihre Oberfläche möglichst zu vermindern. In ihrer Oberfläche wirken Spannungskräfte, die wir als Oberflächenspannung bezeichnen. Diese Kräfte sind sehr klein. Daher geben sie erst bei sehr geringen Flüssigkeitsmengen der Flüssigkeit eine besondere Gestalt.

Es gibt Flüssigkeiten, z. B. Wasser, Öl, Alkohol, Essig, die an der Wand des Gefäßes haften bleiben, wenn das Gefäß ausgegossen wird. Am Rande, wo Oberfläche und Gefäßwand zusammentreffen, ist die Flüssigkeitsoberfläche dann stets nach oben gezogen (Fig. 24). Quecksilber dagegen zeigt in einem Glasgefäß das entgegengesetzte Verhalten. Die Flüssigkeit haftet nicht, und der Rand der Quecksilberoberfläche ist nach unten gezogen (Fig. 25).

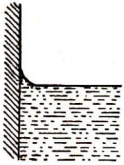


Fig. 24.

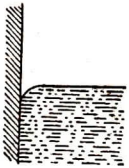


Fig. 25.

Wir nehmen an, daß zwischen Flüssigkeitsteilchen, die an der Gefäßwand haften (benetzenden Flüssigkeiten), und dem Stoff, aus dem das Gefäß besteht, anziehende Kräfte bestehen, die wir Adhäsionskräfte[1]) nennen.

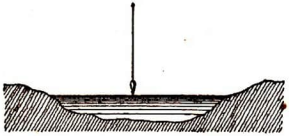


Fig. 26.

4. Die Flüssigkeitsoberfläche. Die Wasseroberfläche eines Sees oder eines Teiches ist überall waagrecht oder horizontal[2]) gerichtet. Die Richtung des Senkels und die Richtung der Flüssigkeitsoberfläche sind stets senkrecht zueinander (Fig. 26).

Sehr große Wasseroberflächen wie das Meer besitzen die Kugelgestalt der

1) adhaerere = ankleben. 2) horizon = Gesichtskreis.

Erdoberfläche, kleine Wasser- und Flüssigkeitsoberflächen erscheinen uns eben, obwohl auch sie wie die Erdkugel gekrümmt sind.

Mehrere offene Gefäße, die durch ein Rohr miteinander in Verbindung stehen, nennen wir ein verbundenes Gefäß oder eine kommunizierende[1]) Röhre.

In einem verbundenen Gefäß steht die Flüssigkeit stets so, daß sie in allen Schenkeln des Gefäßes gleich hoch steht. Alle Oberflächen liegen in derselben horizontalen Ebene (Fig. 27).

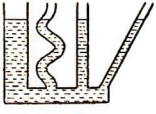


Fig. 27.

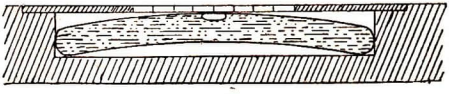


Fig. 28.

Visiert man über die Oberflächen der Flüssigkeit in den Schenkeln einer U-förmig gebogenen Röhre, so kann man in dieser Weise eine horizontale Linie festlegen (Kanalwaage). Häufiger benutzt man zu diesem Zwecke die Wasserwaage. Sie besteht aus einer leicht gekrümmten Glasröhre, die nur so weit mit Flüssigkeit gefüllt und zugeschmolzen ist, daß noch eine Luftblase darin Platz hat. Liegt die Röhre horizontal, so befindet sich die Luftblase in der Mitte der Röhre. Ist sie geneigt, so wandert die Blase nach der Seite (Fig. 28).

In engen Röhren, sogenannten Kapillarröhren[2]), stellt sich die Oberfläche der Flüssigkeit nicht in derselben Höhe ein wie in einem weiten Gefäß, mit dem die Röhre verbunden ist.

Benetzt die Flüssigkeit die Wand der Röhre, so steht sie in der Kapillarröhre höher als außen (z. B. Wasser in einer Glasröhre, Fig. 29).

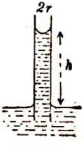


Fig. 29.

Benetzt die Flüssigkeit die Gefäßwand nicht, so liegt ihre Oberfläche in der Röhre tiefer als außen (z. B. Quecksilber in Glasröhre, Fig. 30).

Diese Erscheinung heißt Kapillarität.

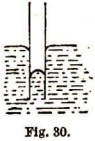


Fig. 30.

Die benetzende Flüssigkeit wird in einer Kapillarröhre um so höher gehoben, je enger die Röhre ist. Außerordentlich bedeutsam ist diese Wirkung der Kapillarität für die Pflanze. Jede Pflanze ist von der Wurzel bis zu den Blättern durchzogen von feinen Röhren, den sogenannten Gefäßbündeln, durch die die aus dem Boden aufgenommenen Nährsalzlösungen von der Wurzel bis in die Spitze der Pflanze gehoben werden.

5. Die Schwere der Flüssigkeit. Alle Flüssigkeiten besitzen ein Gewicht.

Sie üben daher einen Druck auf die Unterlage aus, der aber, da die Flüssigkeit keine feste Gestalt besitzt, von dem Gefäße, in dem die Flüssigkeit aufbewahrt wird, ausgehalten werden muß. Dieser Druck ist nicht überall gleich groß.

1) communicare = verbinden. 2) capilla = Haar.

Bohren wir in ein mit Wasser gefülltes Gefäß an irgendeiner Stelle ein Loch, so läuft das Wasser aus diesem Loch, einerlei ob das Loch im Boden des Gefäßes oder in der Seitenwand oder gar an einer Stelle ist, wo das Gefäß die Flüssigkeit nach oben begrenzt. Ferner zeigt sich, daß die Geschwindigkeit, mit der das Wasser ausströmt, um so größer ist, je höher die Flüssigkeitsoberfläche über der Öffnung steht. Es ergibt sich daraus:

Eine Flüssigkeit übt vermöge ihres Gewichtes auf die Wand des Gefäßes, in dem sie aufbewahrt ist, einen Druck aus.

Bodendruck nennen wir ihn dann, wenn er nach unten gerichtet ist,

Seitendruck, wenn er auf die Seitenwände ausgeübt wird, und

Aufdruck, wenn er nach oben gerichtet ist.

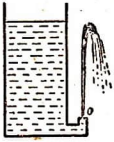


Fig. 31.

Ein Aufdruck wirkt auf alle Teile einer Gefäßwand, die die Flüssigkeit nach oben abschließt. Aus der Wasserleitung oder dem Springbrunnen (Fig. 31) fließt Wasser deshalb mit großer Geschwindigkeit aus, weil der Wasserhahn oder die Mündung des Springbrunnens viel tiefer liegt als die freie Oberfläche des ausströmenden Wassers.

Benutzen wir ein kleines mit Luft gefülltes Glasfläschchen als Druckdose und halten es in eine Flüssigkeit, so erkennen wir, daß das Volumen der Luftblase an einer bestimmten Stelle unverändert bleibt, ob die Öffnung des Fläschchens nach unten, nach der Seite oder nach oben gerichtet ist. Halten wir das Fläschchen aber tiefer in die Flüssigkeit, so nimmt der Druck zu. Aus diesen Versuchen ergibt sich:

An jeder Stelle in einer Flüssigkeit sind Bodendruck, Seitendruck und Aufdruck gleich groß.

Der durch die Schwere der Flüssigkeit verursachte Druck in der Flüssigkeit ist von der Höhe der Flüssigkeitsoberfläche über der gedrückten Stelle abhängig.

6. Das Maß für den Druck einer Flüssigkeit. *Mit der sogenannten Pascalschen Waage messen wir:*

den Druck, den die Flüssigkeit auf eine Platte ausübt, die den Boden des Gefäßes verschließt, wenn nacheinander die verschiedenen Gefäßformen benutzt werden, die in Fig. 32 *abgebildet sind,*

den Druck bei verschieden großen Bodenplatten,

den Druck von Flüssigkeiten verschiedenen spezifischen Gewichtes.

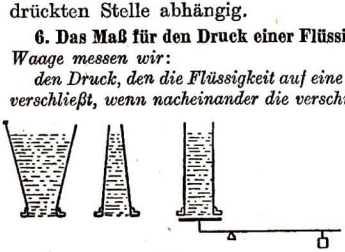


Fig. 32.

Wir messen hier den Bodendruck auf eine Platte bestimmter Größe. Nach dem Vorausgegangenen gilt das Ergebnis der Messungen für den Bodendruck auch für den Seitendruck usw. d. h. für den Druck in der Flüssigkeit ganz allgemein. Es ergibt sich:

Der Druck einer Flüssigkeit auf eine bestimmte Stelle ist nur abhängig von der Höhe der Flüssigkeitssäule über dieser Stelle, von der Größe der gedrückten Fläche und dem spezifischen Gewicht der Flüssig-

keit, nicht von der Form des Gefäßes und der dadurch bedingten größeren oder geringeren Flüssigkeitsmenge.

Druck und Gewicht einer Flüssigkeit sind also nicht dasselbe. Wir haben künftig zu beachten:

Der Druck einer Flüssigkeit ist abhängig von der Größe der gedrückten Fläche. Er wird daher in g je cm^2 oder in kg je m^2 angegeben.

Das Gewicht ist die in g oder kg gemessene Kraft, mit der ein Körper als Ganzes nach unten drückt,

Aus den Versuchen ergibt sich nun:

Der Druck einer Flüssigkeit auf eine bestimmte Stelle ist in allen Fällen gleich dem Gewicht eines Flüssigkeitszylinders, dessen Grundfläche gleich der gedrückten Fläche und dessen Höhe gleich ihrem Abstand von der Oberfläche ist.

Gießen wir in die Schenkel einer **U**-*förmig gebogenen Röhre* (Fig. 33) zwei *Flüssigkeiten verschiedenen spezifischen Gewichtes, z. B. Quecksilber in den einen und Wasser in den anderen Schenkel, so stellen sich ihre Oberflächen ungleich hoch ein. Beide Flüssigkeiten drücken auf ihre gemeinsame Berührungsfläche gleichstark, sonst würde kein Gleichgewicht herrschen. Die im unteren Teil der Röhre sitzende spezifisch schwerere Flüssigkeit hält sich in beiden Schenkeln bis zur Höhe der Berührungsfläche in sich selbst das Geichgewicht. Es drückt also von links nur eine Flüssigkeitssäule h_1 und von rechts eine größere Säule h_2. Messen wir diese Höhen, so ergibt sich:*

In verbundenen Gefäßen verhalten sich die Höhen verschiedener Flüssigkeiten über der Berührungsfläche umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte.

Bezogen auf 1 qcm gedrückte Fläche ist der Druck von 1 cm Wasser 1 g/cm^2, von 1 cm Quecksilber 13,6 g/cm^2, denn 1 cm^3 Quecksilber wiegt 13,6 g. Eine Quecksilbersäule von 1 cm Höhe übt denselben Druck aus wie eine Wassersäule von 13,6 cm Höhe.

Eine Quecksilbersäule von etwa 74 cm Höhe verursacht denselben Druck wie eine Wassersäule von 10 m Höhe, und dieser Druck macht 1 kg pro cm^2 der gedrückten Fläche aus.

In einer Tiefe von 10 m herrscht im Wasser ein Druck von 1 kg auf jedes cm^2 der gedrückten Fläche, in 100 m Tiefe ein Druck von 10 kg auf jedes cm^2. Die Tiefe, in der Taucher wirken können, ist daher sehr beschränkt.

Fig. 33.

Der Druck einer Flüssigkeit kann demnach angegeben werden:

a) durch Angabe der Höhe der Flüssigkeitssäule, z. B. 25 cm Quecksilberdruck, 270 cm Wasserdruck,

b) durch den in Gramm gemessenen Druck auf die Flächeneinheit, z. B. 45 g pro cm^2, 1,2 kg pro cm^2.

[Aus dem Versuch mit der Pascalschen Waage ergibt sich ganz allgemein, wenn wir alle in Betracht kommenden Größen in cm bzw. cm^2 messen:

Der Druck, den eine Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht s auf eine Fläche q cm^2 bei einer Höhe h cm ausübt, ist $D = h \cdot q \cdot s$ Gramm.

Angewendet auf den Versuch mit der **U**-förmig gebogenen Röhre ergibt sich danach, daß der Druck auf der einen Seite $D_1 = h_1 \cdot q \cdot s_1$ und auf der anderen Seite $D_2 = h_2 \cdot q \cdot s_2$ ist. Da für die Berührungsfläche q und der Druck auf beiden Seiten gleich groß ist, folgt daraus

$$D_1 = D_2 = h_1 \cdot q \cdot s_1 = h_2 \cdot q \cdot s_2, \qquad h_1 \cdot s_1 = h_2 \cdot s_2,$$

d. h. es verhält sich $h_1 : h_2 = s_2 : s_1$.

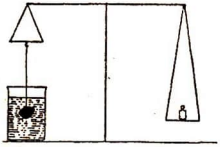


Fig. 34.

7. Auftrieb und Schwimmen. *Bestimmung des Gewichtsverlustes eines festen Körpers beim Eintauchen in Wasser, Alkohol oder Salzlösungen* (Fig. 34). *Vergleich des Gewichtsverlustes mit dem durch ein Überlaufgefäß bestimmten Volumen.*

Ein Körper verliert in einer Flüssigkeit so viel an Gewicht wie die verdrängte Flüssigkeit wiegt.

Dieser Satz heißt das Archimedische Prinzip.

Da der Gewichtsverlust eines Körpers in Wasser mit der Waage viel genauer bestimmt werden kann als das Volumen an einem Überlaufgefäß, so wird das Archimedische Prinzip meist bei der Bestimmung des spezifischen Gewichtes angewendet und zur Messung des Volumens des Körpers benutzt.

Ein Körper verliert in Wasser so viel Gramm an Gewicht wie sein Volumen in cm^3 beträgt.

Den Gewichtsverlust eines Körpers in einer Flüssigkeit bezeichnet man als Auftrieb.

Bringen wir einen Körper, wie ihn Fig. 35 darstellt, in eine Flüssigkeit, so wird er auf seiner Unterseite einen gewissen Druck nach oben, auf der oberen Seite einen geringeren Druck nach unten erfahren. Der Druck, den die Flüssigkeit auf die Seitenwände ausübt, besitzt keinen Einfluß auf das Gewicht. Der Auftrieb muß dann gleich der Differenz des oben und unten ausgeübten Flüssigkeitsdruckes sein, und diese ist gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit $G = q \cdot h \cdot s$. Für jeden anders geformten Körper gilt Sinnentsprechendes.

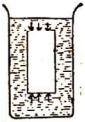


Fig. 35.

Ein Körper schwimmt, wenn sein Auftrieb größer ist als sein Gewicht.

Der schwimmende Körper taucht so tief in die Flüssigkeit ein, daß das Gewicht der Flüssigkeit, die er verdrängt, gleich seinem Gewicht ist. Ein Schiff von 1000 Tonnen Gewicht verdrängt 1000 Tonnen Wasser. Eisen schwimmt auf Quecksilber.

Glasgefäße von der Form, wie sie Fig. 36 wiedergibt, dienen dazu, das spezifische Gewicht der Flüssigkeit anzugeben, in die sie eingetaucht werden. In einer Flüssigkeit von großem spezifischen Gewicht sinken sie weniger tief ein als in einer Flüssigkeit von geringerem spezifischen Gewicht. An dem Hals der Röhre ist eine Skala angebracht, die unmittelbar das spezifische Gewicht angibt. Solche Instrumente heißen Aräometer.

Fig. 36.

§ 8. Das Gas

1. Gewicht und Volumen des Gases. *Drückt man ein offenes Gefäß mit der Öffnung nach unten in Wasser und versucht es mit Wasser zu füllen, so gelingt der Versuch erst, wenn die Luft, die in dem Gefäß ist, dabei entweichen kann. Leuchtgas, Kohlensäure oder andere Gase verhalten sich ebenso* (Fig. 37).

Gase nehmen einen Raum ein, den ein anderer Körper nicht gleichzeitig einnehmen kann. Sie besitzen ein Volumen.

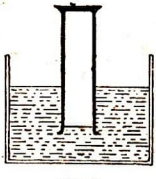


Fig. 37.

Saugen wir aus einer mit einem Glashahn verschlossenen Flasche, die an einer Waage, wie Fig. 38 *zeigt, befestigt und austariert ist, Luft heraus, so läßt sich nachweisen, daß das Gewicht der mit Luft gefüllten Flasche geringer geworden ist. Füllt man sie mit Leuchtgas anstatt mit Luft, so ist sie ebenfalls leichter als vorher. Mit Kohlensäure gefüllt wird sie schwerer.*

Gase besitzen ein Gewicht.

Gase stimmen also in zwei wesentlichen Eigenschaften mit den festen Körpern und den Flüssigkeiten überein: Sie besitzen ein Gewicht und ein Volumen.

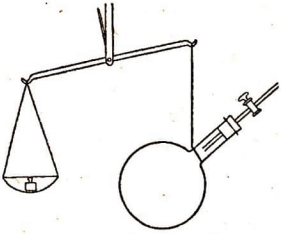


Fig. 38.

Nach dem in § 2 angegebenen Verfahren kann das spezifische Gewicht der Luft bestimmt werden. Das Gewicht des in Fig. 38 *abgebildeten, mit einem offenen Glashahn versehenen Glaskolbens sei* g_1. *Wird Luft aus dem Kolben gesaugt und der Glashahn dann geschlossen, so ist der Kolben leichter geworden. Sein Gewicht sei nun* g_2. *Dann ist* $g_1 - g_2$ *gleich dem Gewicht* G *der ausgesaugten Luft. Wird die Öffnung des Glashahnes unter Wasser gehalten und der Hahn dann geöffnet, so strömt so viel Wasser ein, wie dem Volumen* V *der ausgesaugten Luft entspricht. Man mißt die Menge des Wassers, die in den Kolben dringt, mit einem Meßglas und erhält so* V. *Aus* G *und* V *läßt sich das spezifische Gewicht der Luft berechnen.*

Wird der Kolben vor dem Aussaugen mit einem anderen Gase gefüllt, so kann man dessen spezifisches Gewicht in gleicher Weise bestimmen.

Es beträgt das spezifische Gewicht für:

Luft	0,001 293,	Sauerstoff	0,001 429,	Stickstoff	0,001 250,
Kohlendioxyd	0,001 977,	Leuchtgas	0,0006,	Wasserstoff	0,00009.

2. Die elastische Ausdehnung der Gase. *Preßt man ein Gas in einem Zylinder* (Fig. 39) *durch einen luftdicht schließenden Kolben zusammen, so vermindert es sein Volumen, dehnt sich aber sofort wieder aus, wenn der Druck nachläßt.*

Gase sind elastisch in bezug auf ihr Volumen.

Der Druck, der auf ein Gas ausgeübt wird, breitet sich nach allen Seiten gleich stark aus.

Findet sich an irgendeiner Stelle des Gefäßes, das das Gas einschließt, eine Öffnung, so tritt hier das Gas aus, falls es zusammengepreßt wird. Wird aber aus dem Gefäß durch Saugen ein Teil des Gases entfernt, so tritt durch jede Öffnung, die das Gefäß besitzt, Luft in das Gefäß ein. Im ersten Fall übt das Gas auf die Wand des Gefäßes einen Druck, im zweiten anscheinend einen Zug aus.

Fig. 39.

Die Größe des Zuges und Druckes, der auf die Wand des gasgefüllten Raumes ausgeübt wird, läßt sich mit dem Manometer bestimmen.

Das offene Manometer ist eine verbundene Röhre (Fig. 40), ein U-förmig gebogenes Rohr, dessen beide Schenkel offen sind. In dieser Röhre befindet sich Wasser oder Quecksilber. Verbindet man den einen Schenkel des Rohres mit dem Gefäß, in dem sich das Gas befindet, so bildet die Oberfläche der Flüssigkeit in diesem Schenkel einen Teil der Gefäßwand, die das Gas einschließt. Setzt man nun das Gas in dem Gefäß einem Druck aus, so fließt die Flüssigkeit nicht etwa aus dem Manometerrohr aus, sondern sie stellt sich verschieden hoch in beiden Schenkeln ein. Der Unterschied der Drucke der Flüssigkeitssäulen in beiden Schenkeln des Manometers entspricht genau dem Druck, der auf das Gas ausgeübt worden ist, denn es herrscht Gleichgewicht an der Berührungsfläche von Flüssigkeit und Gas. Saugt man Gas aus dem Gefäß, so wird die Manometerflüssigkeit nicht etwa ganz in das Gefäß gezogen, sondern sie stellt sich diesmal in dem Schenkel höher, der dem Gas am nächsten ist. Das Gas besitzt dann eine scheinbare Zugkraft, einen Unterdruck.

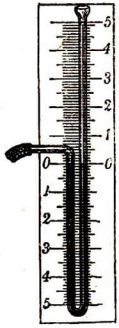


Fig. 40.

Die Größe des Überdruckes oder Unterdruckes, dem ein Gas über seinen normalen Zustand hinaus ausgesetzt ist, kann man demnach durch den Druck der Flüssigkeitssäule messen, um welche die Flüssigkeit des Manometers im einen Schenkel höher steht als im anderen.

Der Gasdruck wird daher gewöhnlich in Millimeter Wassersäule oder in Millimeter Quecksilbersäule angegeben.

Mit dem Manometer lassen sich die elastischen Eigenschaften der Gase sehr genau nachprüfen.

3. Der Druck eines Gases und der Luftdruck. *Saugt man aus einem mit einem Quecksilbermanometer verbundenen Gefäß die Luft aus, so kann man (auch unter Anwendung der unten beschriebenen Luftpumpe) keinen größeren Unterdruck als etwa 760 mm Quecksilbersäule erzeugen. Dies gilt für Versuche an der Erdoberfläche in Meereshöhe.*

Nimmt man denselben Versuch auf einem hohen Berg oder in höheren Luftschichten vor, so ergibt sich, daß der Unterdruck um so geringer ist, je größer die Entfernung von der Erdoberfläche in Meereshöhe ist. In 3000 m Höhe beträgt der größte Unterdruck etwa 520 mm, in 10000 m Höhe etwa 250 mm, in 100 km Höhe ist der Unterdruck nur noch sehr gering.

Bringt man eine fest zugebundene Schweinsblase, in der noch ein wenig Luft ist, in einen Raum, aus dem man die Luft aussaugen kann, so bläht sich die Schweinsblase um so stärker auf, je mehr Luft abgesaugt wird. Die Luft, die in der Schweinsblase vorhanden ist, dehnt sich dann also aus. Läßt man wieder Luft in den Raum strömen, so zieht sich die Blase wieder zusammen. Die Blase wird jetzt durch die äußere Luft wieder zusammengedrückt.

Aus diesen Versuchen läßt sich erkennen:

|| Gase sind bestrebt sich unbegrenzt auszudehnen.

Gase besitzen keine Kohäsion wie die festen Körper sondern Ausdehnungsbestreben oder Expansion[1]).

|| Gase üben stets auf ihre Umgebung einen Druck nach allen Seiten aus.

Das Luftmeer, das die Erde umgibt, übt auf alle Körper einen Druck aus, der an der Erdoberfläche in Meereshöhe am größten ist und mit abnehmender Höhe geringer wird.

Dieser Druck des Luftmeeres oder der Atmosphäre gleicht dem Druck im Inneren einer schweren Flüssigkeit. Denn die Luft ist schwer und zeigt daher in tiefer gelegenen Schichten einen höheren Druck als weiter oben.

Ein Gas, das ein möglichst großes Volumen einzunehmen sucht, wird an der Erdoberfläche gehindert, dies zu tun, weil es durch den Druck der atmosphärischen Luft zusammengedrückt wird. Je mehr aber ein Gas zusammengedrückt wird, desto größer wird sein Gegendruck. Wenn der Druck des Gases gleich dem Druck der Atmosphäre ist, zeigt ein mit dem Gasraum verbundenes Manometer keinen Über- oder Unterdruck an. Wir müssen daher von allen Gasen aussagen:

An der Erdoberfläche in der Höhe des Meeresspiegels besitzt ein Gas unter normalen Umständen einen Druck von 760 mm Quecksilbersäule.

Zeigt das Manometer einen Überdruck von 200 mm an, so ist der wirkliche Druck 960 mm, zeigt es einen Unterdruck von 400 mm an, so ist der wirkliche Druck des Gases 360 mm Quecksilbersäule.

4. Das Gesetz von Boyle. Fig. 41 *stellt eine weite Glasröhre dar, die oben mit einem Quecksilbermanometer verbunden ist. Durch den unteren Hahn kann Wasser in die Röhre gepreßt oder auch Wasser, das in der Röhre ist, abgesaugt werden. Schließt man zunächst eine kleine Luftmenge in der weiten Röhre so ab, daß das Manometer keinen Über- oder Unterdruck zeigt, und vergrößert man dann das Volumen des Gases durch Absaugen des Wassers nach unten, so zeigt das Manometer für eine bestimmte Vergrößerung des Volumens einen bestimmten Unterdruck an. In ähnlicher Weise zeigt eine Gasmenge, die die ganze Röhre anfangs ohne Über- oder Unterdruck ausfüllte, einen Überdruck am Manometer an, wenn man ihr Volumen dadurch vermindert, daß man Wasser in die Röhre von unten hineinpreßt.*

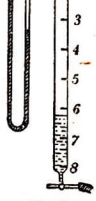


Fig. 41.

Man berechnet, um das Ergebnis der Versuche beschreiben zu können, zunächst den Gesamtdruck des eingeschlossenen Gases. Dieser ist gleich dem Druck der Atmosphäre (normal 760 mm) vermehrt oder vermindert um die am Manometer abgelesene Druckdifferenz (Über- oder Unterdruck). Vergleicht man nun zwei verschieden große Volu-

1) expandĕre = ausbreiten.

mina mit den zugehörigen Drucken, so kann man feststellen, daß immer, welche Werte man auch vergleicht, die Regel gilt:

Ändert sich das Volumen einer bestimmten abgeschlossenen Gasmenge bei gleichbleibender Temperatur, so verhalten sich die gemessenen Volumina umgekehrt wie die zugehörigen Drucke.

Diese gesetzmäßige Beziehung heißt das Gesetz von Boyle. Es besagt, daß der Druck doppelt so groß wird, wenn das Volumen auf die Hälfte, dreimal so groß wird, wenn es auf den dritten Teil vermindert wird usw. Voraussetzung ist dabei, daß die Temperatur sich nicht ändert.

[Zur Ableitung des Gesetzes schreibt man zweckmäßig die Ergebnisse der Messung in folgender Tabelle an:

Überdruck oder Unterdruck h	Gesamtdruck p ($p = 760 \pm h$)	Volumen V	Produkt p $p \cdot V$

Man findet in dieser Weise, daß das Produkt $p \cdot V$ aus allen Messungen, d. h. für alle Zustände, annähernd dieselbe Zahl ergibt. In dieser Unveränderlichkeit des Produktes ist das oben genannte Boylesche Gesetz erkennbar. Man kann es demnach auch in der Form aussprechen:

Bei gleichbleibender Temperatur können sich Druck und Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge stets nur derart ändern, daß das Produkt zwischen dem jeweiligen Druck p und dem zugehörigen Volumen V bei allen Änderungen unveränderlich bleibt.

In einer Formel ausgedrückt lautet das Gesetz:

$$\boxed{V \cdot p = c} \quad t \text{ unveränderlich,}$$

Fig. 42.

wobei c eine unveränderliche Zahl ist, deren Größe von der Menge und der Temperatur des Gases abhängig ist.

Auf die oben gewählte Form kommt man von dieser Form des Gesetzes durch folgende Betrachtung: Sind die zusammengehörigen Werte für Druck und Volumen einer Gasmenge V_1 und p_1 für einen bestimmten Zustand und V_2 und p_2 für einen anderen Zustand, so ist $V_1 \cdot p_1 = c$ und $V_2 \cdot p_2 = c$ oder auch $V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2$ oder

$$\boxed{V_1 : V_2 = p_2 : p_1} \quad t \text{ unveränderlich,}$$

d. h. Druck und Volumen stehen im umgekehrten Verhältnis zueinander.]

Das Boylesche Gesetz ist das Gesetz, das die elastischen Eigenschaften eines Gases beschreibt. Es findet in folgendem Meßinstrument Anwendung:

Schmilzt man den einen Schenkel eines offenen Manometers zu und schließt in ihm ein Gas auf diese Weise ab, so muß der Druck im offenen Schenkel auf das Doppelte wachsen, wenn das Volumen im geschlossenen Schenkel sich auf die Hälfte vermindern soll, auf das Dreifache,

wenn das Volumen auf ein Drittel zusammenschrumpfen soll, usw. Ein solches Manometer heißt geschlossenes Manometer und dient zur Messung großer Druckdifferenzen (Fig. 42).

5. Das Gesetz von Gay-Lussac. *Gase dehnen sich aus, wenn sie erwärmt werden* (Fig. 43). *In einem Glasballon, der mit einer langen horizontalen Röhre verbunden ist* (Fig. 45), *ist eine gewisse Menge Luft durch einen Flüssigkeitstropfen abgeschlossen. Erwärmt man die Luft in dem Ballon dadurch, daß man diesen in ein Wasserbad bringt, so verschiebt sich der Tropfen, und wir können aus seiner Lage feststellen, in welcher Weise sich das Volumen der Luft bei unveränderlichem Druck mit wachsender Temperatur ändert.*

Die Änderung erfolgt gesetzmäßig. Aus den Versuchsergebnissen läßt sich das von Gay-Lussac entdeckte Gesetz erkennen:

Das Volumen einer abgeschlossenen Gasmenge nimmt bei unveränderlichem Druck für 1^0 C Temperaturerhöhung um $^1/_{273}$ seines Volumens bei 0^0 C zu.

[Ist V_0 das Volumen bei 0^0, so nimmt es bis zur Temperatur t^0 C um $\frac{V_0 \cdot t}{273}$ zu. Im ganzen ist also sein Volumen V_t bei der Temperatur t

$$V_t = V_0 + \frac{V_0 \cdot t}{273}$$

$$\boxed{V_t = V_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right)} \quad p \text{ unveränderlich.}]$$

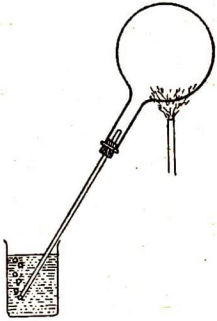


Fig. 43.

Wir haben hier den Ausdruck Gas statt Luft verwendet, obwohl sich der Versuch auf die Ausdehnung der Luft bezog. Es ist aber statthaft, den allgemeineren Ausdruck Gas zu gebrauchen, denn die Untersuchung bei anderen Gasen ergibt dieselbe

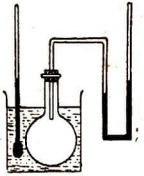


Fig. 44.

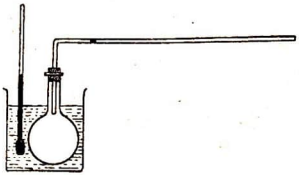


Fig. 45.

Gesetzmäßigkeit. Daher kann das Gay-Lussacsche Gesetz auch in der erweiterten Form ausgesprochen werden:

Alle Gase dehnen sich bei unveränderlichem Druck für 1^0 C Temperaturerhöhung um $^1/_{273}$ ihres Volumens bei 0^0 C aus.

Verbindet man den Glaskolben, der das Gas enthält, mit einem Manometer (Fig. 44) *anstatt mit einer langen Röhre, so kann sich das Gas, wenn es erwärmt wird, nur so wenig ausdehnen, daß es praktisch für die Messung nicht in Betracht kommt. Das Manometer zeigt dann beim Erhitzen des Wasserbades an, in welcher Weise der Druck des Gases bei unveränderlichem Volumen zunimmt. Man findet das ebenfalls nach Gay-Lussac genannte Gesetz:*

Der Druck einer abgeschlossenen Gasmenge nimmt bei unveränderlichem Volumen für 1° C Temperaturerhöhung um $^1/_{273}$ des Druckes bei 0° C zu.

[Ist p_t der Druck bei t^0 und p_0 der Druck bei 0° C, so ist

$$\boxed{p_t = p_0 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right)} \quad V \text{ unveränderlich.}$$

Reduktion einer Gasmenge auf das Normalvolumen. Man kann das Volumen eines Gases, das z. B. in einem Zylinder über Wasser abgefangen ist, leichter bestimmen als das Gewicht des Gases. Nur die Angabe des Gewichtes vermag aber leicht vergleichbare Werte für die Menge eines Gases zu bieten. Anstatt das Gewicht zu messen, kann man es berechnen, wenn man das Volumen und das spezifische Gewicht des Gases kennt. Die Angaben für das spezifische Gewicht eines Gases beziehen sich aber auf einen Druck von 760 mm und die Temperatur 0° C. Will man diese Zahl benutzen, so muß man zuerst ausrechnen, wie groß das Volumen der Gasmenge bei 760 mm Druck und 0° C ist.

Man nennt das Volumen bei 0° C und 760 mm Druck das Normalvolumen.

Mit Hilfe des Boyleschen und Gay-Lussacschen Gesetzes kann man durch Rechnung das Normalvolumen eines Gases, das bei t^0 C das Volumen V_t und den Druck p_t besitzt, berechnen. Würde man zunächst den Druck des Gases bei gleichbleibender Temperatur verändern, bis er 760 mm beträgt, so wäre nach dem Boyleschen Gesetz

$$V_t \cdot p_t = V_x \cdot 760.$$

Würde man dann bei unverändertem Druck die Temperatur auf 0° C erniedrigen, so würde sich das Volumen V_x verändern, bis es V_0 wäre. Dann bestände zwischen dem Volumen V_x und dem Volumen V_0 die Beziehung:

$$V_x = V_0 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

Führt man diesen Wert in der ersten Formel ein, so ist:

$$V_t \cdot p_t = V_0 \cdot 760 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

oder auch

$$V_0 = \frac{V_t \cdot p_t \cdot 273}{(273 + t) \cdot 760}.$$

Will man das Gewicht eines Gases bestimmen, so mißt man das Volumen V_t den Druck p_t, unter dem es steht und die Temperatur t. Daraus berechnet man das Normalvolumen V_0. Multipliziert man das Normalvolumen mit dem spezifischen Gewicht s, so erhält man das Gewicht des Gases

$$G = V \cdot s.$$]

§ 9. Der luftleere Raum und die Atmosphäre

1. Die Luftpumpe. Die Luftpumpe (Fig. 46a) dient dazu, einen Raum luftleer zu pumpen. Sie besteht aus dem Zylinder *S*, in dem ein Kolben luftdicht hin und her bewegt werden kann, dem Rezipienten *R*, einem Glasbehälter, aus dem die Luft entfernt werden soll, und einem mit zweifacher Bohrung versehenen Hahn *H* Fig. 46b (eine ist schwarz, die andere hell gezeichnet), der gestattet, den Zylinder bald mit dem Rezipienten, bald mit der äußeren Luft zu verbinden. Zieht man, während Rezipient und Zylinder verbunden sind, durch ein Zahnradgetriebe den Kolben aus, so strömt die Luft aus dem Rezipienten in den im Zylinder freigewordenen Raum ein. Dabei erniedrigt sich ihr Druck entsprechend der Volumvergrößerung. Stellt man die Verbindung zwischen Zylinder und äußerer Luft durch Umstellen des Hahnes her, und läßt man dann den Kolben zurückgleiten, so wird dabei die Luft aus dem Zylinder vollständig entfernt. Verbindet man nun wieder Zylinder und Rezipient und zieht dann den Kolben aus, so dehnt sich wieder die Luft des Rezipienten auf Zylinder und Rezipient aus. Dabei wird der Druck geringer. Die im Zylinder befindliche Luft wird beim Zurückgleiten des Kolbens nach außen gestoßen. Setzt man das Verfahren fort, so wird immer mehr Luft aus dem Rezipienten ausgesogen. Es entsteht im Rezipienten ein nahezu luftleerer Raum oder ein Vakuum[1]).

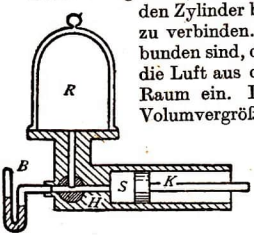


Fig. 46a.

Fig. 46b.

Da in der Bohrung des Hahnes immer Luft von gewöhnlichem Druck zurückbleibt, die sich beim Umstellen des Hahnes auf den Rezipient verteilt, kann der Rezipient nie über ein gewisses Maß hinaus ausgepumpt werden. Man nennt deshalb die Bohrungen des Hahns und das Verbindungsrohr den schädlichen Raum.

Meist ist mit dem Rezipienten noch ein Manometer *B* verbunden, an dem man ablesen kann, wie groß der Druck des Gases im Rezipienten ist (Barometerprobe).

2. Luftpumpenversuche. a) *Eine Schweinsblase, die einen luftverdünnten Raum gegen die äußere Luft abschirmt, wird sehr stark durch den Luftdruck eingedrückt.*

b) *Versuch mit den sogenannten Magdeburger Halbkugeln.*

c) *Wasser siedet schon in lauwarmem Zustand.*

d) *Eine Feder und ein Stück Blei fallen im luftleeren Raum gleich schnell.*

e) *Der Schall wird im luftleeren Raum nicht fortgepflanzt.*

3. Das Quecksilberbarometer. *Wir füllen eine Glasröhre* (Fig. 47), *die am einen Ende zugeschmolzen ist, mit Quecksilber vollständig an, verschließen sie am offenen Ende mit dem Finger, drehen sie dann um, tauchen dieses Rohrende in ein Gefäß mit Qecksilber und öffnen die Röhre durch Wegnahme des Fingers unter der Quecksilberoberfläche. Dann fällt das Quecksilber im geschlossenen Schenkel bis*

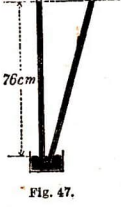


Fig. 47.

1) vacuum = das Leere.

zu einer Höhe herab, die etwa 760 mm über der Oberfläche des Quecksilbers in dem offenen Gefäß liegt, in das das Rohr getaucht ist. Diese Höhe bleibt dauernd die gleiche. Neigen wir die Röhre zur Seite, so wird der von Quecksilber freie Raum im geschlossenen Schenkel kleiner. Er verschwindet ganz, wenn das obere Ende der Röhre nur noch 760 mm oder weniger von dem unteren Quecksilberspiegel senkrecht entfernt ist. Der Versuch ist so vorgenommen worden, daß es der äußeren Luft nicht möglich war, in die Röhre einzudringen.

Daher kann man aussagen:

Der Raum über dem Quecksilber ist vollkommen luftleer.

Die Röhre und das Gefäß, in dem die Röhre mündet, wirken wie ein Quecksilbermanometer. Der eine Schenkel des Manometers (das Gefäß) kann sehr kurz sein, weil das Quecksilber nur in den anderen hineingetrieben wird. Auf der unteren Quecksilberoberfläche lastet der Druck der atmosphärischen Luft, auf der oberen lastet kein Druck, da sie an das Vakuum grenzt. Eine solche Röhre gibt also in der Höhendifferenz zwischen dem unteren und oberen Quecksilberspiegel den Druck der atmosphärischen Luft gegen den luftleeren Raum an.

Fig. 48.

Wir nennen ein solches Meßinstrument für den Druck der Luft ein Barometer.

Die Höhe der Quecksilbersäule nennen wir den Barometerstand.

Fig. 48 gibt ein sogenanntes Heberbarometer wieder.

4. Der Druck der Atmosphäre. Aus allen Versuchen, die wir angestellt haben, ergibt sich, daß das Luftmeer auf Gegenstände an der Erdoberfläche einen sehr großen Druck ausübt. Die Luft der Atmosphäre lastet (ähnlich wie eine Flüssigkeit) infolge ihrer Schwere auf den Körpern, die sich in ihr befinden.

Erheben wir uns um etwa 10 m vom Erdboden, so nimmt der Luftdruck, wie das Barometer anzeigt, um 1 mm Quecksilbersäule ab. Je höher wir steigen, desto geringer wird der Barometerstand. Diese Tatsache läßt darauf schließen, daß das Luftmeer, das die Erde umgibt, in einer gewissen Entfernung von der Erdoberfläche zu Ende ist. Man schätzt die Höhe der die Erde umgebenden Luftschicht auf etwa 100 bis 200 km.

Der Barometerstand ändert sich in gesetzmäßiger Weise mit der Höhe über dem Meeresspiegel. Daher ist es möglich, die Höhe eines Berges, eines Luftschiffes usw. mit dem Barometer zu messen, indem man den Barometerstand an der Erdoberfläche mit dem Barometerstand in der gesuchten Höhe vergleicht.

Mißt man in regelmäßigen Zeitabständen den Luftdruck der Atmosphäre, so beobachtet man, daß der Luftdruck an demselben Ort oft ganz erheblich wechselt. Das Barometer zeigt Schwankungen, deren Grenzen in Meereshöhe etwa bei 730 mm und 790 mm Quecksilbersäule liegen. Ganz vereinzelt kommen noch größere Abweichungen vom normalen Druck vor. Durch den wechselnden Barometerstand werden Strömungen in der Luft, die Winde, hervorgerufen, welche einen Ausgleich der verschiedenen Drucke herbeizuführen bestrebt sind.

Wir haben in § 7 gesehen, daß dem Druck einer Flüssigkeit von 74 cm Quecksilbersäule ein Druck von 1 kg je cm^2 der gedrückten Fläche entspricht. Das Luftmeer übt in Meereshöhe normalerweise einen Druck von 76 cm oder in etwa 200 m Höhe über dem Meere einen Druck von 74 cm Quecksilbersäule aus. Nach § 7, 6 läßt sich die Größe dieses Druckes auch in kg angeben, und zwar würde sich ergeben:

Das Luftmeer übt einen Druck auf die an der Erdoberfläche befindlichen Gegenstände aus, der in Meereshöhe ungefähr 1 kg je cm^2 beträgt.

Den Druck von 1 kg je cm^2 bezeichnen wir als 1 Atmosphäre.

5. Das Aneroidbarometer. Die Änderungen des Luftdruckes können auch noch in anderer Weise sichtbar und meßbar gemacht werden. Der Druck der Luft ist so stark, daß ein luftleeres Metallkästchen, dessen Deckel, wie Fig. 49 andeutet, dünn ist, bei den Veränderungen des Luftdruckes mehr oder weniger eingedrückt wird. Bringt man an dem Deckel einen Zeiger an, so kann auch eine verhältnismäßig sehr geringe Einbeulung gut sichtbar gemacht werden. Der Zeiger spielt auf einer Skala, die durch Vergleich mit einem Quecksilberbarometer geeicht ist.

Ein solches Barometer heißt Aneroidbarometer, weil es ohne Flüssigkeit verwendbar ist. Aneroidbarometer dienen stets da zum Messen des Luftdruckes, wo das Barometer transportiert werden muß.

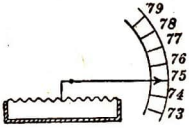


Fig. 49.

§ 10. Der Aggregatzustand

1. Die Wärmemenge. *Füllt man in ein Becherglas 1 kg Wasser und in ein anderes $^1/_2$ kg Wasser und $^1/_2$ kg Blei, und erwärmt man beide Gläser durch Bunsenbrenner, die gleichstark brennen, dann zeigt sich, daß die Temperatur im Becherglas mit Blei viel rascher ansteigt als in dem anderen Glasgefäß, obwohl in beiden Gläsern je 1 kg Stoff erwärmt wird* (Fig. 50 u. 51).

Gießt man 100 g irgendeines festen Stoffes, die auf 100° C erhitzt sind, in 100 g Wasser von Zimmertemperatur, so steigt die Temperatur des Wassers in unterschiedlicher Weise je nach dem Stoff, der verwendet wird. Bei Eisen steigt die Temperatur um etwa 9° C, bei Blei um etwa $2^1/_2$° C, bei Glas um etwa 15° C usw. 100 g Wasser erwärmen sich also nur um 9° C, während 100 g Eisen sich um etwa 75° C abkühlen, usw.

Aus diesen und ähnlichen Versuchen schließt man:

Alle Körper bedürfen der Zufuhr einer gewissen Wärmemenge, wenn sie eine höhere Temperatur annehmen sollen.

Kühlen sich Körper ab, so geben sie eine gewisse Wärmemenge dabei an ihre Umgebung ab.

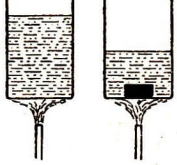


Fig. 50. Fig. 51.

Die Wärmemenge, die 1 kg Wasser aufnehmen muß, damit seine Temperatur um 1° C steigt, nennen wir eine Kilokalorie (kcal)[1]) oder eine Wärmeeinheit und benutzen sie als Maß für Wärmemengen.

Eine Grammkalorie (cal) erwärmt 1 g Wasser um 1° C.

Unter spezifischer Wärme eines Körpers verstehen wir die Wärmemenge, die 1 kg des Stoffes aufnehmen muß, damit seine Temperatur um 1° C steigt.

Unsere Versuche zeigen, daß die spezifische Wärme des Wassers recht groß im Vergleich zu anderen Körpern ist. Genaue Versuche haben ergeben:

Tabelle der spezifischen Wärme:

Wasser	1	Sand	0,2	Zinn	0,05	Äther	0,56
Eis	0,5	Eisen	0,11	Blei	0,03	Quecksilber	0,033
Glas	0,19	Kupfer	0,09	Alkohol	0,58	Luft	0,24.

An Hand dieser Tabelle läßt sich leicht berechnen, wieviel Kilokalorien nötig sind, um m kg eines Stoffes um t^0 C zu erwärmen. Bezeichnen wir die spezifische Wärme des Stoffes mit c, so ist die Wärmemenge Q

$$\boxed{Q = m \cdot c \cdot t \text{ Kilokalorien}}.$$

2. Schmelzen und Erstarren. Ein Körper kann fest, flüssig oder gasförmig sein. Je nachdem spricht man vom festen, flüssigen oder gasförmigen Aggregatzustand[2]).

Durch Erwärmen oder Abkühlen kann der Aggregatzustand eines Körpers geändert werden.

Der Übergang aus dem festen in den flüssigen Zustand heißt Schmelzen, der Übergang aus dem flüssigen in den festen Zustand Erstarren.

Versuche an Eis, Wachs, Metallegierungen lassen erkennen, daß der Schmelzvorgang eines bestimmten Stoffes stets bei derselben Temperatur vor sich geht. Bei derselben Temperatur findet auch das Erstarren statt.

Die Temperatur, bei der der Körper schmilzt oder erstarrt, heißt der Schmelzpunkt des Körpers.

Die Schmelzpunkte einiger Körper sind:

Platin	1800° C	Glas	800°—11200° C	Zinn	232° C	Quecksilber	—39° C
Eisen	1200°—1600° C	Zink	420° C	Wachs	70° C	Alkohol	—114° C
Kupfer	1084° C	Blei	327° C	Eis	0° C	Äther	—124° C
Gold	1064° C						

Legierungen von Metallen haben gewöhnlich einen Schmelzpunkt, der tiefer liegt als die Schmelzpunkte der Bestandteile der Legierung, z. B. Zinnlot 180°.

Salzlösungen gefrieren erst bei tieferer Temperatur als das Wasser.

Erwärmt man ein Gemisch von Wasser und Eis mit einem Bunsenbrenner, so zeigt das Thermometer so lange unverändert 0° C wie noch Eis in dem Wasser unaufgelöst vorhanden ist. Erst wenn alles Eis geschmolzen ist, steigt die Temperatur bei weiterem Erwärmen über 0° C.

1) calor = Wärme. 2) aggregare = zusammenhäufen.

Mischt man gleiche Teile Eis von 0° C und Wasser von 80° C, so schmilzt das Eis vollständig in dem warmen Wasser, das Wasser kühlt sich dabei aber auf 0° C ab. Eis verbraucht demnach ebensoviel Wärme zum Schmelzen, wie Wasser bei der Abkühlung von 80° C auf 0° C abgibt.

Zur Verflüssigung eines festen Körpers ist Wärme nötig.

Die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg eines Stoffes zu schmelzen, heißt die Schmelzwärme des Stoffes.

Die Schmelzwärme des Wassers ist 80 kcal je kg.

Geht ein Körper aus dem flüssigen in den festen Zustand über, so wird die gleiche Wärmemenge frei, die beim Schmelzen verbraucht worden ist.

Wärmezufuhr ist auch dann nötig, wenn man einen Körper in den flüssigen Zustand dadurch überführt, daß man ihn in einer Flüssigkeit auflöst. Löst man Salz in Wasser auf, so erkennt man daran, daß die Flüssigkeit sich dabei abkühlt, daß Wärme zur Lösung des festen Stoffes verbraucht wird.

Die Wärmemenge, die zur Lösung von 1 kg eines Stoffes verbraucht wird, nennt man Lösungswärme.

Bringt man gestoßenes Eis und Salz zusammen, so löst sich das Salz in dem Eis auf, und es entsteht Salzwasser, das auch bei Temperaturen, die mehrere Grad unter 0° C liegen, flüssig bleibt. Bei diesem Vorgang wird Wärme nicht nur zur Verflüssigung des Eises, sondern auch zur Auflösung des Salzes verbraucht. Wird keine Wärme von außen zugeführt, so wird diese Wärme dem Wasser, in dem das Salz sich auflöst, entzogen. Das Salzwasser kühlt sich also ab. Bei der Mischung von 3 Teilen Eis und 1 Teil Salz können Temperaturen von etwa —20° C erreicht werden. Solche Mischungen nennt man Kältemischungen. Sie dienen z. B. zum Gefrierenlassen von Speiseeis.

3. Verdampfen und Kondensieren. Verdampfen nennen wir den Übergang aus dem flüssigen in den gasförmigen, Kondensieren den umgekehrten Vorgang.

Der Unterschied zwischen Verdampfen und Verdunsten besteht darin, daß die Dampfbildung beim Verdunsten nur an der Oberfläche und bei jeder Temperatur, beim Verdampfen aber in allen Teilen, also auch im Innern der Flüssigkeit, bei einer ganz bestimmten Temperatur erfolgt.

Eine Flüssigkeit siedet[1]), wenn sie die Temperatur erreicht hat, bei der die Dampfbildung in allen ihren Teilen eintritt. Solange sie siedet, bleibt diese Temperatur unverändert, bis alle Flüssigkeit in Dampf übergeführt ist.

Die Temperatur, bei der ein Körper unter normalen Umständen siedet, bezeichnet man als seine Siedetemperatur.

Dampf heißt die Flüssigkeit, die in gasförmigen Zustand übergeführt ist. Wasserdampf, Äther- oder Alkoholdampf sind unsichtbar. Die nebel-

1) Siehe § 11, 1.

förmigen Wolken, die sich über siedendem Wasser bilden, bestehen nicht aus Dampf, sondern aus sehr vielen kleinen Wassertröpfchen.

Die Siedepunkte einiger Flüssigkeiten sind folgende:

Äther	35° C,	Benzol	80° C,	Leinöl	300° C,
Alkohol	78° C,	Wasser	100° C,	Quecksilber	357° C.

Läßt man Wasser sieden, so bleibt die Temperatur von etwa 100° C unverändert, solange nicht alles Wasser in gasförmigen Zustand verwandelt ist. Läßt man Wasserdampf in kaltes Wasser strömen, so geht der Wasserdampf, der unsichtbar ist, in den flüssigen Zustand über, er kondensiert sich.

Aus der Temperaturerhöhung, die das Wasser bei dem letzteren Vorgang erfährt, und aus der Menge des Wassers, das sich durch Kondensation des Dampfes bildet, läßt sich berechnen, welche Wärmemenge dadurch frei geworden ist, daß 1 kg Wasserdampf in flüssigen Zustand übergegangen ist. Dieselbe Wärmemenge hätte dem Wasser zugeführt werden müssen, damit es ohne Temperaturerhöhung in dampfförmigen Zustand übergeht.

Die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg einer Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand überzuführen, nennen wir die Verdampfungswärme. Die Verdampfungswärme des Wassers beträgt 539 kcal je kg.

Fig. 52.

Der Siedepunkt einer Flüssigkeit verändert sich sehr mit dem Druck, der auf der Flüssigkeit lastet. Schon die Veränderung des Barometerstandes ruft erhebliche Änderungen des Siedepunktes des Wassers hervor. Auf Bergen von 3000 m Höhe siedet das Wasser schon bei 90° C.

Eine in einem offenen Gefäße siedende Flüssigkeit steht nur unter dem Druck der Atmosphäre. Ist das Gefäß aber so fest verschlossen, daß der Dampf erst bei einem gewissen höheren Druck durch ein Ventil (Sicherheitsventil) entweichen kann, so übt auch der Dampf einen Druck auf die Flüssigkeit aus. Je mehr Dampf durch Erhitzen gebildet wird, desto höher wird der auf der Flüssigkeit lastende Druck. Er steigt an, bis sich das Ventil öffnet. Ein Versuch bei Wasser ergibt:

Zeigt das Manometer eines mit Wasser gefüllten Kessels:

einen Druck von	2	3	4	5	10 Atmosphären, so ist
der Siedepunkt	120°	133°	143°	151°	179° Celsius.

Der Siedepunkt des Wassers steigt mit zunehmendem Druck.

Fig. 52 stellt einen Dampfkochtopf, einen sogenannten Papinschen Topf, dar. Kochkessel für Massenspeisungen sind stets mit verschließbarem Deckel versehen, weil die Speisen bei höheren Siedetemperaturen rascher gar werden.

§ 11. Der Dampf

1. Der Dampfdruck. Die Erfahrung zeigt, daß Flüssigkeiten bei jeder Temperatur verdunsten, d. h. in den gasähnlichen Zustand übergehen. Eine Flüssig-

keit besitzt demnach stets über ihrer Oberfläche eine Dampfschicht, die bei den meisten Flüssigkeiten durchsichtig und farblos ist.

Bringt man in eine Flasche, die mit einem Manometer in Verbindung steht (Fig. 53), *ein kleines Fläschchen mit Äther oder Benzin, verschließt dann die Flasche fest und bewirkt durch Schütteln, daß sich das Fläschchen mit Äther oder Benzin öffnet, so bemerkt man allmählich ein starkes Ansteigen des Manometers. In der großen Flasche hat sich nichts weiter ereignet, als daß die Flüssigkeit allmählich verdunstet, d. h. dampfförmig geworden ist. Dabei ist der Druck des Gases (Luft + Dampf) in der Flasche größer geworden. Die Drucksteigerung kann nur auf den Äther- oder Benzindampf zurückgeführt werden. Dieses Beispiel erläutert demnach das Gesetz:*

Fig. 53.

Dämpfe üben wie Gase bei jeder Temperatur einen Druck auf ihre Umgebung aus.

Der Druck eines Dampfes ist um so größer, je höher die Temperatur des Dampfes ist.

Messungen für den Dampfdruck des Wassers haben ergeben:

Temperatur	Dampfdruck		Temperatur	Dampfdruck	
10° C	9,2	mm Quecksilber	120° C	2	Atmosphären
20° C	17,5		133° C	3	
50° C	92,0		143° C	4	
80° C	255,1		151° C	5	
100° C	760		179° C	10	

Der Vergleich dieser Tabelle mit der Tabelle des Siedepunktes ergibt:

Wasser siedet bei der Temperatur, bei der sein Dampfdruck gleich dem auf der Wasseroberfläche lastenden Druck ist.

Diese Regel gilt allgemein für alle Flüssigkeiten.

Daher siedet Wasser im Rezipienten der Luftpumpe bei gewöhnlicher Temperatur, auf hohen Bergen bei 90°—95° C, im Dampfkessel bei wesentlich höheren Temperaturen als 100° C.

2. Gesättigter Dampf. *Bringt man Wasser, Alkohol oder Äther in den luftleeren Raum einer Barometerröhre, so läßt sich zeigen:*

In einem gegebenen Volumen des Vakuums kann nur eine gewisse Wassermenge dampfförmig sein. Wird das Volumen geringer, so kondensiert sich Dampf zu Wasser, wird das Volumen größer, so verdampft mehr Wasser.

In gleicher Weise läßt sich zeigen, daß die Verdunstung einer Flüssigkeit in einer lufterfüllten Flasche nur bis zu einem gewissen Grade erfolgt. Ist die Menge der Flüssigkeit sehr groß, so wird nicht alle Flüssigkeit verdunsten.

Ändert sich aber die Temperatur, so ändert sich auch die Menge des Dampfes, die in einem gewissen Raum sein kann.

Diese Versuche erläutern das Gesetz:

a) Ein gewisser Raum kann bei einer bestimmten Temperatur nur eine bestimmte Dampfmenge aufnehmen.

Man bezeichnet den Dampf, der einen gewissen Raum ausfüllt, als gesättigt, wenn er keinen weiteren Dampf aufnehmen kann.

b) Wird gesättigter Dampf erwärmt, so kann mehr Dampf in demselben Volumen sein. Der Dampfdruck wächst sehr stark mit zunehmender Temperatur.

c) Wird gesättigter Dampf abgekühlt, so kondensiert sich eine gewisse Menge Dampf zu Flüssigkeit.

Der gesättigte Dampf stellt ein Zwischenstadium zwischen Gas und Flüssigkeit vor.

3. Atmosphärische Niederschläge. Die Dampfbildung ist unabhängig davon, ob auf der verdampfenden Flüssigkeit der Druck eines anderen Dampfes oder Gases lastet. Wasser verdampft unter dem Druck der Luft ebenso wie im luftleeren Raum. Verschieden ist in beiden Fällen nur die Zeit, in der sich eine gewisse Menge Dampf bildet.

In der Atmosphäre befindet sich also neben der Luft noch Wasserdampf. Bei 20° C sind in einem Raum von 1 m^3 höchstens 17,3 g Wasser als Dampf neben 1,25 kg Luft enthalten. Es kann bei 20° C weniger Wasserdampf in der Luft sein, niemals aber mehr, denn mit 17,3 g je m^3 zeigt der Wasserdampf einen Druck von 17,5 mm und ist damit gesättigt.

Körper, die den Wasserdampf aus der Luft aufsaugen, nennt man hygroskopisch. Solche Körper sind z. B. Schwefelsäure, Chlorkalzium, Darmsaiten, Menschenhaare. Haare und Saiten verlängern sich, wenn sie feucht werden. Man kann sie daher zu Apparaten verwenden, die den Feuchtigkeitsgehalt der Luft anzeigen. Diese Apparate heißen Haarhygrometer. Sie geben an, wieviel Prozent der möglichen Feuchtigkeit in der Luft vorhanden ist.

Wird die Luft von 20° C, die gesättigten Wasserdampf enthält, etwa auf 10° C abgekühlt, so kann der Druck des gesättigten Dampfes nur noch 9,2 mm betragen, was einer Wassermenge von 9,4 g im m^3 entspricht. Es müssen also bei dieser Abkühlung in jedem m^3 Luft 7,9 g Wasser in flüssige Form übergeführt werden.

Dieses Wasser kann ausgeschieden werden:

a) als Nebel, wenn die Tröpfchen so klein sind, daß sie in der Luft schweben,

b) als Regen, wenn die Tröpfchen sich zu größeren Tropfen vereinigen und dann fallen,

c) als Schnee, wenn die Temperatur unter den Gefrierpunkt des Wassers sinkt,

d) als Tau, wenn sich das Wasser an den Spitzen der Gräser, den Dächern, Kanten und Ecken von Gegenständen, Gittern, Drähten, Gebäuden usw. absetzt,

e) als Reif, wenn der Tau außerdem gefriert.

Da die Luft in höheren Luftschichten sehr kalt ist (Eisgrenze in Deutschland etwa bei 2000 m Höhe), so wird bei allen Luftströmungen, die von der warmen Erde in die Höhe steigen, Wasser ausgeschieden. Dies nehmen wir als Wolken-

bildung wahr. Die Wolken sind also Nebelgebilde aus Wassertröpfchen, die vorwiegend in aufsteigenden warmen Luftströmungen durch Verflüssigung des unsichtbaren Wasserdampfes erzeugt werden.

§ 12. Geschichtliche Entwicklung

Der erste Forscher, welcher das spezifische Gewicht bestimmen konnte, war Archimedes, der von 287 bis 212 v. Chr. in Syrakus lebte. Ihn soll der König Hiero beauftragt haben, einen goldenen Kranz auf die Reinheit des verwendeten Goldes zu untersuchen. Archimedes ist, so wird erzählt, beim Baden auf den Gedanken der Lösung dieser Aufgabe gekommen. Er formte einen Metallblock aus reinem Gold und einen aus reinem Silber, die dasselbe Gewicht wie der Kranz hatten. An einem Überlaufgefäß stellte er dann fest, wieviel Wasser von dem Goldklumpen, dem Silberklumpen und dem Kranze beim Eintauchen verdrängt wurde. Aus der verdrängten Wassermenge hat er dann auf die Reinheit des Goldes schließen können. Auch vom Schwerpunkt der Körper hat Archimedes schon richtige Vorstellungen gehabt.

Was die Griechen an physikalischen Kenntnissen besaßen, ging im Sturm der Völkerwanderung zunächst für das Abendland verloren. Die Wissenschaft fand im Mittelalter bei den Arabern eine bescheidene Fortbildung. Etwa um das zwölfte Jahrhundert waren den arabischen Gelehrten die spezifischen Gewichte der meisten Körper und das Verfahren der Bestimmung des spezifischen Gewichtes bekannt.

Die ersten Untersuchungen über den Druck in Flüssigkeiten und das Schwimmen stammen von dem holländischen Deichinspektor Stevin (um 1600). Das wichtigste Ereignis in der Geschichte der Erforschung der Eigenschaften der Körper war die Entdeckung des Luftdruckes. Im Jahre 1643 hatte der Italiener Torricelli ein Quecksilberbarometer hergestellt und so den Luftdruck nachgewiesen. Einige Jahre vorher hatte der Bürgermeister Otto von Guericke in Magdeburg Versuche angestellt, mit einer Pumpe einen luftleeren Raum herzustellen. Er hatte zuerst ein Faß mit Wasser gefüllt und dieses mit einer Feuerspritzenpumpe aus dem Faß zu ziehen versucht. Dabei war aber unter Pfeifen und Sausen die Luft durch die Fugen in das Faß eingeströmt. Als er den Versuch an einem Kessel aus Kupferblech wiederholte, gelang es anfangs, doch wurde plötzlich der Kessel von der äußeren Luft zusammengedrückt. Er gewann dadurch eine Vorstellung von dem ungeheuren Druck, den das Luftmeer auf alle Körper ausübt. Im Jahre 1654 waren seine Versuche so weit gediehen, daß er mit leichter Mühe Gefäße luftleer pumpen und auf dem Reichstag zu Regensburg zeigen konnte, wie luftleer gepumpte Halbkugeln von 55 cm Durchmesser von 16 Pferden nicht auseinander gezogen werden konnten. Auch ein Wasserbarometer von 10 m Höhe hatte Guericke hergestellt und zur Messung der Schwankungen des Luftdruckes benutzt.

Die Grundgesetze der Elastizität fester Körper wurden von dem Engländer Hooke, die Gesetze der elastischen Ausdehnung der Gase bzw. das Verhalten von Druck und Volumen einer Gasmenge gleichzeitig von dem Engländer Boyle und dem Franzosen Mariotte gegen Ende des 17. Jahrhunderts entdeckt.

Zu Beginn des 18. Jahrhunderts machte der in Deutschland lebende französische Kalvinist Papin die so bedeutsame Entdeckung des Druckes von Wasserdampf. Er konstruierte die erste Maschine, die mit dem Druck des Dampfes bewegt wurde.

Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts lernte man, zwischen der Temperatur und der Wärmemenge zu unterscheiden. Man stellte sich damals die Wärme als einen Stoff vor, der kein Gewicht besitzt, aber zu dem Körper aus der Flamme hinzutreten muß, damit seine Temperatur höher wird.

Im Jahre 1783 verfertigten die Brüder Montgolfier zu Paris die ersten Ballons, die Menschen in die Luft tragen konnten. Sie benutzten zum Auftrieb erwärmte Luft. In demselben Jahre ließ man dann auch mit Wasserstoff gefüllte Ballons steigen. Die erste große Rundfahrt mit einem lenkbaren Luftschiff gelang dem Grafen Zeppelin im Jahre 1908.

Die Ausdehnung der Körper bei der Erwärmung war schon Galilei um 1600 bekannt, sie wurde in der Folgezeit bei der Konstruktion der Thermometer verwertet. Das Gesetz der Ausdehnung der Gase ist aber erst 1827 von dem Franzosen Gay-Lussac entdeckt worden.

Die ersten brauchbaren Aneroidbarometer stammen aus dem Jahre 1860.

III. Kraftumformende Maschinen

§ 13. Kraft und Arbeit

1. Die Kraft. Kraft nennen wir jeden Zug oder Druck, den ein Körper auf einen anderen Körper ausübt.

Kräfte entstehen z. B. infolge des Gewichtsdruckes der Körper, des Ausdehnungsbestrebens erwärmter Körper, der elastischen Eigenschaften der festen, flüssigen und gasförmigen Körper, der Expansion der Dämpfe, der Muskelzusammenziehung, des Stoßes eines bewegten Körpers auf einen ruhenden Körper usw. Alle diese Kräfte nennen wir mechanische Kräfte.

Ist der Körper, auf den die Kraft ausgeübt wird, frei beweglich, so erfährt er eine Änderung seines Bewegungszustandes. Er bewegt sich, wenn er vorher in Ruhe war. Er ändert seine Bewegungsrichtung oder seine Geschwindigkeit, wenn er schon in Bewegung war.

Wirken mehrere Kräfte gleichzeitig auf einen Körper, so ist im allgemeinen auch eine Bewegungsänderung die Folge der Kraftwirkung. Es kann aber auch ein frei beweglicher Körper unter Einwirkung mehrerer Kräfte in seinem Begegnungszustand unbeeinflußt bleiben, wenn die Kräfte in bestimmter Größe und Richtung wirken: Dann heben sich die Wirkungen aller Kräfte gegenseitig auf. Die Kräfte sind im Gleichgewicht.

Fig. 54.

Zwei in entgegengesetzter Richtung auf einen Körper wirkende Kräfte nennen wir gleich, wenn sie einen in Ruhe befindlichen, frei beweglichen Körper nicht in Bewegung setzen (Fig. 54).

2. Das Maß der Kraft. Wir können also Kräfte vergleichen, indem wir durch Versuche feststellen, ob sie, gleichzeitig wirkend, einen ruhenden Körper in Bewegung setzen oder nicht.

Ein Maß für die Größe der Kraft besitzen wir in dem Gewicht.

Lassen wir an einem Körper eine Kraft nach oben wirken, die den Körper im Gleichgewicht hält, so muß diese Kraft gleich dem Gewicht des Körpers sein. Die Spannung einer Feder, den Druck eines Gases usw. können wir in gleicher Weise durch Gewicht ausdrücken.

Die Größe einer Kraft wird in Kilogramm oder Gramm gemessen.

Zur genauen Bestimmung einer Kraft ist noch die Angabe erforderlich, in welcher Richtung die Kraft wirkt. Auch der Angriffspunkt ist unter Umständen wichtig.

Eine Kraft ist vollständig bestimmt, wenn ihre Größe, ihre Richtung und ihr Angriffspunkt bestimmt sind.

3. Das Parallelogramm der Kräfte. *Zur Untersuchung der Bedingungen, unter denen drei an einem Körper angreifende Kräfte im Geichgewicht sind, benutzen wir einen leicht beweglichen Ring, der an drei horizontal ausgespannten Fäden befestigt über der Mitte einer kreisförmigen Platte ruht* (Fig. 55). *Die Fäden laufen über Rollen, die am Rande der Platte verschiebbar angeordnet sind. Die Fäden werden durch Gewichte gespannt. Durch Verschieben der Rollen auf dem Umfang der Platte wird der Winkel, unter dem die in den Fäden wirkenden Kräfte zueinander stehen, geändert und zwar so lange, bis der Ring über der Mitte der Scheibe im Gleichgewicht ist.*

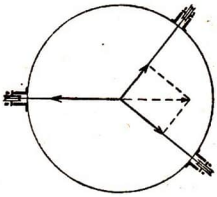


Fig. 55.

Zeichnet man dann die Richtungen der drei Kräfte auf einem Blatt Papier von einem Punkte aus auf, und trägt man in diesen Richtungen Strecken ab, die ebensoviel Zentimeter lang sind, wie die Kräfte in Krafteinheiten messen, so läßt sich aus den Versuchen erkennen:

Konstruiert man aus zwei Kräften ein Parallelogramm (Fig. 55), so ist die Diagonale dieses Parallelogrammes genau so groß, aber entgegengesetzt gerichtet wie die dritte Kraft.

Zwei Kräfte wirken demnach genau so wie eine Kraft, die der Größe und Richtung nach gleich der Diagonalen des Kräfteparallelogrammes ist.

Dieser Satz heißt der Satz vom Parallelogramm der Kräfte. Nach ihm sind alle in einem Punkte wirkenden Kräfte auf eine einzige Kraft zurückführbar.

Fig. 56.

Die Kräfte, die zusammengesetzt werden sollen, bezeichnen wir als Komponenten[1]), die Diagonale als die Resultante[2]) (Fig. 56).

1) componere = zusammensetzen. 2) resolvere = auflösen.

4. Der Projektionssatz der Kräfte. In den meisten Fällen der Praxis ist ein Körper, der durch eine Kraft bewegt werden soll, nicht vollkommen frei beweglich, sondern an eine bestimmte Bahn gebunden. Eine Billardkugel bewegt sich auf einer horizontalen Bahn, ein Schiff auf der Wasseroberfläche, ein Wagen auf der Straße, ein Eisenbahnwagen auf den Schienen, ein Pendelkörper auf einer Kreisbahn, die Felgen eines Rades auf einer Kreisbahn usw. Diese Körper bewegen sich alle zwangsläufig.

Aus Erfahrung wissen wir, daß es nicht gleichgültig ist, in welcher Richtung bewegende Kräfte an einem nur zwangsläufig beweglichen Körper angreifen. Wir untersuchen die Wirkung an folgendem Beispiel:

In Fig. 57 *stellt A einen auf einer vertikalen Bahn zwangsläufig beweglichen Körper dar. Dieser wird von einer Kraft, die gleich seinem Gewichte ist, nach unten gezogen. Wirkt dann eine größere Kraft schräg nach oben, so wird der Körper A nach oben gezogen und kommt in einer bestimmten Stellung zur Ruhe. Ist die nach oben wirkende Kraft sehr groß, dann ist auch der Winkel zwischen der Kraftrichtung und der Bahn groß, wird die Kraft kleiner, so nimmt der Winkel an Größe ab.*

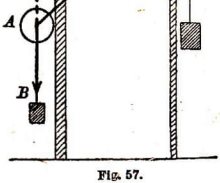


Fig. 57.

Zeichnen wir die wirkenden Kräfte und ihre Richtungen geometrisch auf, so ergibt sich aus einer Reihe von Versuchen:

Gleichgewicht herrscht dann zwischen der schräg nach oben wirkenden und der nach unten wirkenden Kraft, wenn die geometrische Projektion der schräg wirkenden Kraft auf die Bahn gleich der nach unten wirkenden Kraft ist.

Eine schief zur zwangsläufigen Bahn wirkende Kraft wirkt in der Richtung der Bahn bewegend nur mit einer Kraftkomponente, die gleich ihrer geometrischen Projektion auf die Bahn ist.

Zeichnen wir aus der wirkenden Kraft als Resultante und aus der Richtung der Bahn und der Richtung senkrecht dazu ein Kräfteparallelogramm (Fig. 58), so ist die eine Komponente des Parallelogrammes die Bewegungskomponente, die andere Komponente die Druckkomponente auf die Bahn.

Die Wirkung einer einzelnen Kraft läßt sich also auch als zusammengesetzt aus zwei Kräften auffassen.

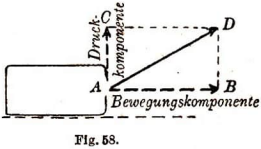


Fig. 58.

5. Die Reibung als Kraft. Eine auf ebener, glatter Unterlage rollende Kugel verliert erst ganz allmählich ihren anfänglichen Bewegungszustand. Je rauher die Bahn ist, desto eher kommt sie zur Ruhe. Die Bahn setzt der Bewegung des Körpers einen Widerstand entgegen, den wir Reibung nennen. Würde sich die Kugel auf ihrer Bahn nicht reiben, so bliebe sie dauernd

in Bewegung. Die Reibung wirkt demnach wie eine Kraft, die den Körper aufhält. Wir sprechen daher von Reibungskräften.

Bei allen Bewegungsvorgängen treten Reibungskräfte auf, die den bewegenden Kräften entgegenwirken. Auf Reibung ist es auch zurückzuführen, daß die Kräfte, die einen Körper in Bewegung setzen sollen, erst eine gewisse Größe erreichen müssen, bis sie Bewegung verursachen können.

Bei den im nachfolgenden besprochenen Versuchen ist die Reibung so gering, daß sie gegenüber den wirkenden Kräften nicht wesentlich in Betracht kommt.

6. Die Arbeit. Kräfte, die keine Bewegung hervorrufen, sind durch entgegenwirkende Kräfte in ihrer Wirkung gehemmt.

Kräfte, die Körper bewegen, leisten dabei Arbeit.

Arbeit leistet das Pferd, das den Wagen bewegt, der Schmied, der den Hammer schwingt, der Arbeiter, der Erde schaufelt usw. Die Arbeit ist um so größer, je mehr Kraft aufgewendet werden muß, und je weiter der Weg ist, auf dem die Kraft bewegend wirkt. Nach diesen beiden Umständen richtet sich die Wertung der mechanischen Arbeit im praktischen Leben, und darnach wird die Arbeit in der Physik gemessen.

Arbeit wird durch das Produkt aus aufgewendeter Kraft und zurückgelegtem Weg gemessen.

Ist die Arbeit A, die wirkende Kraft P und der Weg s, so ist:

$$\boxed{A = P \cdot s \text{ mkg}}\ .$$

Da die Kraft in kg, der Weg in m gemessen wird, wird damit die Arbeit in Meterkilogramm (mkg) gemessen.

Die Arbeit 1 mkg wird geleistet, wenn die Kraft 1 kg in gleicher Stärke auf dem Wege 1 m wirkt. Dies geschieht z. B., wenn wir ein Kilogrammgewichtstück vom Boden aus mit der Hand 1 m hoch heben.

Es ist für die Größe der Arbeit gleichgültig, ob die Kraft 50 kg auf dem Wege 100 m oder die Kraft 5000 kg auf dem Wege 1 m wirkt.

7. Die Leistung. Sehr wesentlich ist aber, ob eine Arbeit in längerer oder kürzerer Zeit erledigt ist.

Die in der Sekunde geleistete Arbeit heißt Leistung.
Die Leistung wird in Meterkilogramm/sec gemessen.
Die Leistung von 75 mkg/sec heißt 1 Pferdestärke.

In diesem Maß werden die Leistungen der Maschinen angegeben.

§ 14. Die einfachen Maschinen

Ein Körper kann auf einen anderen nur dann eine mechanische Kraft ausüben, wenn er ihn berührt. Ist die unmittelbare Berührung nicht möglich, so muß ein Körper, der zwischen beide gebracht wird, die Übertragung

der Kraft vermitteln. Solche Mittelskörper nennen wir in der Physik Maschinen.

Die Maschinen sind oft sehr vielgestaltig zusammengesetzte Mechanismen. In ihren wesentlichen Teilen bestehen sie aber immer aus Formen, die wir als Seil, Rolle, schiefe Ebene oder Hebel bezeichnen können.

1. Das Seil und die Stange. Seil und Stange sind Mittelskörper oder Maschinen, die den Angriffspunkt der Kraft in der Richtung verschieben, in der die Kraft wirkt.

Durch die Einschaltung eines Seiles oder einer Stange wird nichts an der Richtung und nichts an der Größe der Kraft geändert. Alle Teile des Seiles oder der Stange unterliegen derselben Kraftwirkung, die zwischen den beiden Körpern herrscht.

In der Technik findet diese Art der Kraftübertragung Anwendung im Tau, in der Kette, im Drahtseil oder im endlosen Band. Balken, eiserne Träger, Pfeiler und Streben sind Verwendungsformen der Stange.

2. Die Rolle und der Flaschenzug. Die Rolle ist eine Maschine, durch die die Richtung der Kraft geändert wird. Sie besteht aus dem Laufrad und der Gabel, in der sich das Laufrad dreht.

a) Ist die Gabel unbeweglich, so heißt die Rolle fest (Fig. 59).

Fig. 59.

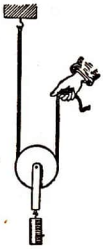


Fig. 60.

Bei der festen Rolle bleibt die Größe der Kraft unverändert. Nehmen wir zur Erläuterung der Wirkung der Rolle an, eine Last Q werde durch einen zweiten Körper, der die Kraft P auf das Seil ausübt, gehoben, so kann dies erst geschehen, wenn P so groß ist wie Q. Die Strecke, auf der Q gehoben wird, ist so groß wie die Strecke, um die sich P fortbewegt. Wir sagen daher kurz:

Bei der festen Rolle ist die Kraft gleich der Last und der Kraftweg gleich dem Lastweg.

b) Ist das eine Ende des Seiles fest und die Rolle beweglich, so heißt die Rolle lose (Fig. 60).

Die Last Q hängt an der Gabel der Rolle. Das Seil wird in diesem Falle von einem Körper gehalten, an dem das eine Ende des Seiles befestigt ist, und einem zweiten, der die Kraft P ausübt. Der Versuch zeigt, daß die Kraft P nur halb so groß wie Q sein muß, wenn Q gehoben werden soll. Soll aber die Last Q um eine bestimmte Strecke gehoben werden, so muß die Kraft P den doppelten Weg wie Q zurücklegen. Bei paralleler Seilführung gilt:

Bei der losen Rolle ist die Kraft gleich der halben Last und der Kraftweg gleich dem doppelten Lastweg.

c) Fig. 61 stellt einen Flaschenzug dar. In den Gabeln des Flaschenzuges sind mehrere Rollen vereinigt. Eine Gabel ist fest, eine lose, und

Fig. 61.

über alle Laufräder führt dasselbe Seil. Das eine Ende des Seiles ist an der festen Rolle angeknüpft, das andere Ende wird von der Kraft P gehalten. Die Last Q hängt an der losen Gabel.

Sind n Rollen in der losen Gabel vorhanden, so hängt die Last Q an $2\,n$ Seilen. Jedes Seil trägt also den $2\,n^{\text{ten}}$ Teil der Last Q. Daher kann die Kraft P die Last Q heben, wenn sie gleich $Q/2\,n$ ist. Der Weg der Kraft P wird dann aber $2\,n$ mal so groß sein wie der Weg der Last Q.

Für feste und lose Rolle und für den Flaschenzug gilt demnach:

Die Arbeit auf seiten der Last ist gleich der Arbeit auf seiten der Kraft. Eine kleine Kraft vermag unter Zurücklegung eines großen Weges eine große Last auf einem kurzen Weg zu heben.

3. Die schiefe Ebene und die Schraube. Die schiefe Ebene ist eine gegen die Horizontale geneigte ebene feste Bahn (Fig. 62).

Ein Körper, der frei beweglich auf einer schiefen Ebene liegt, bleibt nicht auf seinem Platze. Ihn zieht sein Gewicht Q nach unten (Fig. 64). Er bewegt sich aber nicht in der Richtung AB, in der ihn das Gewicht zieht, sondern seitwärts in der Richtung AD der geneigten Bahn. In dieser Richtung bewegt ihn eine Kraft P, die wir finden, wenn wir das in Fig. 62 gezeichnete Kräfteparallelogramm konstruieren. In diesem ist AB die Resultante Q, AD die Bewegungskomponente P und AC die Druckkomponente auf die Bahn. AB ist vertikal nach unten, AD parallel und AC senkrecht zur schiefen Ebene gerichtet.

Die Bewegungskomponente P heißt der Hangabtrieb. Der Quotient der Höhe h und der Länge l der schiefen Ebene gibt die Steigung an und heißt das Steigungsverhältnis.

Wir stellen fest, wie groß das Gewicht Q des Körpers ist. Dann messen wir den Hangabtrieb, indem wir in der Richtung P' einen Faden spannen, der über eine Rolle läuft und durch ein Gewicht P' belastet ist. Ist P' gerade so groß, daß der Körper weder nach oben gezogen wird noch nach unten gleitet, so ist es gleich dem Hangabtrieb P.

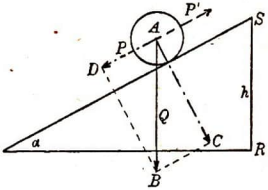


Fig. 62.

Versuche an verschieden stark geneigten Bahnen ergeben, daß der Quotient aus P und Q ebenso groß ist, wie das Steigungsverhältnis h/l. Es ist also

$$P : Q = h : l$$

$$P = Q \cdot \frac{h}{l}.$$

Die Bewegungskomponente der Last Q auf der schiefen Ebene ist gleich dem Produkt aus der Last Q und dem Steigungsverhältnis.

Das Steigungsverhältnis wird meist in % angegeben. Ist z. B. $l = 100$ m und $h = 3$ m, so ist das Steigungsverhältnis 3% und $P = Q \cdot 3/100$.

Beispiel: Beträgt das Gewicht eines Güterzuges von 30 Wagen rund 800 t, und kann die Lokomotive höchstens einen Zug von 16 t ausüben, so darf das Steigungsverhältnis theoretisch an keiner Stelle der Bahn 2% erreichen, damit der Zug nicht zurückrollt. In Wirklichkeit muß die Neigung noch viel geringer sein, wenn die Lokomotive den Zug vorwärts bringen soll.

Beispiel: Auf einen Wagen soll ein Faß von 150 kg Gewicht mit einer Schrotleiter von 4 m Länge vom Boden aus um 1,20 m gehoben werden. Der Kutscher hat dann eine Kraft von mindestens 45 kg aufzuwenden. Diese Kraft wirkt auf dem Wege 4 m, während die Last 150 kg um 1,20 m gehoben wird.

Aus diesem Beispiel läßt sich erkennen, daß auch bei der schiefen Ebene keine Arbeit erspart wird, sondern daß lediglich mit einer kleineren Kraft auf längerem Wege eine größere Last auf kurzem Wege bewegt werden kann. Auch bei der schiefen Ebene gilt das Gesetz:

Die Arbeit der Last ist gleich der Arbeit der Kraft.

Die schiefe Ebene wird als Werkzeug in der Form des Keiles, z. B. als Spaltkeil, als Axt, als Messer usw. verwandt. Wege, Straßen, Schienenstränge werden so angelegt, daß ihr Steigungsverhältnis sehr viel kleiner ist, als es nach der oben gefundenen Proportion für das Verhältnis der wirkenden Kraft zur Last sein darf.

Eine Schraube ist eine Form der schiefen Ebene, die auf dem Mantel eines zylindrischen Körpers, der Schraubenspindel, herumführt. Die eingegrabene oder erhabene Bahn heißt das Schraubengewinde, eine Windung heißt Schraubengang. Der in der Richtung der Achse gemessene Abstand zweier Schraubengänge wird als Ganghöhe der Schraube bezeichnet. Eine Schraube mit Hohlgewinde, die auf eine andere aufgeschraubt werden kann, wird Schraubenmutter genannt.

Fig. 63.

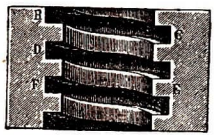


Fig. 64.

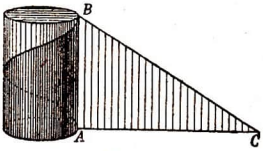


Fig. 65.

Jede Schraube besitzt einen Schraubenkopf, durch den die Schraube bewegt werden kann. Dies geschieht entweder mit einem Schraubenzieher, der in eine Kerbe des Kopfes eingesetzt wird, oder durch einen Schraubenschlüssel, der auf den eckig geformten Kopf paßt.

Fig. 63 stellt eine Schraube, Fig. 64 die dazu passende Schraubenmutter dar. Aus Fig. 65 ist ersichtlich, wie eine Schraubenlinie dadurch entsteht, daß eine schiefe Ebene um eine Schraubenspindel herumgelegt wird. Die Ganghöhe der Schraube entspricht der Höhe der schiefen Ebene für eine Windung. Daraus ergibt sich:

Die Kraft, mit der der Schraubenkopf bewegt werden muß, verhält

sich zur Last, die auf die Schraubenspitze drückt, wie die Höhe des Schraubenganges zur Bahnlänge einer Windung.

Anwendung findet die Schraube als Befestigungsmittel, Schraubstock, Schraubenspindel in der Presse, der Werkbank, der Bremse usw.

4. Der Hebel und das Wellrad. Mit einer Holz- oder Eisenstange vermag man nicht nur Kräfte in der Richtung der Stange zu übertragen, sondern auch quer zu ihr, wenn die Stange um einen festen Punkt drehbar ist.

Maschinen, die vermöge ihrer starren Form Kräfte durch Drehbewegungen übertragen können, heißen Hebel.

Jede um eine Achse drehbare Stange oder überhaupt jeder beliebige um einen festen Punkt drehbare Körper stellt einen Hebel dar.

Der Hebel heißt einseitig, wenn Last und Kraft auf derselben Seite vom Drehpunkt angreifen, zweiseitig, wenn sie auf verschiedenen Seiten wirken.

Der Nußknacker oder das Messer der Brotschneidemaschine gehören zu den einseitigen, die Zange, die Schere, das Ruder zu den zweiseitigen Hebeln.

Gewöhnlich wirken die Last und die Kraft senkrecht zur Hebelstange, weil die Kräfte quer zu ihr übertragen werden sollen. Lassen wir die Last und Kraft stets senkrecht zum Hebel wirken, und prüfen wir, unter welchen Umständen die Last und die Kraft sich am Hebel das Gleichgewicht halten, dann ergibt sich, daß dafür maßgebend ist, wie weit der Angriffspunkt der Kraft und der Last vom Drehpunkt entfernt ist (Fig. 66).

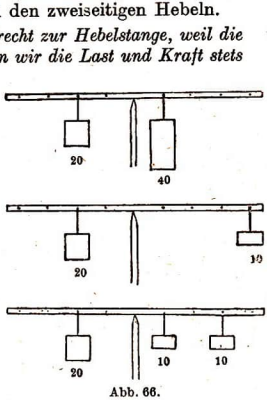


Abb. 66.

Wir bezeichnen den Abstand der Kraft vom Drehpunkt als Kraftarm, den Abstand der Last vom Drehpunkt als Lastarm.

Aus den Versuchen läßt sich das einfache Gesetz erkennen:

Am Hebel herrscht Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie der Lastarm zum Kraftarm.

Bezeichnen wir die Kraft mit P, die Last mit Q, den Kraftarm mit p und den Lastarm mit q, so können wir das Hebelgesetz auch so aussprechen:

$$\text{Kraft} \cdot \text{Kraftarm} = \text{Last} \cdot \text{Lastarm}$$

$$\boxed{P \cdot p = Q \cdot q}.$$

Scheinbar gilt dieses Gesetz nicht mehr, wenn der Hebel nicht geradlinig ist, oder wenn Last und Kraft in beliebigen Richtungen gegen den Hebel wirken. Stellen wir an einem Hebel, wie ihn Fig. 67 *darstellt, mit Kräften Versuche an, die in beliebiger Richtung wirken, so ergibt sich, daß auch in allen diesen Fällen das Hebelgesetz gilt, wenn wir unter Kraftarm und Lastarm den senkrechten Ab-*

stand des Drehpunktes von der Richtung der Kraft bzw. der Last verstehen.

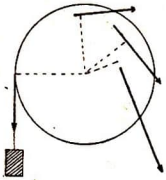


Fig. 67.

Das Produkt aus einer Kraft und ihrem senkrechten Abstand vom Drehpunkt bezeichnen wir als Drehmoment[1]).

Unter Verwendung dieses Begriffes läßt sich das Hebelgesetz ganz allgemein in der Form aussprechen:

An einem Hebel herrscht Gleichgewicht, wenn das Drehmoment der Last gleich dem Drehmoment der Kraft ist.

Vergleichen wir die Wege der Kraft und der Last, so findet man, daß sie proportional dem Kraft- und Lastarm sind. Also gilt auch beim Hebel:

Die Arbeit auf seiten der Last ist gleich der Arbeit auf seiten der Kraft.

Eine besondere Form des Hebels ist das Wellrad (Fig. 68). Es besteht aus einem zylindrischen Körper, auf dem sich ein Seil aufrollt, das die Last trägt, und einer Kurbel, an der die Kraft drehend wirkt. Der Hebelarm der Last ist der Radius des Zylinders oder der Welle, der Hebelarm der Kraft die Länge der Kurbel.

Fig. 68.

An die Stelle der Kurbel kann auch ein Rad treten, das mit der Welle fest verbunden ist.

Oft ist der Kranz dieses Rades gezahnt. Wir haben dann ein Zahnrad, das zusammen mit der Achse, auf der es festsitzt, ein Wellrad bildet.

5. Die goldene Regel der Mechanik. Ausnahmslos ergibt sich für alle Maschinen folgendes:

Durch eine Maschine können Angriffspunkt, Richtung und Größe einer Kraft verändert werden.

Nie kann aber durch eine Maschine die Arbeit, die eine Kraft leisten soll, verringert werden. Die Arbeit auf seiten der Kraft ist stets gleich der Arbeit auf seiten der Last.

Maschinen sind nur Arbeitsumformer.

In anderer Fassung heißt dieses Gesetz:

Was an Kraft gewonnen wird, geht an Weg verloren.

In dieser Form führt es den Namen die goldene Regel der Mechanik.

§ 15. Verwendung der einfachen Maschinen in der Technik

1. Das Fachwerk. Die Stange vermag Kräfte nur deshalb zu übertragen, weil sie eine starre Gestalt hat. Der größte Baumstamm oder die längste eiserne Schiene ist aber nicht lang genug, um für alle Aufgaben auszureichen, die die

1) movere = bewegen.

Technik zu lösen hat. Brückenbogen und Pfeiler werden in Längen bis zu mehreren hundert Metern aus einzelnen Stangen und Schienen gebaut, so daß das Ganze ein einziger starrer Körper ist.

Man nennt ein starres Gerüst, das aus Balken und Streben besteht, ein Fachwerk (Fig. 69).

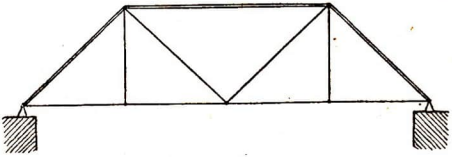


Fig. 69.

In einem Fachwerk sind die Balken und Streben nicht in willkürlicher Richtung angebracht, sondern so, daß sie alle Kräfte, die an der starren Form des Fachwerks angreifen, ihrer Richtung nach richtig in sich aufnehmen. Ein Teil der Balken hat einen Zug, ein anderer einen Druck in seiner Längsrichtung auszuhalten. Nach der Stärke dieses Zuges und Druckes ist die Dicke der Balken und Streben zu wählen.

Die Aufgabe des Technikers besteht darin, in jedem Falle mit möglichst wenig Material möglichst starre und feste Formen zu schaffen.

Fig. 69 gibt ein Beispiel für einen Fachwerkbrückenbogen. Die auf Zug beanspruchten Stäbe sind einfach, die auf Druck beanspruchten Stäbe doppelt gezeichnet. Die aus dem Gewicht des Brückenbogens und der auf der Brücke befindlichen Last bestehenden Kräfte werden auf diese Weise aufgefangen, ohne daß die starre Form des Brückenbogens sich wesentlich ändert.

2. Kraftübertragung bei Drehbewegungen. Die krafterzeugenden Maschinen (Dampfmaschine, Dampfturbine, Wasserturbine, Explosionsmotor, elektrische Maschinen) stimmen alle darin überein, daß sie Arbeit durch drehende Bewegung leisten. Die Arbeitsleistung des Motors wird dadurch erst nutzbar gemacht, daß sie vom Motor auf die Werkmaschine übertragen wird.

Die Übertragung erfolgt meist durch Riemen, die als endloses Band von der Riemenscheibe der krafterzeugenden Maschine zur Riemenscheibe der Werkmaschine laufen. Durch die Reibung des Riemens auf der Riemenscheibe wird hier die Kraft übertragen. Je nach dem Verhältnis, in dem die Durchmesser dieser Riemenscheiben stehen, läuft die Werkmaschine mit größerer oder geringerer Umlaufzahl pro Sekunde als die Antriebsmaschine (Fig. 70).

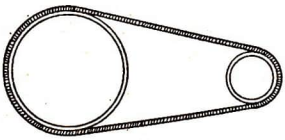


Fig. 70.

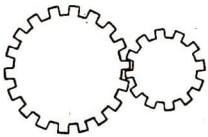


Fig. 71.

Sind die beiden Räder, zwischen denen die Kraft übertragen werden soll, gezahnt, so kann die Übertragung dadurch erfolgen, daß die Räderzähne direkt

ineinandergreifen, oder es kann die Übertragung durch eine Kette wie beim Fahrrad erfolgen (Fig. 71).

In diesen Fällen müssen die Achsen der Maschine parallel zueinander liegen. Soll z. B. eine Maschine mit horizontaler Achse (Mühlrad) eine Werkmaschine mit vertikaler Achse (Mühlstein) in Bewegung treten, so kann dies durch Zahnradübertragung nach Fig. 72 geschehen.

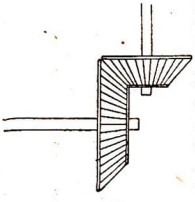


Fig. 72.

Die Übertragung der Kraft von der krafterzeugenden Maschine auf die kraftverbrauchende Maschine kann aber auch in der Weise stattfinden, daß beide Maschinen dieselbe Achse besitzen. So werden meist Turbinen mit Maschinen, die elektrischen Strom erzeugen, auf eine gemeinsame Achse gebaut. Solche Übertragung bezeichnet man als direkte Koppelung.

Diese Übertragungen erfolgen alle nach dem Hebelgesetz.

3. Umwandlung von Längsbewegung in Drehbewegung. Fast alle durch Maschinen geleistete Arbeit wird von der krafterzeugenden Maschine durch Drehbewegung auf die Werkmaschine übertragen. Es erzeugen aber gerade sehr wichtige krafterzeugende Maschinen die Arbeit zunächst nicht in der Form der Drehbewegung, sondern der Längsbewegung. Bei der Lokomotive z. B. wird die Kraft durch die Bewegung des Kolbens im Zylinder erzeugt. Der Kolben bewegt sich in gerader Richtung hin und her. Diese Bewegung muß in eine Drehbewegung umgewandelt werden. Ebenso ist es beim Explosionsmotor.

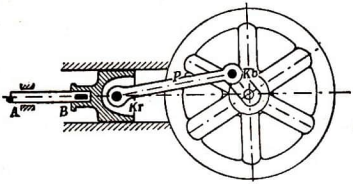


Fig. 73.

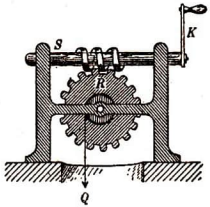


Fig. 74.

Die Umwandlung geschieht durch Kreuzkopf *Kr*, Schubstange *P* und Kurbel *Kb* (Fig. 73). Die Kraft wird von der Kolbenstange *A B* über das Gelenk *Kr* auf die Schubstange übertragen, die die Kurbel als Hebel in Bewegung setzt. Die Kraft wirkt nicht immer senkrecht zum Hebelarm. Die Übertragung der Arbeit des Kolbens auf die Welle ist daher weniger günstig als bei Maschinen, die nur Drehbewegungen ausführen.

Eine Form der Kraftübertragung, die oft da angewandt wird, wo kleine Kräfte große Wirkungen ausüben sollen, ist die Übertragung durch eine endlose Schraube, wie sie Fig. 74 darstellt. Bei jeder Umdrehung der Schraube rückt das Zahnrad um einen Zahn weiter. Die Schraube selbst heißt endlos, weil sie an ihrem Orte bleibt und sich dauernd in derselben Richtung bewegen kann.

4. Umwandlung von Drehbewegung in Längsbewegung. Das wichtigste Problem, bei dem es sich um Umwandlung von Drehbewegung in Längsbewegung handelt, ist der Transport von Körpern von einer Stelle nach einer anderen.

Handelt es sich um Transport auf einer festen Bahn, so dient das Rad als Laufrad zur Umwandlung, z. B. bei allen Waagen.

Gilt es, eine Last in einer Flüssigkeit oder in der Luft vorwärts zu bringen, so geschieht dies mit der Schraube oder dem Propeller. Beide wirken ähnlich (Fig. 75 u. 76). Die schräg stehenden Schaufeln pressen das Wasser hauptsächlich nach hinten. Dieses übt einen Gegendruck auf die Schraube aus und verleiht so dem Schiff, in dem die Schraube eingebaut ist, einen Antrieb nach vorn. Der rascher rotierende Propeller wirkt ähnlich auf die Luft. Seine Schaufeln sind außen weniger als innen verwunden.

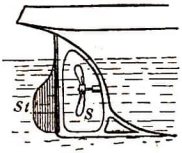


Fig. 75.

Fig. 76.

§ 16. Verwendung der einfachen Maschinen als Meßinstrumente

1. Die gleicharmige Waage. Waagen, mit denen man genaue Messungen ausführen will, müssen gleicharmig sein. Waagschale und Waagebalken hängen in Schneiden, wie Fig. 4 angibt. Am Waagebalken ist ein Zeiger befestigt, der auf einer Skala spielt. Bis zu hundertstel Gramm kann man mit Gewichten wägen. Gewichtsunterschiede von einigen Milligramm bestimmt man dadurch, daß man Reitergewichte auf den einen Waagebalken in verschiedenen Abständen setzt.

2. Die ungleicharmigen Waagen. Zur schnellen Bestimmung des Gewichtes sind die ungleicharmigen Waagen geeigneter. Die Genauigkeit der Bestimmung ist allerdings geringer.

Die Marktwaage (Fig. 77) besteht aus einem ungleicharmigen Hebel, an dessen einem Arm die Last hängt,

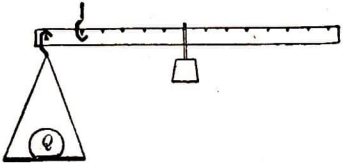


Fig. 77.

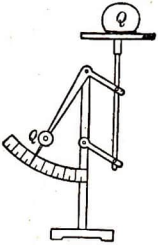


Fig. 78.

und auf dessen anderem Arm ein Laufgewicht verschiebbar ist. Auf diesem Hebelarm sind Marken eingepreßt, die anzeigen, wie schwer die Last ist, wenn das Laufgewicht an dieser Stelle die Last im Gleichgewicht hält.

Die Briefwaage (Fig. 78) beruht auf derselben Wirkungsweise. Bei ihr ist der Hebel ein Winkelhebel. Die Waage muß nach einer gleicharmigen Waage geeicht sein.

3. Die Dezimalwaage. Die Dezimalwaage (Fig. 79) besteht aus einem ungleicharmigen Hebel GB, der in G eine Waagschale trägt, und an dessen anderem Arm in A und B zwei Stangen in Gelenken befestigt sind. Die Waagschale für die Last besteht aus einer Platte CD, die groß genug ist, um die Last aufzunehmen. Diese Platte wird gehalten durch die Stange AC in C und durch eine Schneide in D, die auf einer Hebelstange EF ruht, die ihrerseits wieder in F auf einer Schneide auf dem Boden und in E an der Stange BE befestigt ist. Die Last L drückt teils auf C, teils auf D. Diese in C und D wirkenden Kräfte P und Q sind in ihrer Größe davon abhängig, ob die Last L näher an C oder an D liegt. Zusammen sind aber P und Q stets gleich L. Der Hebel EF ist durch die Schneide unter D in demselben Verhältnis eingeteilt wie der Waagebalken OB durch A.

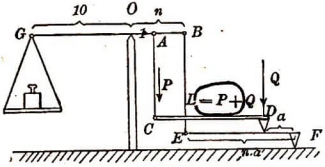


Fig. 79.

Beispiel: Es sei $L = 90$ kg, $P = 30$ kg, $Q = 60$ kg, $FD = 8$, $FE = 40$, $OA = 1$, $OB = 5$ cm. Q drückt auf die Schneide D mit 60, auf E bzw. B mit 12 und in A dann mit $12 \cdot 5 = 60$ kg. P drückt auf C bzw. in A mit der Kraft 30 kg nach unten. Die ganze Last L drückt also auf den rechten Waagebalken mit der Kraft 90 kg am Hebelarm 1. Dann braucht links am Hebelarm *10* nur eine Kraft von 9 kg zu wirken. Die Last L wird also durch den 10. Teil ihres Gewichtes links im Gleichgewicht gehalten. Das gilt auch für andere Fälle. Stets ist das Gewicht links gleich dem 10. Teil der Last. Daher der Name Dezimalwaage.

[Allgemein: P wirkt in C bzw. A am Hebelarm *1*, Q wirkt in D am Hebelarm a. Die gleiche Kraft übt in E am Hebelarm na die Kraft Q/n aus. Diese greift vermittels der Stange EB in B am Hebelarm n an. Liegt auf der linken Waagschale das Gewicht g, so wirken am Waagebalken folgende Drehmomente: Rechtsdrehend P am Hebelarm *1* und Q/n am Hebelarm n, linksdrehend g am Hebelarm *10*. Diese müssen im Falle des Gleichgewichtes gleich groß sein, also

$$g \cdot 10 = P \cdot 1 + \frac{Q}{n} \cdot n, \qquad g \cdot 10 = P + Q, \qquad g \cdot 10 = L, \qquad g = \frac{L}{10},$$

d. h. das Gewicht auf der Waagschale G ist stets der zehnte Teil der Last.]

Wird der linke Hebelarm der Waagschale gleich 100 gemacht, so bekommt man eine Waage, bei der die Waagschale nur den hundertsten Teil der Last aufzunehmen braucht, damit Gleichgewicht hergestellt wird (Zentesimalwaage).

4. Meßinstrumente für kleine Längen. Im Mikrometer (Fig. 2) dient eine Schraube dazu, kleine Strecken genau zu messen. Ähnlich wirkt der Fühlhebel, der die Form einer Zange besitzt. Der zu messende Gegenstand wird zwischen die Enden der kurzen Hebelarme gebracht, die längeren zeigen dann auf einem Maßstab die Dicke an.

§ 17. Übertragung der Kraft durch Flüssigkeiten und Gase

1. Die hydraulische Presse. Zur Übertragung sehr großer Kräfte, wie sie in der Schwerindustrie zum Biegen von Stahlplatten oder zum Schmieden von Stahlblöcken nötig sind, reicht die Festigkeit eines Hebels nicht aus. Zweckdienlich erweist sich dafür die Eigenschaft der Flüssigkeiten, den Druck nach allen Seiten gleich gut fortzuleiten, und ferner die Tatsache, daß der Druck einer Flüssigkeit auf die Gefäßwände proportional der Größe der gedrückten Fläche ist.

Eine Maschine, die auf diesen Grundgedanken beruhend Kräfte überträgt, ist die hydraulische Presse (Fig. 80). Sie besteht aus einem engen und einem weiten Zylinder mit starken Wänden, in denen Kolben beweglich sind, und einem starkwandigen Rohr, das diese Zylinder verbindet. Zylinder und Rohr sind mit einer Flüssigkeit angefüllt. Ist der Querschnitt des Kolbens im engen Zylinder q, und drückt auf diesen Kolben die Kraft p, so wird in der Flüssigkeit ein Druck fortgepflanzt, der auf jedes cm^2 die Kraft p/q ausübt. Daher wird der Kolben im weiten Zylinder, der den Querschnitt Q besitzt, mit der Kraft

$$P = p \cdot \frac{Q}{q}$$

gehoben. Ist z. B. $p = 1\,kg$ und $q = 1\,cm^2$ und $Q = 100\,cm^2$, so ist die Kraft $P = 100\,kg$.

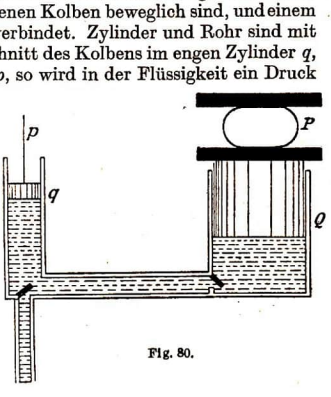


Fig. 80.

Bei der hydraulischen Presse wird die Kraft im Verhältnis der Kolbenquerschnitte vergrößert.

Auch bei dieser Maschine wird keine Arbeit erspart. Beim einmaligen Senken des Kolbens im engen Zylinder rückt der Kolben im weiten Zylinder nur sehr wenig vorwärts. Soll er mehr gehoben werden, so muß der Kolben im engen Zylinder wiederholt Flüssigkeiten in den weiten Zylinder pressen. Es sind daher in der Presse noch zwei Ventile angebracht, eines im weiten Zylinder, das verhindert, daß Flüssigkeit zurückströmt, und eines im engen Zylinder, das gestattet, Flüssigkeit einzusaugen, wenn sich der Kolben hebt. Die Kolbenwege verhalten sich umgekehrt wie ihre Querschnitte zueinander. Die hydraulische Presse wirkt also wie ein Hebel. Sie ist aber viel leistungsfähiger, weil sie nur von der Festigkeit der Wände abhängig ist, die beliebig stark gemacht werden können.

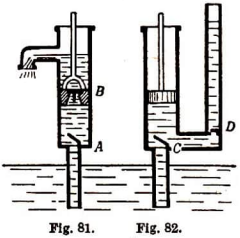


Fig. 81. Fig. 82.

2. Die Pumpen. Zum Heben von Flüssigkeiten bedient man sich der Pumpen. Es seien hier zunächst nur zwei Arten der Kolbenpumpen besprochen.

a) Die Hubpumpe. Sie besteht aus einem Zylinder, in dem ein Kolben luftdicht beweglich

ist. An dem Zylinder sitzt das Steigrohr, das in das zu hebende Wasser eintaucht (Fig. 81). Ziehen wir den Kolben in die Höhe, so wird die Luft unter dem Kolben verdünnt, der Luftdruck geringer, und das Wasser strömt durch das Steigrohr in den Zylinder. Geht der Kolben dann zurück, so verhindert das Ventil *A* das Wasser daran, im Steigrohr wieder hinabzusinken, und das Ventil *B* im Kolben gestattet dem Wasser, über den Kolben zu treten. Wird der Kolben von neuem gehoben, so fließt das Wasser über dem Kolben ab, da sich das Ventil *B* schließt, und neues Wasser wird gleichzeitig in den Zylinder gesaugt.

Die Hubpumpe ist damit eine Maschine, bei der die im Zylinder verdünnte Luft als Mittelskörper wirkt. Da man aber durch Luftverdünnung keine größeren Druckkräfte erzielen kann, als dem Luftdruck der Atmosphäre entspricht, so kann das Wasser im Steigrohr auch nicht höher gehoben werden, als es in einem Barometer steht, d. h. etwa 10 m hoch. Praktisch hebt die Hubpumpe das Wasser aber nur 5—7 m hoch.

b) Die Druckpumpe. Bei der Druckpumpe (Fig. 82) ist das Ausflußrohr unterhalb des Kolbens angebracht. Geht der Kolben in die Höhe, so ist das Ventil *D* geschlossen, und das Wasser strömt durch *C* in den Zylinder. Geht der Kolben abwärts, so ist *C* geschlossen und *D* offen, das Wasser steigt in dem Druckrohr, das zugleich Ausflußrohr der Pumpe ist.

Die Druckpumpe ist damit eine Maschine, in der der Mittelskörper zunächst aus verdünnter Luft besteht. An die Stelle der Luft tritt allmählich das Wasser. Dadurch ändert sich aber nichts an der Wirkungsweise der Pumpe. Durch Saugen wird das Wasser in den Zylinder gezogen und durch Zusammenpressen in die Höhe gedrückt. Soweit die Festigkeit des Baustoffes reicht, kann man mit der Druckpumpe Wasser in beliebige Höhen heben. Sie darf aber nur 5—7 m über dem Waserspiegel stehen, weil im Saugrohr das Wasser durch Luftverdünnung gehoben wird.

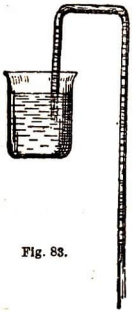


Fig. 83.

3. Die Heber. In einer gewissen Beziehung zum Hebel steht auch der Heber. Fig. 83 stellt den Saugheber dar. Er besteht aus einer U-förmig gebogenen Röhre, durch welche das Wasser, wie die Figur andeutet, strömt und zwar so lange, wie die Wassersäule im äußeren Schenkel länger als im inneren Schenkel, von der Flüssigkeitsoberfläche ab gemessen, ist.

Fig. 84.

4. Der Windkessel. Aus einem Gefäß, wie es Fig. 84 angibt, strömt die Flüssigkeit aus, wenn man die Luft über dem Wasser der Flasche komprimiert, indem man hineinbläst. Gefäße, in denen die Luft komprimiert wird, damit die verdichtete Luft vermöge des großen Druckes, den sie ausübt, Arbeit leistet, nennt man Druckwindkessel. Sie finden überall da Anwendung, wo an Stelle der stoßweise wirkenden Pumpen eine stetig wirkende Kraft die Flüssigkeit bewegen soll.

Preßluft als Arbeitsquelle wird außerdem vielfach zum Betrieb von rasch arbeitenden Bohrern, Hämmern, Meißeln angewendet. Sie ist sehr leicht in einem dickwandigen Schlauch an jede beliebige Arbeitsstelle zu leiten, und die Werkzeuge, die sie betreibt, sind verhältnismäßig leicht und handlich.

§ 18. Geschichtliche Entwicklung

Bei den ältesten Völkern finden wir bereits Maschinen, mit denen die Kraft des menschlichen Armes vervielfältigt worden ist. Die Ägypter kannten Hebel, Rolle und schiefe Ebene. Sie haben gewaltige Bauwerke durch Zusammenwirken von Tausenden von Arbeitern errichtet. Ähnlich ist es bei den übrigen alten Kulturvölkern gewesen.

Eine bewußte Fortentwicklung hat das Maschinenwesen erst durch Archimedes (287—212 v. Chr.) in Syrakus erfahren. Er hat die grundlegende Bedeutung des Hebelgesetzes erkannt und ausgesprochen. Er hat Flaschenzüge konstruiert, mit denen man Schiffe vom Stapel ziehen konnte, er hat Schraube und Wellrad angewandt und durch kluge Zusammenstellung von einfachen Maschinen Katapulte, Balliste und Krane konstruiert, die seine Vaterstadt zur Verteidigung wirksam gebraucht hat. Mag vielleicht auch vieles ihm zugeschrieben werden, was er nicht selbst erfunden hat, so darf man doch annehmen, daß in dem zweiten Jahrhundert v. Chr. in der damaligen Kulturwelt sich eine technische Entwicklung bemerkbar gemacht hat, deren Zentrum 250 v. Chr. der Westen (Syrakus) und etwas später, etwa um 100 v. Chr., der Osten (Alexandria in Ägypten) war. Heron, Ktesibios und Philon haben in Alexandrien staunenerregende mechanische Kunstwerke und Apparate, die mit Wasser und Luft betrieben wurden, erbaut. Windkessel und Pumpen führen in diese Zeiten zurück.

Während des Mittelalters sind keine bedeutsamen Fortschritte geschehen. Erst im 15. und 16. Jahrhundert regte sich das Interesse für die Maschinen wieder bei hervorragenden Gelehrten. Einen gewissen Abschluß fand die Entwicklung bei Galilei, der die goldene Regel der Mechanik in der Form aussprach: Was an Leichtigkeit gewonnen wird, geht an Weg, Zeit und Langsamkeit verloren. Er hat damit das Gesetz, das die arbeitsumformenden Maschinen beherrscht, formuliert.

Nicht zum befriedigenden Abschluß war aber in dieser Zeit der Wunsch nach krafterzeugenden Maschinen gelangt. Als sie im 19. Jahrhundert vielgestaltig eingeführt waren, erfuhr auch die Ausbildung der hier besprochenen arbeitsumformenden Maschinen eine weitere Förderung. Wenn man die Zierlichkeit und Festigkeit unserer heutigen Maschinenteile mit denen früherer Zeiten vergleicht, dann gewahrt man einen ähnlichen Fortschritt wie bei den Hochbauten, die von den massiven gewaltigen Pyramidenbauten der Ägypter über die Gewölbebauten der Römer, die schlanken gotischen Pfeiler und Träger des Mittelalters zu den schwindelerregenden Gitterbauten einer modernen Brücke, einer Helling oder eines Antennenmastes führen.

IV. Krafterzeugende Maschinen

§ 19. Wasserkraftmaschinen, Windmotore

Wir haben gesehen, daß Kräfte ihren Ursprung im menschlichen oder tierischen Muskel oder im Ausdehnungsbestreben eines erwärmten festen, flüssigen oder gasförmigen Körpers oder in dem Anprall eines bewegten Körpers finden können. Menschliche und tierische Kräfte reichen aber für die Arbeitsleistungen, die die moderne Industrie fordert, nicht aus. Daher muß das Augenmerk darauf gerichtet werden, aus den anderen Kraftquellen, die die Natur bietet, Kraft zu schöpfen. Die Maschinen, die dies vollbringen, nennen wir krafterzeugende Maschinen oder kurz Kraftmaschinen.

Kraftquellen, aus denen wir Arbeit gewinnen können, sind in erster Linie das fließende Wasser, der Wind und die Ausdehnung durch Erwärmung.

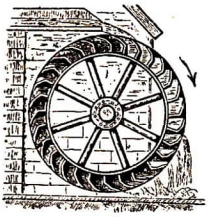


Fig. 85.

1. Wasserräder. Als Mühlrad steht das Wasserrad seit vielen Jahrhunderten im Dienste der Menschheit. Wird das Wasser (Fig. 85) in Mulden eines großen Rades geleitet, so wirkt die einseitige Belastung drehend auf das Rad. Man nennt diese Form des Wasserrades oberschlächtig. Sie wird verwendet, wenn wenig Wasser aber großes Gefälle zur Verfügung steht.

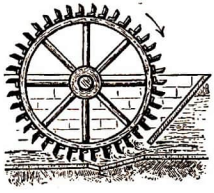


Fig. 86.

Wirkt der Druck des strömenden Wassers bewegend auf das Rad (Fig. 86), so heißt es unterschlächtiges Wasserrad. Große Wassermengen bei geringem Gefälle sind erforderlich. Am wirtschaftlichsten arbeitet das mittelschlächtige Wasserrad, das die Vorteile beider Formen ausnutzt.

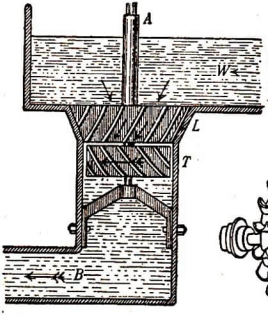


Fig. 87.

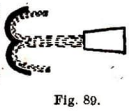


Fig. 89.

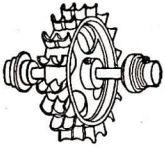


Fig. 88.

2. Die Wasserturbine. Weit besser als diese alten Formen der Wasserkraftmaschinen nutzen die modernen Maschinen, die wir Turbinen nennen, die im strömenden Wasser vorhandene Arbeitsfähigkeit aus. Auch bei den Turbinen unterscheiden wir zwei Arten:

a) die Vollturbine. Sie besteht aus einem weiten Rohr, welches vollständig von Wasser angefüllt wird, das von oben in die Turbine fließt. In diesem

Rohr ist ein festes Schaufelrad, das Leitrad L, angebracht, welches das Wasser auf die Schaufeln eines zweiten beweglichen Rades T leitet (Fig. 87). Dieses Rad T, Laufrad genannt, setzt sich unter dem Druck des strömenden Wassers in Bewegung und treibt eine Welle A, von der aus die Arbeit zur Verbrauchsstelle geleitet wird.

Je höher das Gefälle und die Menge des Wassers ist, desto größer ist die Leistung der Turbine. Die Vollturbine findet da Verwendung, wo große Wassermengen und mehr oder weniger starkes Gefälle vorhanden sind, also an Talsperren, an Wasserfällen oder im Gebirge überhaupt.

b) Die Freistrahlturbine. Bei dieser Turbine strömt das Wasser aus Düsen in einem Strahl gegen die Schaufeln (Fig. 88, 89), die auf einem Radkranz sitzen. Die Form der Schaufeln ist so gewählt, daß die im Strahl vorhandene Stoßkraft voll ausgenutzt wird. Diese Form der Turbine findet sowohl in großen als auch in kleinen Kraftanlagen Verwendung. Sie erfordert stets großes Gefälle und besitzt den Vorzug, daß sich ihre Arbeitsleistung nach Bedarf leicht regeln läßt, indem man einige Düsen außer Wirkung setzt oder öffnet.

3. Der Windmotor. Wie das strömende Wasser, so kann auch der Wind, die strömende Luft, zur Kraftquelle werden. Läßt man den Wind auf Schaufeln oder Flügel treffen, die, wie es von dem Windmühlenrad allgemein bekannt ist, schräg auf einem Radkranz sitzen, so bewegt sich das Rad unter dem Druck, den die Flügel erfahren. So kann die Kraft des Windes zum Betreiben von Mühlen oder von Wasserpumpen benutzt werden. Man findet die Windmotore fast nur im Flachland, denn dort sind Wasserkraftmaschinen nicht möglich, weil das Wasser nur langsam fließt, und außerdem weht der Wind im Flachland meist stärker und stetiger, weil er weniger als im Gebirge gehemmt wird.

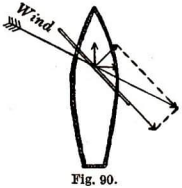


Fig. 90.

Ein Windmotor ist auch das Segel. Der Druck des Windes auf die Segelleinwand wirkt bewegend auf das Schiff, und so leistet der Wind Arbeit. In gewissem Sinne kann ein Segelschiff sogar gegen den Wind fahren. Fig. 90 zeigt, wie ein Schiff von Wind, der schräg von vorn kommt, immer noch einen Bewegungsantrieb nach vorwärts erfährt.

§ 20. Dampfmaschinen

Wir haben gesehen, daß alle Körper bestrebt sind, sich auszudehnen, wenn sie erwärmt werden. Auf alle Körper, die sie an der Ausdehnung hindern, üben sie dann einen starken Druck aus. Ein erwärmter Körper leistet also Arbeit, wenn er andere Körper bewegt, indem er sich ausdehnt.

Will man möglichst viel Arbeit aus dieser Quelle gewinnen, so muß man Körper wählen, die eine große Kraft ausüben und die gleichzeitig sich auch um eine große Strecke ausdehnen, damit sowohl Kraft als auch Weg möglichst groß werden. Besonders geeignet für diesen Zweck sind die Gase. Denn Gase dehnen sich im Vergleich zu festen und flüssigen Körpern bei einer bestimmten Temperaturerhöhung viel stärker aus.

Unter den gasförmigen Körpern sind die Dämpfe wieder am geeignetsten, denn ein gesättigter Dampf gewinnt mit steigender Temperatur sehr bald einen großen Druck, wie wir beim Wasserdampf (§ 11) gesehen haben. Im besonderen ist stark erhitzter Wasserdampf vorzüglich befähigt, Arbeit zu leisten. Die Maschine, in der der Wasserdampf die Arbeit erzeugt, heißt kurz Dampfmaschine.

Wir haben heute zwei Formen der Dampfmaschine: die Kolbendampfmaschine und die Dampfturbine.

Zu jeder Dampfmaschine gehört eine Anlage, in der der Wasserdampf durch Erhitzen von Wasser erzeugt wird. Diese Anlage besteht aus der Feuerung und dem Dampfkessel.

1. Der Dampfkessel. Der Dampfkessel ist ein geschlossener eiserner Zylinder, den die Verbrennungsgase der Feuerung in Röhren durchstreichen. Der Kessel ist teilweise mit Wasser gefüllt. Der entwickelte Dampf sammelt sich in dem Dampfdom, einer Erweiterung des Kessels oberhalb des Wasserspiegels. Ein Sicherheitsventil, ein Manometer und ein Wasserstandsglas sind zur Überwachung der Verdampfung am Kessel angebracht. Der im Kessel entwickelte Dampf besitzt im allgemeinen zwischen 10 und 20 Atmosphären Druck (in besonderen Konstruktionen bis 225 Atm.). Kessel dieser Art nennt man Flammrohrkessel. Man kann auch statt der Heizgase das Wasser in die Röhren einschließen und die Flammen diese Röhren umspielen lassen. Dann nennt man den Kessel Wasserrohrkessel.

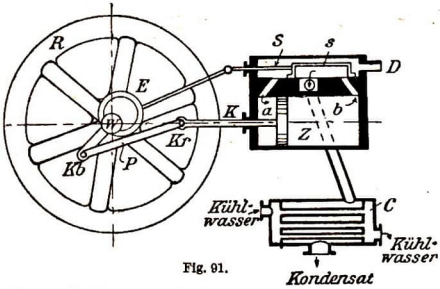


Fig. 91.

2. Die Kolbendampfmaschine. Durch das Rohr D (Fig. 91) strömt der Dampf zunächst in den Schieberkasten S. einen Raum, aus dem zum Zylinder Z zwei Öffnungen a und b führen. Ein beweglicher Schieber s regelt den Zutritt des Dampfes in den Zylinder, indem er abwechselnd die eine und die andere Öffnung verschließt. Dieser Schieber wird durch eine Stange bewegt, die mit einer auf der Welle der Maschine angebrachten exzentrischen Scheibe E verbunden ist. Der Dampf von hohem Druck, der in den linken Teil des Zylinders strömt, drückt den Kolben nach rechts. Durch die Kolbenstange K, den Kreuzkopf Kr, die Schubstange P und die Kurbel Kb bewirkt dieser Druck die Drehung der Welle W, auf der ein schweres Schwungrad R sitzt. Der Druck hört auf zu wirken, wenn der Kolben in seiner äußersten rechten Stellung angekommen ist, weil dann die Dampfzufuhr durch den Schieber unterbrochen ist. Denn inzwischen hat sich die exzentrische Scheibe weitergedreht. Dadurch ist der Schieber umgesteuert worden. Der Dampf tritt nun in den rechten Zylinderraum. Damit aber die Maschine aus dieser Stellung des Kolbens, die man den toten Punkt nennt, in demselben Drehungssinne weiterläuft, ist es nötig, daß der Kolben nicht in dieser

äußersten Stellung stehen bleibt, sondern sich etwas weiterbewegt. Dies wird durch das Schwungrad bewirkt. Der in den rechten Zylinderraum einströmende Dampf bewegt nun den Kolben bis zur äußersten linken Stellung vorwärts. Dort findet wieder Umsteuerung statt, und das Schwungrad hält die Bewegung auch hier über den toten Punkt hinaus aufrecht. Der Vorgang wiederholt sich.

Die Dampfmaschine ist also eine periodisch arbeitende Maschine. Daher muß der Dampf, der in dem einen Zylinderraum den Kolben vorwärts gedrückt hat, entweichen können, wenn der Kolben nach rückwärts gehen soll. Denn würde dieser Dampf nicht entfernt, so würde er einen großen Gegendruck auf den Kolben ausüben, und die Maschine könnte keine Arbeit leisten. In den Schieberkasten mündet daher ein Rohr r so, daß seine Öffnung durch den Schieber stets mit dem Teil des Zylinders verbunden ist, aus dem der Dampf entweichen soll. Mündet dieses Rohr in die freie Luft, so findet er beim Ausströmen keinen größeren Gegendruck als den Druck der Atmosphäre vor.

3. Der Kondensator. Man läßt den Dampf nicht mehr wie in früheren Zeiten in die Luft entweichen, sondern leitet ihn durch das Abdampfrohr in einen Behälter C, den Kondensator. Dort strömt der Dampf an die von Wasser gekühlten Wände des Behälters und wird flüssig. Der Dampfdruck erniedrigt sich dabei bis auf den Druck des Wasserdampfes bei der Temperatur, die im Kondensator herrscht. Dieser Druck ist selten höher als der fünfte Teil des Luftdruckes. Bei einer arbeitenden Maschine ist weder im Zylinder noch im Kondensator Luft, weil der Dampf sie verdrängt hat. Der Dampf strömt infolgedessen in den Kondensator noch heftiger als in die freie Luft, denn im Kondensator hat er fast gar keinen Gegendruck zu überwinden.

Der Kondensator ist ein sehr wesentlicher Teil der Dampfmaschine. Er gewährt nicht nur den Vorteil, daß er den Druck des Abdampfes stark vermindert, also den Gegendruck auf den Kolben verkleinert, sondern er ermöglicht auch den zu Wasser verdichteten Dampf (Kondensat) von neuem zur Kesselspeisung zu verwenden. Man erhält dadurch reines Kesselspeisewasser (Kesselstein!). Die an das Kühlwasser abgegebene Wärme kann zu Heizzwecken benutzt werden. Auf diese Weise werden sehr große Mengen Kohlen gespart.

4. Berechnung der Arbeitsleistung der Dampfmaschine. Wir nehmen an, aus dem Kessel ströme in den linken Teil des Zylinders bei äußerster linker Stellung des Kolbens Dampf von 10 Atmosphären Druck. Der Gegendruck im anderen Zylinderraum, der mit dem Kondensator verbunden ist, sei Null. Dann drückt der Dampf auf jedes cm^2 des Kolbenquerschnittes mit 10 kg. Hat der Kolben einen Querschnitt von 300 cm^2, so ist der Gesamtdruck 3000 kg. Bewegt sich der Kolben unter Einfluß dieser Kraft um die ganze Länge des Zylinders vorwärts, etwa 0,40 m, so ist die Arbeit auf diesem Wege

$$A = 3000 \text{ kg} \cdot 0{,}40 \text{ m} = 1200 \text{ mkg}.$$

Bewegt sich der Kolben in einer Sekunde zweimal hin und her, so wird im ganzen eine Arbeit geleistet, die beträgt

$$L = 4800 \text{ mkg je sec}.$$

Die Arbeit in der Sekunde nennen wir die Leistung und Leistungen mißt man in der Technik bei Maschinen meist in Pferdestärken. Da 1 PS = 75 mkg/sec ist, ergibt sich als die Leistung der Maschine $L = 64$ PS.

Diese Rechnung bezieht sich nur auf einen idealen Fall. Sie gibt annähernd die Größe der Leistung wieder. In Wirklichkeit ist sie geringer, weil durch Reibung der Maschinenteile aneinander viel Arbeit schon aufgebraucht wird.

5. Die Expansionsmaschine. Die Dampfmaschine verbraucht für jeden Hin- und Hergang des Kolbens soviel Dampf, wie der Zylinder bei dem jeweiligen Dampfdruck faßt. Bei sehr gut angelegter Feuerung können mit 1 kg bester Steinkohle praktisch etwa 7 bis 9 kg Dampf erzeugt werden. Die Dampfmaschine würde demnach wirtschaftlicher arbeiten, wenn man mit derselben Dampfmenge noch mehr Arbeit leisten könnte, als es in der eben beschriebenen Maschine geschieht.

Dies ist in folgender Weise möglich. Läßt man z. B. nur im ersten Viertel des Kolbenweges Dampf in den Zylinder strömen, so erspart man drei Viertel der Dampfmenge, die man oben gebraucht hat. Die Arbeit im ersten Viertel des Kolbenweges ist dieselbe wie vorher. In dem Augenblick, wo die weitere Dampfzufuhr abgesperrt wird, besitzt der Dampf noch den hohen Druck des Kessels. Der Dampf ist nun wie ein Gas bestrebt, sich weiter auszudehnen. Er wird also weiterhin auf den Kolben drücken, nur wird der Druck allmählich geringer, weil sich der Dampf ausdehnt. Wäre der Wasserdampf in seinem Verhalten genau einem Gase gleich, so würde der Druck bei der Ausdehnung auf das Vierfache auf den vierten Teil sinken. Durchschnittlich würde in dem oben erwähnten Beispiel der Druck auf den letzten drei Vierteln des Kolbenweges etwa 6 Atmosphären betragen, entsprechend dem allmählichen Sinken des Druckes von 10 auf etwa 2 Atmosphären. Die Arbeit, die dadurch geleistet wird, ist reiner Gewinn gegenüber dem obengenannten Falle. Eine solche Maschine kann also mit der gleichen Dampfmenge eine viel größere Arbeit leisten als die Maschine, die auf dem ganzen Wege mit vollem Dampf arbeitet. Wir nennen eine Maschine, die das Ausdehnungsbestreben des Wasserdampfes ausnutzt, indem sie nur auf einem Teil des Kolbenweges Volldampf einströmen läßt, eine Expansionsmaschine im Gegensatz zur Volldruckmaschine, bei der der Dampf aus dem Kessel auf dem ganzen Kolbenweg einströmt. Alle modernen Dampfmaschinen sind Expansionsmaschinen.

Große Dampfmaschinenanlagen nutzen die Expansion des Dampfes in mehreren Zylindern aus, deren Kolben immer größere Querschnitte haben, und bei denen der Dampf aus dem Zylinder mit engerem Querschnitt nicht in den Kondensator, sondern in den nächstgrößeren Zylinder usf. geleitet wird, bis er aus dem größten in den Kondensator tritt.

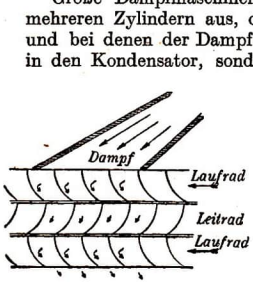


Fig. 92.

6. Die Dampfturbine. Läßt man Dampf von 15 Atmosphären in den Kondensator strömen, so nimmt er dabei eine sehr große Geschwindigkeit an. Wird ein solcher Dampfstrom durch eine Turbine geleitet, so übt der Dampf einen sehr großen Druck auf die Schaufeln des Laufrades aus. Man hat daher Maschinen gebaut, die in dieser Weise Arbeit erzeugen. Damit der Druck des Dampfes vollkommen ausgenutzt wird, sind in der Dampfturbine

sehr viele Lauf- und Leiträder hintereinander angeordnet, durch die der Dampf strömt. Fig. 92 gibt ein Schema einer Dampfturbine an. Die Dampfturbinen besitzen vor den Kolbendampfmaschinen den Vorzug einfacherer Bauart, ruhigen Ganges, geringen Platzbedarfs und größerer Nutzleistung.

§ 21. Explosionsmotore

Das Ausdehnungsbestreben eines Gases und sein Druck wachsen um so mehr, je höher die Temperatur ist, die das Gas besitzt. Sehr stark erhitzte Gase eignen sich deshalb ebenfalls zur Verwendung in Wärmekraftmaschinen.

Meist erzeugt man in den Maschinen die hohen Temperaturen dadurch, daß man ein explosibles Gasgemisch in einem Zylinder mit Kolben zur Entzündung bringt. Daher nennt man die Maschinen auch Explosionsmotore.

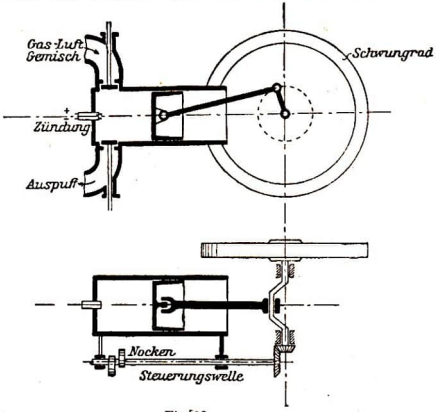


Fig. 93.

1. Der Viertaktmotor. Der Explosionsmotor besteht aus einem Zylinder (Fig. 93), in dem ein Kolben beweglich ist. Der Kolben wirkt durch die Schubstange auf die Welle, auf der ein Schwungrad sitzt. Soll die Maschine in Gang gebracht werden, so muß der Kolben durch Drehen der Welle (mittels einer aufgesetzten Kurbel) ausgezogen werden. Dabei wird durch ein Ventil, das am Boden des Zylinders sitzt, ein Gemisch aus Luft und Brennstoff, z. B. Leuchtgas, angesogen. Beim weiteren Drehen drückt der Kolben das Gasgemisch zusammen. In dem Augenblick, wo der Kolben das Gemisch am meisten zusammengedrückt hat und wieder umkehrt, findet durch eine Zündvorrichtung, die im Zylinder am Boden angebracht ist, die Zündung des explosiblen Gemenges statt. Die Gase verbrennen dann in dem Zylinder und erzeugen dabei eine Temperatur von 1300° bis 2000° C. Sie wirken infolgedessen auf den Kolben mit hohem Druck (30 bis 40 Atm.). Dieser fliegt ruckartig vorwärts. Das Schwungrad veranlaßt, daß er aus seiner äußersten Stellung wieder zurückgleitet. Dabei verdrängt der Kolben die verbrannten Gase aus dem Zylinder durch den Auspuff, der sich öffnet. Wird dann der Kolben wieder ausgezogen, so saugt er wieder Gasgemisch an, und das Spiel beginnt von neuem. Auf viermaligen Kolbenweg kommt nur ein Weg, auf dem der Kolben einen Antrieb erfährt. Deshalb bezeichnet man den hier beschriebenen Explosionsmotor auch als Viertaktmotor. Auspuff- und Gaseintrittsventil werden durch Stangen in Tätigkeit gesetzt, die

ihrerseits im richtigen Augenblick durch Wülste (Nocken), die auf der Steuerungswelle sitzen, angestoßen werden. Die Steuerungswelle macht nur einen Umlauf, während das Schwungrad zwei Umdrehungen macht.

2. Der Zweitaktmotor. Fig. 94 soll die Verhältnisse beim Zweitaktmotor veranschaulichen. Hier wird auf dem ersten Teil des Kolbenrückganges durch je eine Druckpumpe Luft und Brennstoff in den Zylinder gespritzt und auf dem weiteren Kolbenwege verdichtet. Unmittelbar nach der Umkehr des Kolbens wird das verdichtete Gemisch entzündet. Der Kolben fliegt unter dem starken Druck nach vorn. Nicht weit von der äußersten Stellung des Kolbens sind in der Zylinderwand Schlitze oder Öffnungen vorhanden, durch die die verbrannten Gase ausströmen können. Der Kolben braucht nur zurückzugehen, um wieder in gleicher Weise vorwärtsgeschnellt zu werden.

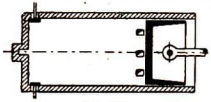


Fig. 94.

Hier handelt es sich also um einen Hin- und Hergang der Maschine bei jeder Periode. Man nennt daher den Motor Zweitaktmotor.

3. Betriebsstoff, Verwendung. Als Brennstoffe dienen Leuchtgas, Generatorgas oder auch Benzin, Benzol, Spiritus, die vergast werden. Bei den Dieselmotoren wird schweres Öl verbraucht, das in die im Zylinder zunächst auf 30 bis 40 Atm. verdichtete und dabei auf über 600° C erhitzte Luft gespritzt wird. Bei seinem Eintritt verbrennt es in dieser hohen Temperatur sofort.

Damit das Material bei den hohen Temperaturen, die im Zylinder erzeugt werden, möglichst wenig leidet, wird der Zylinder dauernd durch Wasser, das ihn umspült, gekühlt.

§ 22. Geschichtliche Entwicklung

Im Altertum war die Maschine im wesentlichen nur als Arbeitsumformer bekannt. Menschliche Hände und Tiere mußten die Leistungen vollbringen, die der Mensch erstrebte. Selbst das Segel hat für die Schiffahrt nicht die Bedeutung wie später gehabt.

Die älteste krafterzeugende Maschine mag wohl das Mühlrad gewesen sein. Als im 16. und 17. Jahrhundert das Interesse an naturwissenschaftlichen Lehren und an technischen Errungenschaften wuchs, beschäftigten sich viele Gelehrte und Handwerker damit, eine Maschine zu ersinnen, die von selbst dauernd Arbeit leistete. Man bezeichnete eine solche Maschine als ein perpetum mobile.[1]) Warum bei diesen Versuchen kein Erfolg sein konnte, werden wir im nächsten Abschnitt sehen. Aus diesem Bestreben läßt sich aber erkennen, daß ein starkes Bedürfnis nach Maschinen vorhanden war, die die menschliche und tierische Kraft entbehrlich machen sollten. So suchte man besonders nach Maschinen, die die Pumpen der Bergwerke treiben konnten.

Die Erfindung der Dampfmaschine ist das Werk verschiedener Gelehrten und Techniker. Sie nimmt ihren Ausgang von der Entdeckung des in Marburg

1) perpetuum = ununterbrochen, mobile = beweglich.

und Kassel lebenden französischen Kalvinisten Denis Papin, der 1690 den Dampfkochtopf erfand und eine Dampfmaschine konstruierte, mit der er ein Boot auf der Werra zu treiben versuchte. Zu einer brauchbaren Maschine wurde sein Modell aber erst in den Händen des englischen Eisenhändlers Newcomen, der 1705 eine Maschine erbaute, in der ein Kolben in einem Zylinder durch Dampfdruck gehoben wurde. Wurde dann Wasser in den mit Dampf gefüllten Zylinder gespritzt, so kondensierte sich der Dampf, und der Kolben wurde durch den Druck der äußeren Luft in den Kolben zurückgedrückt. Mit dieser Maschine konnte eine Pumpe getrieben werden.

Diese Art der Dampfmaschine fand einige Verbreitung. Im Jahre 1765 wurde dem Mechaniker der Universität Glasgow, James Watt, eine solche Maschine zur Reparatur übergeben. Er wurde dadurch angeregt, eine ganz neue Maschine zu ersinnen, bei der der Dampf von beiden Seiten auf den Kolben drückte. Er übertrug die Bewegung des Kolbens nicht auf einen Hebel wie Newcomen, sondern durch Schubstange und Kurbel auf eine Welle. Er ließ den Abdampf in einen Kondensator strömen. Kurz, er erfand alle wesentlichen Teile der heutigen Kolbendampfmaschine. Nach Überwindung mancher Schwierigkeit wurde aus der Maschine Watts eine Krafterzeugungsmaschine, die sich dann schnell überall Eingang verschaffte, wo starke Kräfte gebraucht wurden. Die Dampfmaschine hat den Anstoß zu der industriellen Entwicklung gegeben, die in unseren Tagen einen weiteren Anstoß durch die elektrischen Erfindungen bekommen hat.

Im Jahre 1807 ließ Fulton das erste Dampfschiff auf dem Hudson fahren. Die erste Eisenbahn fuhr 1830 zwischen Liverpool und Manchester. In Deutschland wurde 1835 die erste Eisenbahn in Betrieb genommen, die zwischen Nürnberg und Fürth gebaut war. Die ersten Schraubendampfer entstanden etwa um das Jahr 1840. Die Dampfturbine ist erst 1886 in brauchbarer Form erbaut worden.

Die Erfindung des Explosionsmotors führt bis in das Jahr 1867 zurück, wo die Ingenieure Otto und Langen in Deutz eine Motorenfabrik gründeten. Der erste Benzinmotor für Fahrzeuge ist von Daimler erfunden worden. Das erste Patent für einen Kraftwagen erhielt Benz im Jahr 1886. Die Erfindung des Pneumatik geht auf einen englischen Zahnarzt Dunlop zurück (1890).

V. Die Energie

§ 23. Energiequellen

Das Wort Energie bedeutet in der Physik etwas Ähnliches wie da z. B., wo wir es auf den Menschen anwenden. Ein Mensch heißt energisch, wenn er die Arbeit, die er sich vorgenommen hat, unbekümmert um Widerstände und Hindernisse durchführt. Auch in der Physik bezeichnet man mit Energie ein Arbeitsvermögen, und zwar die Arbeit, die in den Naturerscheinungen vorrätig ist und sich uns von selbst darbietet.

|| Energie ist Arbeitsvorrat oder Arbeitsvermögen.

Blicken wir auf die bisher besprochenen physikalischen Erscheinungen zurück, so erkennen wir (wenn wir menschliche und tierische Kräfte außer acht lassen) hauptsächlich zwei Gruppen von Naturerscheinungen, bei denen sich uns Arbeit von selbst zur Verfügung stellt, oder wie wir jetzt sagen können: zwei Quellen von Energie. Wir gewinnen Arbeit

a) aus Wasserkräften und Wind durch Wasserrad und Turbine,

b) aus der Verbrennungswärme der Kohle und anderer Brennstoffe, indem wir sie in der Dampfmaschine und im Explosionsmotor in mechanische Arbeit umwandeln.

Wir sprechen daher kurz von zwei Arten der Energie: mechanischer Energie und Wärmeenergie.

1. Mechanische Energie. Fragen wir nach den Naturerscheinungen, die durch ihren Ablauf uns mechanische Arbeit von selbst liefern können, so finden wir zunächst, daß jeder Körper, der sich auf der Erde von einem höher gelegenen nach einem niedriger gelegenen Ort bewegen kann, Arbeit leisten kann. Dies gilt in gleicher Weise von dem hochgehobenen Hammer, von dem Gewicht des Rammbärs, von dem Wasser, das in einem Bergsee gestaut ist usw. Arbeit wird in diesen Fällen erst dadurch geleistet, daß die Körper sich von selbst in Bewegung setzen und durch ihren Stoßdruck die Bewegung eines anderen Körpers veranlassen. So ist es beim Hammer, so beim Rammbär und so auch beim Wasser, das durch seinen Strömungsdruck das Mühlrad treibt.

Wollen wir aber den Hammer, den Rammbär oder das Wasser zum zweitenmal dieselbe Arbeit leisten lassen, so müssen wir die Körper vorher wieder in ihre Ausgangslage zurückbringen. Wir müssen nun Arbeit leisten, um sie wieder in die Höhe zu heben. Diese Arbeit läßt sich leicht feststellen. Ist das Gewicht des Körpers G und ist er um die vertikale Höhe h gefallen, so ist die Arbeit, die beim Emporheben geleistet werden muß,

$$A = G \cdot h \text{ mkg}.$$

Da damit der Anfangszustand wieder hergestellt ist, haben wir in dem Ausdruck $A = G \cdot h$ mkg das Maß für den Arbeitsvorrat, den der hochgehobene Hammer usw. hatte, also auch das Maß für die Energie des hochgelegenen Körpers. Wir nennen diese Form der Energie Energie der Lage und sprechen den Satz aus:

Ein Körper vom Gewichte G, der die Strecke h vertikal durchfallen kann, hat die Energie der Lage

$$\boxed{E = G \cdot h \text{ mkg}}.$$

Andere Formen der mechanischen Energie besitzt z. B. eine zusammengepreßte Spiralfeder oder ein komprimiertes Gas. Auch hier läßt sich die Energie durch die Arbeit messen, die aufgewendet werden mußte, um die Feder zu spannen und um das Gas zu komprimieren.

Auch ein in Bewegung befindlicher Körper kann Arbeit leisten. Wir nennen diese Form der Energie Energie der Bewegung und werden auf ihr Maß in § 35 zu sprechen kommen.

2. Wärmeenergie. Die Wärmemenge, die beim Verbrennen der gleichen Gewichtsmenge verschiedener brennbarer Stoffe entsteht, ist je nach der Art des Stoffes verschieden groß.

|| Unter Verbrennungswärme verstehen wir die Wärmemenge, die bei der Verbrennung von 1 kg eines Stoffes entsteht.

Die Verbrennungswärme beträgt bei:

Wasserstoff	35000 kcal,	Petroleum	12000 kcal,	Kohle	6—8000 kcal,
Leuchtgas ca.	9000 „	Spiritus	7000 „	Holz	3—4000 „

Die Tabelle zeigt, daß man z. B. durch Verbrennung von 2 kg Petroleum etwa ebensoviel Wärme erzeugen kann wie durch Verbrennen von 3—4 kg Kohle. Entsprechend muß sich dann die Menge des Dampfes verhalten, die im Dampfkessel erzeugt wird. Die Tabelle gibt also einen Vergleichsmaßstab für die Energie, die in den Brennstoffen vorhanden ist.

|| Wärmeenergie wird in kcal gemessen.

§ 24. Übertragung mechanischer Energie

In den meisten Fällen muß die Arbeit von der Stelle, an der sie aus einer Energiequelle gewonnen wird, zu der Stelle übertragen werden, wo sie verbraucht wird. Diese Übertragung geschieht für mechanische Arbeit durch die arbeitsumformenden Maschinen.

Wir haben oben gesehen, daß für die mechanischen Maschinen das Gesetz gilt: Die Arbeit auf seiten der Kraft ist gleich der Arbeit auf seiten der Last. Dieses Gesetz stellt den idealen Fall dar, der in der Praxis von den meisten Maschinen nur annähernd erfüllt wird. Denn es ist dabei nicht berücksichtigt, daß der Bewegung der Maschine noch Kräfte entgegenwirken, die wir unter dem Namen Reibung zusammenfassen.

Betrachten wir z. B. den Hebel. Der am linken Hebelarm wirkenden Kraft wirkt am rechten Hebelarm die Last entgegen. Sind diese Kräfte im Zustand der Ruhe im Gleichgewicht, so wird die Bewegung nicht schon durch die geringste Kraft eingeleitet, die auf seiten der Kraft dazu kommt, sondern erst durch eine Kraft, die mindestens gleich der Reibung ist, die der Hebel in seinem Drehpunkt erfährt. Da Arbeit nicht anders als durch Bewegung übertragen werden kann, wird praktisch beim Hebel immer die Arbeit auf seiten der bewegenden Kraft größer sein als die gewonnene Arbeit auf seiten der Last. Es geht also eine gewisse Arbeit, durch die Reibung verursacht, bei der Übertragung verloren.

Ähnlich ist es bei der schiefen Ebene und den anderen Maschinen.

Man kann die Reibung durch Schmiermittel, durch Kugellager, durch Räder usw. sehr gering machen, ganz vermeiden läßt sie sich aber in keinem Fall.

Man kann nun die Beobachtung machen, daß überall da, wo durch Reibung mechanische Arbeit bei der Übertragung verloren geht, Wärme auftritt, indem sich z. B. die Achsen und die Lager erwärmen. In Form von mechanischer Arbeit kann man diese verlorene Arbeit nicht wieder gewinnen.

Jede Übertragung mechanischer Energie ist mit Verlust an mechanischer Arbeit verbunden. Dieser Verlust ist durch Reibung in der übertragenden Maschine bedingt. An den Stellen, wo Reibung stattfindet, entwickelt sich Wärme.

§ 25. Übertragung von Wärmeenergie

Auch die Wärmeenergie muß von der Stelle, wo sie entsteht, dahin überführt werden, wo sie verbraucht wird, z. B. aus der glühenden Kohle in den Dampf. Es gibt drei Arten der Übertragung von Wärme.

1. Die Wärmeströmung. Von Wärmeströmung spricht man in den Fällen, wo die Wärme dadurch von einer Stelle zur anderen gebracht wird, daß der erwärmte Körper sich selbst dahin begibt. Die Zentralheizung, die warmen und kalten Meeresströmungen sind Beispiele dafür (Fig. 95).

Fig. 95.

Die Wärme der verbrennenden Kohle wird durch die strömenden Heizgase bis an die Wand des Dampfkessels, also durch Wärmeströmung, überführt.

2. Die Wärmeleitung. Wärme kann auch übertragen werden, indem sie sich in einem Körper von den Stellen höherer Temperatur nach den Stellen niedrigerer Temperatur ausbreitet. Dies nennen wir Wärmeleitung. Dabei finden keine Verschiebungen des erwärmten Stoffes statt. Stets kann nur der warme Körper zum kalten Körper Wärme leiten. Nie kühlt sich ein kalter Körper noch mehr ab, um einen wärmeren Körper durch die abgegebene Wärme noch mehr zu erhitzen.

Die Wärme fließt in einem Körper stets von Stellen höherer Temperatur nach Stellen niedrigerer Temperatur.

Gute Wärmeleiter sind die Metalle, z. B. Kupfer, Zink, Eisen usw., schlechte Wärmeleiter sind Haare, Pelz, Wolle, Federn, Asche, Stroh, Schnee, Glas, Porzellan, Holz und vor allem alle Gase.

Die an die Außenwand des Dampfkessels abgegebene Wärme der Heizgase wird durch Wärmeleitung dem Wasser zugeführt.

Fig. 96.

Ein Netz aus Messingdraht leitet die Wärme vorzüglich. Man benutzt es als Unterlage für Glasbehälter, die man erwärmen will, weil es die Hitze der Flamme gleichmäßig über den Boden des Gefäßes verteilt. Läßt man Leuchtgas durch die Gitter treten und entzündet es oberhalb, so schlägt die Flamme nicht nach unten durch. Bei der Sicherheitslampe (Fig. 96) des Bergmannes ist die Flamme mit einem engen, dichten Gitter umgeben. Gas kann in die Lampe nur durch das Gitter treten. Dringt explosibles Gasgemisch ein, so erfolgt die Entzündung im Innern. Das Gitter verteilt aber die entstandene Wärme und schützt die außen befindlichen Gase vor der Entzündung. Die Lampe erlischt bei der Explosion.

3. Die Wärmestrahlung. Wärme kann durch den luftleeren Raum weder durch Strömung noch durch Leitung dringen. Sie findet aber dennoch ihren Weg durch den luftleeren Raum. Diese Form der Übertragung von Wärmeenergie nennen wir Strahlung. In dieser Weise gelangt z. B. die Wärme von der Sonne zur Erde.

Auch bei der Übertragung von Wärmeenergie treten stets Verluste ein. Praktisch wird nie eine bestimmte Wärmemenge von einer Stelle zu einer anderen ohne die geringsten Verluste an Wärme geleitet werden können.

Jede Übertragung von Wärmeenergie ist mit Verlust von Wärme durch Leitung und Strahlung an den Stellen verbunden, an denen ungleichwarme Körper aneinanderstoßen.

§ 26. Das mechanische Wärmeäquivalent

Die tägliche Erfahrung lehrt, daß Wärme durch mechanische Arbeit erzeugt werden kann. Reibt man mit einem Tuche eine Holzplatte oder eine Glasscheibe, so werden beide Körper wärmer als vorher. Beim Bohren von Metall werden die Späne so heiß, daß man sich verbrennt, wenn man sie angreift. Das Blatt der Säge wird heiß beim Sägen. Man kann Feuer dadurch entfachen, daß man ein Holz mit einem anderen reibt oder einen Holzbohrer in rasche Drehung versetzt und dabei in ein anderes Stück Holz einbohren läßt. Die dabei erzeugte Temperatur reicht aus, um leicht entflammbare Körper zu entzünden. Preßt man ein Gas in einem Zylinder rasch stark zusammen, so erwärmt sich das Gas so stark, daß Zunder dabei in Brand gerät.

Diese Versuche legen die Vermutung nahe, daß Wärme und Arbeit nur verschiedene Formen der Energie sind. Ist dies der Fall, so muß zwischen der Arbeit, die aufgewendet wird, um Wärme zu erzeugen, und der entstandenen Wärme ein ganz bestimmtes Umwandlungsverhältnis bestehen. Es muß also durch eine große Anzahl von Versuchen, bei denen Arbeit in Wärme, und anderen Versuchen, bei denen Wärme in Arbeit umgewandelt wird, festgestellt werden, ob dies Umwandlungsverhältnis immer dasselbe ist.

Alle Versuche dieser Art haben ergeben, daß zwischen einer gewissen Wärmemenge und der Arbeit, die daraus gewonnen werden kann, ein ganz bestimmtes, unveränderliches Verhältnis besteht.

Ein Versuch, der mit groben Mitteln uns gestattet, dieses Verhältnis annähernd festzustellen, ist folgender. In einer beiderseits verschlossenen, 1 m langen Röhre aus Pappe lassen wir durch Umkippen der Röhre 1 kg Bleischrot durch die ganze Länge der Röhre frei fallen. Im Augenblick des Beginns der Fallbewegung hat der Bleischrot die Lagenenergie 1 mkg. Beim Auftreffen auf das andere Ende der Röhre ist dieser Arbeitsvorrat verschwunden, dafür hat sich der Schrot erwärmt. Wiederholt man den Versuch mehrmals, so reicht die dadurch hervorgerufene Wärmemenge aus, um eine meßbare Erhöhung der Temperatur des Schrotes zu veranlassen. Aus der spezifischen Wärme und der Menge des Bleis und der Temperaturerhöhung läßt sich die Wärmemenge berechnen. Die mechanische Arbeit beläuft sich auf ebensoviel mkg, wie der Schrot nacheinander die ganze Länge der Röhre durchfallen hat. Dividiert man beide Größen durcheinander, so erhält man das Umwandlungsverhältnis.

Versuche dieser Art liefern nur dann genaue Ergebnisse, wenn keine Arbeit in anderer Form verbraucht wird (z. B. zum Verändern der Gestalt der Schrotkörner, zum Verletzen der Wand der Röhre usw.), und wenn alle entstehende Wärme berücksichtigt wird (so wird in obigem Versuch auch die Pappe der Röhre warm). Mit allen Vorsichtsmaßregeln angestellte Versuche haben ergeben:

Das Umwandlungsverhältnis von mechanischer Arbeit in Wärme beträgt stets

$$427 \text{ mkg} = 1 \text{ kcal}.$$

Man bezeichnet dieses Umwandlungsverhältnis als das mechanische Wärmeäquivalent.

Zu diesem Ergebnis haben auch die Versuche geführt, aus der Wärme den äquivalenten Arbeitsbetrag festzustellen.

§ 27. Das Gesetz der Erhaltung der Energie

Mit der Entdeckung der wichtigen Tatsache, daß Wärme eine Form der Energie und nicht ein unwägbarer Stoff ist, wie man früher angenommen hatte, war die Möglichkeit gegeben, den Widerspruch zu beseitigen, der bei den mechanischen Maschinen zwischen Theorie und Praxis bestand. Nach der goldenen Regel der Mechanik, die streng nur für reibungslose Maschinen oder für den Gleichgewichtszustand gilt, müßte die Arbeit, die durch eine Maschine übertragen wird, stets gleich groß bleiben. In der Praxis und bei den Versuchen zeigte sich, daß die übertragene Arbeit immer etwas kleiner war als die aufgewendete Arbeit. Der Grund dafür lag darin, daß durch die Reibung ein gewisser Teil der Arbeit verloren ging.

Betrachten wir nun den Vorgang der Arbeitsübertragung durch eine Maschine, wie sie praktisch gebraucht wird, unter dem oben dargelegten Gesichtspunkt, daß die durch Reibung erzeugte Wärme auch Arbeit ist, und berücksichtigen wir die im Gesetz vom mechanischen Wärmeäquivalent niedergelegte Erfahrung, daß die Menge dieser Wärme der verloren gegangenen Arbeitsmenge entsprechen muß, dann läßt sich sagen:

Die bei einer mechanischen Maschine aufgewendete Arbeit wird vollkommen übertragen, jedoch wird bei diesem Vorgang ein Teil der Arbeit in Wärmeenergie umgewandelt. Stets herrscht die Beziehung:

Aufgewendete Arbeit = übertragener Arbeit
+ Arbeitswert der durch Reibung entwickelten Wärme.

Die Größe der Gesamtarbeit bleibt also bei der Übertragung erhalten.

Betrachten wir die Erzeugung von Arbeit in einem Explosionsmotor. In einer gewissen Zeit wird eine gewisse Menge Brennstoff verbraucht und eine bestimmte Arbeit durch den Motor geleistet. Ein Teil der durch Verbrennung entstandenen Wärmemenge wird im Auspuff des Motors mit den ausströmenden heißen Verbrennungsgasen, ein anderer Teil bei der Erhitzung des Zylinders, der dauernd gekühlt werden muß, ein anderer durch Reibung in den Lagern der Maschine verloren gehen. Nur ein Bruchteil der gesamten Wärme wird wirklich in Arbeit umgewandelt werden.. Trotzdem muß aber auch hier festgestellt werden:

Erzeugte Wärme = Wärmewert der entstandenen mechanischen Arbeit
+ Wärmeabgabe an die Umgebung und an die Maschine.

Wenn auch die durch Reibung erzeugte und durch Berührung übertragene Wärme nicht ohne weiteres in Arbeit umgewandelt werden kann, so ist sie doch als Energiemenge vorhanden. Sie hat die Temperaturerhöhung an den verschiedenen Stellen verursacht. Daher kann allgemein gesagt werden:

Bei allen Übertragungen und Umwandlungen von mechanischer Energie und Wärmeenergie bleibt die Summe der Energie stets unverändert. Energie geht nicht verloren, sondern bleibt als Energie gleicher Größe erhalten.

Dieser Satz heißt das Gesetz der Erhaltung der Energie.

Er besagt im Grunde genommen nur, daß Wärme in Arbeit und Arbeit in Wärme in demselben unveränderlichen Verhältnis umwandelbar sind. Berücksichtigen wir schon jetzt, daß es noch andere Formen der Energie gibt, und daß auch für sie ein gewisses unveränderliches Umwandlungsverhältnis besteht, so können wir den Satz ganz allgemein aussprechen:

Energie geht nicht verloren, sie bleibt ihrer Summe nach bei allen Umwandlungsvorgängen konstant.

In dieser Gestalt ist das Gesetz der Erhaltung der Energie ein Gesetz, das die ganze Physik durchzieht.

Es bedeutet z. B.: Die Energie eines Bergsees wird in einer Turbine in mechanische Arbeit verwandelt. Läuft eine gewisse Wassermenge aus dem See und durchfällt sie dabei eine bestimmte Höhe, so läßt sich daraus der Betrag der Energie der Lage berechnen, die der See abgibt. Die in der Turbine gewonnene mechanische Energie ist wesentlich geringer als diese Energiemenge. Berücksichtigen wir aber die in der Maschine durch Reibung entstandene Wärmemenge, die Temperaturerhöhung, die das Wasser durch die Reibung der Wasserteilchen untereinander und an den Wänden der Leitungsrohre erfährt, ziehen wir ferner in Rechnung, daß an die Luft Energie dadurch abgegeben wird, daß die Maschine Wind bei der Umdrehung erzeugt, daß das Brausen des Wassers Schallenergie auf die Luft überträgt usw., so läßt sich das Gesetz der Erhaltung der Energie hier in der Form erkennen: Würde man feststellen, wie groß die Mengen der Energien sind, die in allen diesen einzelnen Formen entstehen, so würde die Summe dieser Energien gleich der aufgewendeten Energie sein.

§ 28. Energiehaushalt

1. Die vorhandenen Energiequellen. Die mächtigste unserer Energiequellen ist die Sonne. Sie strahlt an einem wolkenlosen Tage auf 1 m^2 der Erdoberfläche in jeder Minute bei senkrechter Strahlung etwa 20 kcal, in einer Stunde also 1200 kcal. Nehmen wir an, diese Zahl für die senkrechte Sonnenstrahlung von einer Stunde käme der während des ganzen Tages gleich, wenn die Strahlen der Sonne schief einfallen oder durch Wolken zurückgehalten werden, so kommen auf 1 km^2 Land etwa 1200000000 kcal an jedem Tag. Dies entspricht dem

Heizwert von 150 t Kohlen. Ein Landgut von 100 ha Größe würde also soviel Wärme von der Sonne täglich beziehen, wie es andernfalls erhalten könnte, wenn täglich 150 t Kohlen auf ihm verfeuert würden. Diese Zahlen zeigen, wie außerordentlich groß die Energie der Sonnenstrahlung gegenüber unseren irdischen Energiequellen ist. Würde doch ein Eisenbahnzug von 15 Wagen täglich gebraucht, um die Kohlen für diesen kleinen Fleck Erde heranzubringen, die den Heizwert der Sonne ersetzen könnten.

Einen Einblick in die Bedeutung der Wasserkräfte für unsere Industrie erhalten wir, wenn wir berechnen, wie groß z. B. die Energie ist, die der Rheinfall bei Schaffhausen besitzt, bei dem in der Sekunde 250 m^3 Wasser etwa 20 m tief fallen.

250 m^3 Wasser wiegen 250000 kg. Es ergibt sich also theoretisch eine mögliche Arbeitsleistung von

$$250000 \cdot 20 \text{ mkg/sec} = 5000000 \text{ mkg/sec} \sim 65000 \text{ PS}.$$

Verbrennt in der Feuerung einer Dampfmaschine etwa 1,5 kg Kohle in jeder Sekunde, so würde die Leistung der Maschine, wenn diese gesamte Wärme in Arbeit umgewandelt würde, betragen:

$$1{,}5 \cdot 8000 \cdot 427 \text{ mkg/sec} = 5000000 \text{ mkg/sec} \sim 65000 \text{ PS}.$$

Eine Maschine, die in 1 Sekunde 1,5 kg Kohle verbraucht, bedarf während eines Tages etwa 130 t Kohlen. Ein Kohlenbergwerk, in dem täglich 130 t Kohlen gefördert werden, käme bei vollständiger Umwandlung der Energie daher dem Rheinfall als Energiequelle etwa gleich. Obwohl beide für unsere Begriffe schon recht beträchtliche Energiequellen sind, beträgt der in ihnen wohnende Energiebetrag trotzdem nur soviel, wie 1 km^2 der Erdoberfläche täglich von der Sonne erhält. Praktisch verhält es sich etwas anders.

2. Die Wirtschaftlichkeit der kraftzeugenden Maschinen. Untersuchen wir an einem Beispiel, wie es in der Praxis mit der Umwandlung von Wärmeenergie in Arbeit steht. In einer gutwirkenden Dampfmaschine werden 0,5 kg bester Kohle verbraucht, um 1 Stunde lang die Leistung 1 PS = 75 mkg/sec zu erzielen. Das entspricht einer Arbeit $75 \cdot 60^2 = 270000$ mkg/Stunde. 0,5 kg Kohle erzeugen 4000 kcal Wärme und entsprechen $4000 \cdot 427 = 1700000$ mkg/Stunde. Nur ein geringer Teil (etwa 16%) dieser Wärmeenergie wird also in der Dampfmaschine in mechanische Arbeit verwandelt. Die meiste Wärme geht für die praktische Verwertung verloren, indem die Kohle unvollständig verbrennt, viel Wärme durch den Schornstein entweicht, aus dem Kondensator nicht zurückgewonnen werden kann oder von der heißen Maschine an die Umgebung abgegeben wird. Außerdem wird zur Überwindung der Reibung in der Maschine Arbeit verbraucht.

Wenn auch die Abdampfwärme der Dampfmaschine vielfach zur Heizung benutzt wird, so bleibt doch die Tatsache bestehen, daß die Energieverluste in den Wärmekraftmaschinen sehr groß sind. Es geht, wenn man die Arbeitsleistung zugrunde legt, verloren: in der Kolbendampfmaschine 80 bis 85%, in der Dampfturbine 75%, im Explosionsmotor 50 bis 60% der erzeugten Verbrennungswärme.

Bei Wasserkraftmaschinen betragen die Verluste an ausnutzbarer Energie nur etwa 20%.

3. Sparsame Wärmewirtschaft. Etwa 15% aller Heizstoffe werden in den Haushaltungen verbraucht. Erfahrungsgemäß wird dabei die Kohle sehr unwirtschaftlich verfeuert. Besonderes Augenmerk ist im Interesse einer sparsamen Bewirtschaftung zu richten auf folgende Punkte:

a) Der Rauch, der durch den Schornstein entweicht, besteht zum großen Teil aus brennbaren Gasen. Man darf, damit diese Gase nicht unverbrannt abziehen, nie die ganze Glut des Feuers mit Kohlen beim Schüren bedecken.

b) Der Rost muß in seiner ganzen Ausdehnung mit Brennstoff bedeckt sein. Kohle in Walnußgröße läßt genügend und nicht zuviel Luft für die Verbrennung durch die Glut streichen. Ist der Rost nicht völlig bedeckt, so zieht kalte Luft in den Herd und erniedrigt die Temperatur über dem Feuer erheblich. Große Roste sind wegen des hohen Brennstoffverbrauches unwirtschaftlich (Sparherd!).

c) Die durch die Verbrennung erzeugte Temperatur soll so hoch wie möglich sein, da dann die Wärmeabgabe der Verbrennungsgase am größten ist. Die Temperatur nimmt über der Glut nach oben rasch ab. Töpfe müssen daher nicht allzu hoch über der Feuerung stehen. Tiefgelegene Roste sind zu verwerfen.

d) Die Verbrennungsgase sollen erst in den Schornstein entweichen, wenn sie sich bis auf 40° C abgekühlt haben. Daher lange Ofenrohre, Züge im Herd usw. Schließen der Herdklappe nach dem Anheizen, Regulieren des Ofens durch Schließen der unteren Ofentür und Abdrosseln der Luftzufuhr.

Selbst unter Beobachtung aller dieser Maßregeln ist der Kohlenverbrauch im Haushalt gegenüber dem Kochen mit Gas unwirtschaftlich. Gas läßt sich so einstellen, daß zur Unterhaltung des Siedens eine ganz kleine Flamme ausreicht. In der Gasfabrik werden viele in der Kohle enthaltenen wertvollen Stoffe gewonnen, die bei der Kohlenheizung durch den Schornstein entweichen, Zentralheizungen, in denen Koks verbrannt wird, sind wirtschaftlicher als Ofenheizungen.

§ 29. Kältemaschinen

Wir haben oben gesehen, daß ein Körper sich nicht dadurch abkühlen kann, daß ein Teil seiner Wärme von selbst an einen Körper mit höherer Temperatur übergeht. Es gibt aber Körper, die sich von selbst abkühlen.

Verdampft Äther in einem Reagenzglas, so gefriert Wasser, das sich außen an dem Glas niederschlägt. Wasser in porösen Tongefäßen ist auch im heißen Sommer kühl. Kohlensäure, die aus einer Glasflasche strömt, kühlt sich dabei so stark ab, daß sie flüssig wird und gefriert. Luft kühlt sich ab, wenn sie sich ausdehnt. Man erkennt dies daran, daß sich der Wasserdampf in ihr zu Nebel verdichtet.

Eine Flüssigkeit, die verdampft oder verdunstet, kühlt sich ab.

Ein Gas, das sich rasch ausdehnt, kühlt sich ab.

Es entsteht die Frage, ob diese Erscheinungen mit dem Gesetz der Erhaltung der Energie in Einklang stehen. Sollen dauernde Wirkungen erzielt werden, so muß verhindert werden, daß die Verdampfung aufhört oder die Ausdehnung in kurzer Zeit zu Ende ist. Fortgesetzte Verdampfung ist nur möglich, wenn der entwickelte Dampf angesaugt wird. Fortgesetztes Ausdehnen eines Gases ist

nur möglich, wenn genügende Mengen komprimierten Gases verfügbar sind. Die Wärme, die ein Körper sich beim Verdampfen oder Ausdehnen entzieht, ist ihm daher als Arbeit entweder vorher zugeführt worden (bei der Kompression) oder wird während der Verdunstung (durch Absaugen des Dampfes) geleistet. Körper, bei denen diese Umstände nicht zutreffen, kühlen sich auch von selbst nicht ab. Daher besteht kein Widerspruch mit dem Energiegesetz, und es läßt sich der Satz aussprechen:

Eine Maschine, die einen Körper unter die Temperatur seiner Umgebung abkühlen soll, kann dies nur unter Arbeitsleistung erreichen.

Eine Maschine, in der Kälte erzeugt wird, ist die Eismaschine (Fig. 97). Sie besteht aus einem Zylinder, in dem ein Kolben hin- und herbewegt wird. Aus dem Boden des Zylinders führt (links) ein Rohr in Windungen durch einen Kühlbehälter K, der mit Wasser angefüllt ist, bis zu einem Hahn H. Von diesem Hahn führt ein Rohr durch ein Gefäß V, das mit Salzwasser gefüllt ist, nach dem Boden (rechts) des Zylinders. Der Zylinder und die ganze Rohrleitung sind mit Ammoniakgas gefüllt und nach außen abgeschlossen. Bewegt sich der Kolben von oben nach unten, so wird das Ammoniakgas, das durch den Hahn H nicht weiter strömen kann, in der in K liegenden Rohrleitung verdichtet. Erlangt das Gas dabei einige Atmosphären Druck, so wird es, wenn es durch Wasser gekühlt wird, das in A zu- und in B abfließt, flüssig. Es sammelt sich also in der Rohrleitung von K flüssiges Ammoniak. Geht der Kolben nach oben, so wird, wie man aus der Anordnung der Ventile ersehen kann, aus der Rohrleitung in V Ammoniakgas angesaugt. Dabei verringert sich der Druck des Ammoniakgases in der rechten Schlangenwindung, und es verdampft dort flüssiges Ammoniak, wenn solches noch vorhanden ist. Dreht man von Zeit zu Zeit den Hahn H auf, so ist dadurch stets dafür gesorgt, daß flüssiges Ammoniak in der Rohrleitung von V ist. Zum Verdampfen verbraucht das Ammoniak Wärme. Diese muß es sich selbst oder seiner Umgebung entziehen. Die Folge der fortdauernden Verdampfung ist, daß Salzwasser, das in C ein- und in D ausströmt, unter den Gefrierpunkt des Wassers abgekühlt wird.

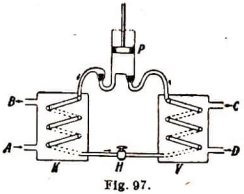


Fig. 97.

Läßt man dieses kalte Salzwasser Gefäße, die mit reinem Wasser gefüllt sind, umspülen, so gefriert das Wasser darin.

§ 30. Geschichtliche Entwicklung

Um die Mitte des 18. Jahrhunderts war die Meinung unter den Gelehrten verbreitet, daß die Wärme ein unwägbarer Stoff sei, der sich einem Körper mitteilte, wenn er eine höhere Temperatur annehme. Lange hat man an dieser Ansicht festgehalten. Neue Ideen gewann man erst, nachdem ein Arzt aus Heilbronn, Robert Mayer, im Jahre 1842 in einem Aufsatz einer Zeitschrift darauf hingewiesen hatte, daß zwischen der Wärme und der mechanischen Arbeit ein Zusammenhang bestünde. Er war früher als Schiffsarzt in den Tropen gewesen, hatte dort die Beobachtung gemacht, daß das Blut in den Venen der Menschen

viel heller war als in der gemäßigten Zone. Weil in den Tropen eine so große Arbeitsleistung wie in der gemäßigten Zone unmöglich war, schloß er daraus, daß die Färbung des venösen Blutes einerseits mit der Verbrennung und andererseits mit der Arbeitsleistung des Körpers zusammenhinge. Er erzeugte auch Wärme durch Reibung, indem er Wasser in einer Flasche schüttelte. Das Wärmeäquivalent berechnete er aus bekannten Größen für die Wärmeausdehnung eines Gases. Der Wert, den er angab, war zu klein. Immerhin war er aber der erste, der den Grundgedanken des Gesetzes der Erhaltung der Energie ausgesprochen hat.

Ein Jahr später veröffentlichte der englische Privatgelehrte James Preskott Joule die Resultate sehr genauer Versuche über das mechanische Wärmeäquivalent. Zu beiden gesellte sich als dritter der Arzt und spätere Professor Hermann v. Helmholtz, der 1847 eine Schrift über die Erhaltung der Energie herausgab, in der er das Gesetz in seiner Allgemeingültigkeit für alle Energieformen aussprach.

Noch zu dieser Zeit waren die Gelehrten nicht gewöhnt, scharf zwischen Kraft und Arbeit zu unterscheiden. Helmholtz nannte seine Schrift: Über die Erhaltung der Kraft. Das Wort Energie bürgerte sich erst in der Folgezeit für das ein, was die drei Entdecker des Energiegesetzes gemeint hatten. Mit der Entdeckung des Energiegesetzes nahm die Physik einen raschen Aufschwung, denn der Umstand, daß es als allgemeingültiges Gesetz erkannt wurde, erleichterte der Forschung den Weg in unbekannte Gebiete.

VI. Die Gesetze der Bewegung

§ 31. Die geradlinige Bewegung

Wir wenden uns im folgenden der Betrachtung von Bewegungsvorgängen zu, die dadurch gekennzeichnet sind, daß bei ihnen der zeitliche Verlauf von Bedeutung ist, während unsere Untersuchung sich bisher auf das Messen der Kraft bzw. des Gewichtes, des Weges und der Temperatur beschränken konnte.

Wir können nur feststellen, ob ein Körper sich bewegt, wenn sich ein Körper findet, gegen den er sich bewegt. Würde sich die ganze Umgebung des Körpers mitbewegen, so merkten wir nichts von der Bewegung. Das beste Beispiel dafür bietet uns die Bewegung der Erde.

Wollen wir die Bewegung eines Körpers messend verfolgen, so müssen wir wiederholt seinen Ort zu einer gewissen Zeit feststellen. Wir müssen also Zeit und Lage messen. Wir betrachten zunächst die geradlinige Bewegung.

1. Experimentelles Beispiel. *Auf einer Fallrinne lassen wir wiederholt von einer bestimmten Stelle aus eine Stahlkugel herabrollen. Nach einer gewissen Anzahl von Zeiteinheiten, die wir mit dem Metronom messen, halten wir die Kugel an und messen den Weg, den sie bis dahin zurückgelegt hat. Die Ergebnisse der Messungen für die einzelnen Zeiteinheiten stellen wir tabellarisch zusammen.*

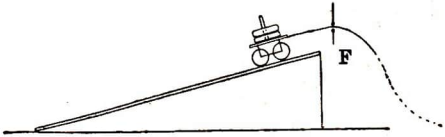


Fig. 98.

Folgende Versuchseinrichtung liefert uns die in den verschiedenen Zeiten zurückgelegten Wege sofort genauer und bei einem einzigen Versuch. Auf einer etwa unter 5° geneigten schiefen Ebene rollt ein Wagen herunter. Dieser Wagen zieht einen leichten Papierstreifen hinter sich her, der bei F (Fig. 98) *von einem taktmäßig überspringenden elektrischen Funken durchlöchert wird. Auf dem Papierstreifen sind dann die Wege, die der Wagen in den einzelnen Zeiteinheiten zurückgelegt hat, an den Abständen der Löcher zu erkennen.*

Zunächst ergibt die Beobachtung, daß die Bewegung immer rascher wird. Wollen wir den Bewegungszustand des Körpers näher beschreiben, so müssen wir zu dem Ausdruck für den Bewegungszustand greifen, den wir im praktischen Leben benutzen. Dies ist er Begriff der Geschwindigkeit.

Unter Geschwindigkeit eines Körpers verstehen wir den von dem Körper in der Zeiteinheit zurückgelegten Weg[1]).

Wir sagen z. B., ein Eisenbahnzug habe die Geschwindigkeit 60 km/Stunde oder 1 km/Minute oder 17 m/sec.

Die Geschwindigkeit kann also dadurch bestimmt werden, daß wir den in der Zeiteinheit zurückgelegten Weg messen. Diese so bestimmte Geschwindigkeit wird aber nur dann den Bewegungszustand wirklich genau angeben, wenn keine Veränderung im Bewegungszustand während der Zeit eintritt, in der wir den Weg messen. Den Bewegungszustand eines anfahrenden oder in einen Bahnhof einfahrenden Eisenbahnzuges kann man z. B. nur dadurch annähernd bestimmen, daß man sehr kleine Zeiteinheiten wählt und für sie die durchschnittliche Geschwindigkeit angibt.

In dem von uns gewählten experimentellen Beispiel für die geradlinige Bewegung können wir den Bewegungszustand annähernd dadurch beschreiben, daß wir die Wege angeben, die der Körper in den sehr kleinen Zeiteinheiten des Metronoms nacheinander zurücklegt. Diese Wege geben uns auch die durchschnittliche Geschwindigkeit während dieser Zeiteinheit an. Tragen wir in einem Koordinatennetz in horizontaler Richtung die Zeiteinheiten und in vertikaler Richtung die in den einzelnen aufeinanderfolgenden Zeiteinheiten erzielten Durchschnittsgeschwindigkeiten auf und verfahren dabei so, daß wir die Durchschnittsgeschwindigkeit als Mittelwert in der Mitte der Zeiteinheit als Ordinate errichten, so zeigt sich, daß die Endpunkte aller Durchschnittsgeschwindigkeiten ungefähr auf einer Geraden liegen (Fig. 99).

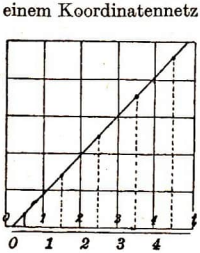


Fig. 99.

Ziehen wir diese Gerade, so gibt uns jeder ihrer Punkte mit großer Annäherung den richtigen Wert der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitpunkt in der Größe seiner Ordinate an. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der t-Achse gibt den Zeitpunkt des Beginns der Bewegung an.

Die graphische Darstellung läßt ferner erkennen, daß die Geschwindigkeiten in aufeinanderfolgenden Zeiteinheiten immer um den gleichen Betrag zunehmen.

1) Exakte Definition siehe Oberstufe.

Die Bewegung auf die Fallrinne ist also eine Bewegung, die dadurch ausgezeichnet ist, daß die Geschwindigkeit der Kugel in gleichen Zeiten um den gleichen Betrag wächst. Eine solche Bewegung nennen wir gleichmäßig beschleunigt.

Unter Beschleunigung verstehen wir den Zuwachs der Geschwindigkeit eines Körpers in der Zeiteinheit[1]).

Geben wir der Fallrinne oder der schiefen Ebene eine stärkere Neigung, so ergibt der Versuch, daß auch in diesem Falle die Bewegung der Kugel gleichmäßig beschleunigt ist. Sie unterscheidet sich von der früheren nur dadurch, daß die Beschleunigung größer ist.

2. Die Arten der geradlinigen Bewegung. Geschwindigkeit und Beschleunigung ermöglichen uns, den Bewegungszustand eines Körpers genau zu beschreiben.

Die Geschwindigkeit gibt seinen augenblicklichen Bewegungszustand an.

Die Beschleunigung sagt aus, welche Änderung der Bewegungszustand in diesem Augenblick erfährt.

Es ergeben sich folgende verschiedene Arten der Bewegung:

a) Die gleichförmige Bewegung.

Darunter verstehen wir eine Bewegung, bei der die Geschwindigkeit unverändert ist. Die Beschleunigung ist dann gleich Null.

b) Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

Darunter verstehen wir eine Bewegung, bei der die Geschwindigkeit in gleichen Zeiten um die gleiche Größe wächst. Die Beschleunigung ist dann eine unveränderliche Größe.

c) Die gleichmäßig verzögerte Bewegung.

Darunter verstehen wir eine Bewegung, bei der die Geschwindigkeit in gleichen Zeiten um denselben Betrag abnimmt. Die Beschleunigung ist unveränderlich, aber negativ zu rechnen.

d) Die ungleichförmige Bewegung.

Darunter verstehen wir eine Bewegung, bei der die Beschleunigung veränderlich ist.

3. Die gleichförmige Bewegung. Besitzt ein gleichförmig bewegter Körper die Geschwindigkeit c, und bewegt er sich während der Zeit t vorwärts, so läßt sich der zurückgelegte Weg durch die Beziehung berechnen:

$$\boxed{s = c \cdot t}.$$

4. Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die Bewegung auf der schiefen Ebene war eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Wir haben oben bereits aus der graphischen Darstellung abzuleiten gelernt, wie man annähernd die Geschwindigkeit der Kugel für einen bestimmten Zeitpunkt bestimmen kann. Den Zuwachs der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit haben wir Beschleunigung genannt.

1) Exakte Definition siehe Oberstufe.

a) Das Gesetz der Geschwindigkeit:

Ist uns für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung der Größe der Beschleunigung a bekannt, so können wir auch durch Rechnung finden, wie groß die Geschwindigkeit des Körpers nach t Sekunden ist. Besitzt der Körper zur Zeit 0 die Geschwindigkeit 0, so ist die Geschwindigkeit v nach 1 sec $1 \cdot a$, nach 2 sec $2 \cdot a$, nach 3 sec $3 \cdot a$ usw., denn in jeder Sekunde nimmt die Geschwindigkeit um die Größe a zu. Folglich ergibt sich:

Ein Körper, der sich mit der gleichmäßigen Beschleunigung a bewegt, erlangt nach t Sekunden die Geschwindigkeit

$$\boxed{v = a \cdot t}.$$

Dies gilt für alle gleichmäßig beschleunigten Bewegungen.

b) Das Gesetz des Weges:

Erfährt der Körper die Beschlennigung a, so ist seine Geschwindigkeit zu Anfang jeder Zeiteinheit um a kleiner als am Ende dieser Zeiteinheit. Berechnet man von diesem Gedanken ausgehend die Wege, die bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung zurückgelegt werden, so ergibt sich:

Zeit t	Beschleunigung	Geschwindigkeit Anfang	Geschwindigkeit Ende	Weg in 1 sec	Gesamtweg s
1 sec	a	0	a	$\frac{a}{2}$	$\frac{a}{2} = \frac{a}{2} \cdot 1^2$
2 „	a	a	$2a$	$3\frac{a}{2}$	$4\frac{a}{2} = \frac{a}{2} \cdot 2^2$
3 „	a	$2a$	$3a$	$5\frac{a}{2}$	$9\frac{a}{2} = \frac{a}{2} \cdot 3^2$
4 „	a	$3a$	$4a$	$7\frac{a}{2}$	$16\frac{a}{2} = \frac{a}{2} \cdot 4^2$
. . .	. . .	. . .		. . .	. . .
t „					$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$

Wir erhalten also auf theoretischem Wege das Gesetz:

Ein Körper, der sich mit der gleichmäßigen Beschleunigung a bewegt, legt nach t sec den Weg $s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ zurück.

$$\boxed{s = \tfrac{1}{2} \cdot a \cdot t^2}$$

Wir können nun auf folgende Weise zeigen, daß diese Gesetze in unseren Meßergebnissen erfüllt sind: In dem Geschwindigkeits-Zeitdiagramm bilden wir den Quotienten einer beliebigen Ordinate v und der zugehörigen, vom Beginn der Bewegung ab gemessenen Zeit t; dann erhalten wir a und in allen Fällen denselben Wert. $v = a \cdot t$.

Schreiben wir in einer Tabelle die beim Übergang des Funkens zurückgelegten Wege des Körpers an, messen dann, wie groß der Zeitunterschied zwischen dem Beginn der Bewegung und dem Augenblick ist, in dem der erste Funken übertritt, und berechnen daraus die Dauer der Bewegung in den einzelnen Fällen, so können wir für alle Meßergebnisse die Quotienten s/t^2 bilden. Es ergibt sich dann eine Zahl, die in allen Fällen nahezu gleich $a/2$ ist. Die Beobachtung zeigt also, daß das Gesetz $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$ erfüllt ist.

Funke	Zeit t	Gesamtweg s	s/t^2

c) Das Gesetz der Endgeschwindigkeit:

Unter Verwendung der beiden Formeln läßt sich nun weiter ableiten, wie groß die Geschwindigkeit eines Körpers ist, der mit der Beschleunigung a die Fallrinne von der Länge s durchlaufen hat. Setzt man $t = v/a$ in die Gleichung $s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ ein, so ergibt sich

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \frac{v^2}{a^2}, \quad 2 \cdot a \cdot s = v^2$$

$$\boxed{v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}}\,.$$

5. Die gleichmäßig verzögerte Bewegung. Eine gleichmäßig verzögerte Bewegung können wir nicht anders auffassen als eine gleichförmige Bewegung, deren Geschwindigkeit c in jeder Zeiteinheit um denselben Betrag a verringert wird. Die Geschwindigkeit v in der Zeit t ergibt sich dann durch die Beziehung

$$\boxed{v = c - a \cdot t}\,.$$

Ohne die Verzögerung würde der Körper in der Zeit t den Weg $s = c \cdot t$ zurückgelegt haben, die Wegverringerung durch die Verzögerung beträgt $s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$, also ist der wirklich in der Zeit t zurückgelegte Weg des Körpers

$$\boxed{s = c \cdot t - \tfrac{1}{2} \cdot a \cdot t^2}\,.$$

§ 32. Der freie Fall und der Wurf

1. Der freie Fall. Lassen wir die Neigung der Fallrinne steiler werden, so wächst dadurch die Beschleunigung, die der fallende Körper erfährt, immer mehr. Es entsteht die Frage, welche Bewegung ein Körper besitzt, der eine Strecke ganz frei durchfällt. Während wir uns bei der Bewegung auf der Fallrinne darauf beschränkt haben, ein Beispiel für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung in der Bewegung der leichtbeweglichen Kugel kennenzulernen, müssen wir jetzt ausführlicher werden, um die Gesetze des freien Falles aufzufinden.

Zunächst zeigt ein beliebiger Fallversuch:

a) Der fallende Körper bewegt sich in der Richtung des Lotes.

Lassen wir verschieden große Körper oder Körper von ganz verschiedenem spezifischen Gewicht fallen, so zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Dieser Unterschied verschwindet aber, wenn wir den Fallversuch im luftleeren Raum vornehmen. Da zeigt sich:

b) Alle Körper allen im luftleeren Raum gleich schnell.

Nehmen wir dann mit einem Körper, der nicht sehr durch den Luftwiderstand aufgehalten wird, im Treppenhaus Fallversuche vor und versuchen, wie bei der Fallrinne, die in kleinen Zeiteinheiten zurückgelegten Wege zu ermitteln, so ergibt sich:

Die Fallhöhe in 1 Sekunde beträgt etwa 5 m.

Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung, deren Beschleunigung[1]) etwa 1000 cm/sec² oder 10 m/sec² beträgt.

Versuche, die mit allen Hilfsmitteln der Beobachtung angestellt sind, bestätigen dieses Gesetz und lassen uns die genau bestimmte Größe der Beschleunigung des frei fallenden Körpers wissen. Daraus folgt:

c) Der freie Fall ist eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

d) Die Beschleunigung des freien Falles beträgt 981 cm/sec².

Danach müßte der Körper in der ersten Sekunde den Weg 490,5 cm zurücklegen, was mit der Beobachtung ungefähr übereinstimmt.

Wenden wir die oben gefundenen Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung auf die Fallbewegung an und bezeichnen die Fallbeschleunigung 981 cm/sec² mit dem Buchstaben g, so ergibt sich:

Die Geschwindigkeit, die ein frei fallender Körper nach der Zeit t erlangt, ist

$$\boxed{v = g \cdot t \text{ cm/sec}}.$$

Der Weg, den er in dieser Zeit durchfällt, ist

$$\boxed{h = \tfrac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \text{ cm}}.$$

Die Geschwindigkeit, mit der er beim Durchfallen der Höhe h unten auftrifft, ist

$$\boxed{v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \text{ cm/sec}}.$$

Stellt man die Fallversuche an verschiedenen Orten auf der Erdoberfläche an, so zeigt sich, daß die Beschleunigung beim freien Fall verschieden ist. Sie beträgt an Orten, die auf dem Äquator liegen, 978 cm/sec², an Orten unter 45° geogr. Breite 980,6 cm/sec² und wächst am Pol bis zu 983 cm/sec² an.

2. Der Wurf. *Lassen wir zwei gleiche Körper gleichzeitig fallen und erteilen dem einen dabei eine Geschwindigkeit in horizontaler Richtung, so ergibt der Versuch, daß beide Körper, einerlei aus welcher Höhe sie auch fallen, gleich schnell fallen. Dieser Versuch erläutert das Gesetz:*

Ein frei beweglicher Körper fällt unabhängig davon, ob er noch in horizontaler Richtung eine Bewegung erfährt, stets nach dem Gesetz des freien Falles nach unten.

---

1) Das Maß der Beschleunigung wird mit cm/sec² bezeichnet. (Geschwindigkeit : Zeit, d. h. cm/sec : sec.)

Ein schräg nach oben geworfener Körper beschreibt einen Bogen. Der absteigende Ast dieses Bogens ist steiler als der aufsteigende Ast, weil der Luftwiderstand die Bewegung verzögert. Im luftleeren Raum ist diese Kurve eine Parabel (Fig. 100).

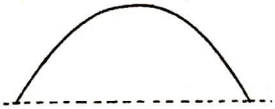


Fig. 100.

Der vertikale Wurf kann als gleichmäßig verzögerte Bewegung aufgefaßt werden, wenn er nach oben erfolgt, als gleichmäßig beschleunigte Bewegung, wenn er nach unten vor sich geht.

§ 33. Die bewegende Kraft und die Masse

Aus der täglichen Erfahrung wissen wir: Soll ein Körper aus dem Zustand der Ruhe in Bewegung übergeführt werden, so muß eine Kraft auf ihn wirken. Soll ein bewegter Körper aufgehalten werden, so muß ihm eine Kraft entgegenwirken. Es erscheint natürlich, daß jeder Körper in dem Bewegungszustand zu verharren sucht, den er besitzt; denn es zeigt sich, daß ein bewegter Körper seine Bewegung um so länger beibehält, je geringer die Reibung ist, die er bei der Bewegung zu überwinden hat.

Eine Kraft hat deshalb als Wirkung die Bewegungsänderung des Körpers zur Folge, an dem sie angreift. Die Bewegungsänderung wird durch die Beschleunigung gemessen. Daher können wir sagen:

Die Wirkung einer Kraft ist aus der Beschleunigung des Körpers zu erkennen, auf den die Kraft wirkt.

Die Beschleunigung allein reicht aber nicht aus, um die Kraft ihrer Größe nach zu erkennen, denn es ist wesentlich, an welchem Körper die Kraft wirkt. Z. B. wird für einen Eisenbahnzug eine sehr viel größere Kraft nötig sein als für einen einzelnen Wagen, wenn beide dieselbe Beschleunigung erfahren sollen. Der Widerstand, den der Zug der Bewegungsänderung entgegensetzt, ist größer als der Widerstand des einzelnen Wagens. Der Bewegungswiderstand besteht nicht etwa nur in Reibung, auch ein reibungslos bewegbarer Körper zeigt einen Widerstand.

Deutlich tritt dies z. B. hervor, wenn man einen leichten und einen schweren Körper, die beide an Fäden aufgehängt sind, durch dieselbe Kraft anstößt. Reibungskräfte können hier kaum entgegenwirken. Bei einem leichtbeweglichen Wagen, der mit verschiedenen Gewichten belastet werden kann, zeigt sich, daß der Wagen derselben Kraft verschieden starken Widerstand entgegensetzt. Legt man ein Kartenblatt auf ein Gefäß und auf dieses eine Münze, so kann das Kartenblatt fortgeschnellt werden, ohne daß die Münze mitgerissen wird. Diese fällt in das Gefäß. Ein Probeglas, das auf zwei ausgespannte Haare gelegt ist, kann zerschlagen werden, ohne daß die Haare dabei reißen. Einen Hammerstiel treibt man in den Hammerkopf, indem man auf das Ende des Stieles klopft, ohne den Hammerkopf dabei aufzustellen. Diese und viele Beispiele anderer Art beweisen, daß der Körper der Bewegungsänderung einen Widerstand entgegensetzt, und daß dieser verschieden groß sein kann.

Versucht man andererseits einen bewegten Körper aufzuhalten, etwa ein Pendel, das durch seine tiefste Lage schwingt, einen fahrenden Radfahrer, ein rollendes Faß usw., so wird stets der Körper über die Stelle hinausschießen, an der man ihn aufhalten will. Er widersetzt sich der Bewegungsänderung. Kleine Körper zeigen dabei einen geringeren Widerstand als große schwere Körper. Aus allem geht hervor:

Der Widerstand eines Körpers gegen Bewegungsänderungen hat nichts mit Reibung zu tun. Er äußert sich darin, daß der Körper in dem Zustand der Ruhe oder Bewegung zu verharren sucht, in dem er sich gerade befindet. Diese Eigenschaft des Körpers wird deshalb auch Beharrungsvermögen oder Trägheit des Körpers genannt. Zur Bezeichnung der verschieden großen Trägheit verwendet man den Ausdruck träge Masse des Körpers.

Den Widerstand eines Körpers gegen die Änderung seines Bewegungszustandes nennen wir die träge Masse des Körpers.

Die oben genannten Beispiele haben gezeigt:

Je größer die träge Masse eines Körpers ist, desto größer muß die Kraft sein, die ihm eine gewisse Beschleunigung erteilen soll.

Würden wir die träge Masse eines Körpers messen können, so könnten wir die Größe einer Kraft daran erkennen, welche Beschleunigung sie einem Körper von bestimmter träger Masse erteilte. Denn die Kraft wäre um so größer, je größer die träge Masse und die Beschleunigung ist. Wir könnten dann einfach schreiben:

$$\text{Kraft} = \text{träge Masse} \cdot \text{Beschleunigung}.$$

Dann wäre die Größe der Kraft von der Größe der Beschleunigung und der Größe der trägen Masse abhängig. Diese Auffassung widerspricht aber dem, was wir bisher getan haben. Wir haben die Größe der Kraft und die Größe der Beschleunigung in einem bestimmten Maß gemessen, nicht aber die Größe der trägen Masse.

Das Maß für die Kraft war das Grammgewicht, und das Maß für die Beschleunigung: der sekundliche Zuwachs der Geschwindigkeit. Daher können wir jetzt nur so verfahren, daß wir die träge Masse bestimmen, wenn uns Kraft und Beschleunigung bekannt sind.

Wir müssen demnach experimentell Aufschluß über die Größe der trägen Masse zu bekommen suchen. Die Versuche müssen aber möglichst reibungslos angestellt werden, damit keine Irrtümer sich einstellen.

1. Versuch: *Wir beobachten an der Fallrinne die Zeit t, in welcher bei wechselnden Neigungen h/l die Kugel eine bestimmte Strecke s durchläuft. Außerdem bestimmen wir das Gewicht der Kugel G. Dann ist die bewegende Kraft, die auf die Kugel wirkt, durch die Gleichung gegeben:* $P = G \cdot h/l$, *gemessen in Gramm und Zentimeter. Die Bewegung der Kugel ist gleichmäßig beschleunigt, daher läßt sich die Beschleunigung a aus s und t durch die Gleichung* $s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ *feststellen zu*

$a = 2 \cdot s/t^2$. Bilden wir in jedem Falle den Quotienten P/a, so ergeben alle Versuche dieselbe Zahl, und zwar eine Zahl, die etwa 1000 mal so klein wie G ist. Diese Zahl mißt die träge Masse der Kugel. Wir bezeichnen sie mit m.

2. Versuch: *Über eine leichtgbewegliche Rolle* (Fig. 101) *lassen wir einen Faden laufen, dessen beide Enden gleich große Gewichte tragen. Der Faden und die beiden Gewichte bilden dann einen Körper, der in jeder Lage im Gleichgewicht ist. Legen wir auf der einen Seite ein kleines Gewichtsstück P dazu, so gerät der Körper in eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Wir messen die Zeit t, in der der Körper einen bestimmten Weg zurücklegt. Die Kraft P ist gleich dem kleinen Übergewicht. Berechnen wir auch hier die Beschleunigung a nach der Formel $a = 2 \cdot s/t^2$, so ergibt der Quotient für alle Versuche, daß die Masse m etwa gleich dem 1000. Teil des Gewichtes des bewegten Körpers ist.*

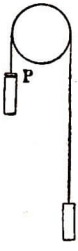


Fig. 101.

3. Versuch: *Die Beschleunigung, die ein frei fallender Körper erfährt, muß ebenfalls auf die Wirkung einer Kraft zurückgeführt werden. Die Kraft, die einen Körper nach unten zieht, ist sein Gewicht G. Diese Kraft ist unveränderlich. Sie bewirkt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung, deren Beschleunigung $g = 981$ cm/sec² ist. Aus den Fallversuchen ergibt sich daher ein sehr genauer Wert für das Verhältnis der trägen Masse zu dem Gewicht des Körpers. Die träge Masse eines frei fallenden Körpers ist gleich dem 981. Teil seines Gewichtes.*

Durch diese Versuche ist ein experimentelles Beispiel für das Gesetz gegeben:

Die träge Masse eines Körpers ist nicht abhängig von dem Bewegungszustand des Körpers. Sie ist unveränderlich.

Aus der Untersuchung anderer Bewegungsarten ergibt sich ebenfalls, daß die Masse unabhängig vom Bewegungszustand des Körpers ist. Sie ist also nur abhängig von dem Körper selbst, und damit ist für einen Körper von der trägen Masse m die Definition eindeutig:

Kraft = träge Masse · Beschleunigung.

$$\boxed{P = m \cdot a \text{ Gramm}}.$$

Besondere Bedeutung gewinnt diese Bezeichnung, wenn wir sie auf der Fallbewegung noch eingehender anwenden. Beim freien Fall ist die Kraft gleich dem Gewicht, die Beschleunigung gleich der Erdbeschleunigung g. Es ist also

Gewicht = träge Masse · Erdbeschleunigung

$$\boxed{G = m \cdot g \text{ Gramm}}.$$

Wir haben eben den Satz aufgestellt, daß die träge Masse eines Körpers unveränderlich ist. Wir wissen, daß die Erdbeschleunigung andererseits an verschiedenen Punkten der Erde verschieden ist. Daraus würde folgen, daß das Gewicht eines Körpers am Äquator geringer wäre als an den Polen z. B., es sei denn, daß auch die träge Masse auf der Erde veränderlich ist. Versuche zur

genauen Gewichtsbestimmung (die wir uns etwa mit sehr genauen Federwaagen vorgenommen denken können) haben ergeben, daß das Gewicht eines Körpers auf der Erde sich in demselben Verhältnis ändert wie die Erdbeschleunigung. Das Gewicht eines Körpers ist an den Polen am größten, am Äquator am kleinsten. Es ergeben sich daraus wichtige Aufschlüsse:

Die träge Masse eines Körpers ist unveränderlich.

Das Gewicht eines Körpers ändert sich mit der Lage des Körpers zur Erde.

Wir hätten also besser getan, wir hätten nicht das Gewicht, sondern die Masse eines Körpers zur Einheit des physikalischen Maßsystems gewählt. Die wissenschaftlich betriebene Physik verfährt auch so. Sie hat nicht das Grammgewicht, sondern die Masse[1]) als Einheit zugrunde gelegt.

Sie nimmt als Grundlage an:

Die Einheit der Masse besitzt 1 cm^3 Wasser von 4^0 C.

Die Einheit der Masse heißt 1 Grammasse.

Die Einheit der Kraft ist die Kraft, die der Masse 1 Grammasse die Beschleunigung 1 cm in der Sekunde erteilt.

Diese Einheit der Kraft heißt 1 dyn.

Die Kraft, welche der Masse 1 Grammasse die Beschleunigung 981 cm/sec^2 erteilt, heißt 1 Grammgewicht.

Das Grammgewicht entspricht deshalb 981 dyn in Deutschland etwa, 978 dyn am Äquator, 983 dyn am Pol.

Die wissenschaftlich betriebene Physik muß ein Maßsystem haben, dessen Grundmaße unveränderlich sind. Für unsere Zwecke reicht das bisher von uns benutzte praktische Maßsystem aus. Wir haben uns nur zu merken:

Die Definition der Krafteinheit 1 Grammgewicht gilt für eine geographische Breite, bei der die Erdbeschleunigung 981 cm/sec^2 ist.

Die träge Masse ist dann gleich dem 981. Teil des in Gramm gemessenen Gewichtes des Körpers.

Die Gleichung

$$P = m \cdot a \text{ Gramm}$$

bleibt richtig, wenn P in Gramm, a in cm/sec^2 und m durch den 981. Teil des in Gramm gemessenen Körpergewichtes ausgedrückt wird.

§ 34. Potentielle und kinetische Energie

Ein Körper, der vermöge seiner erhöhten Lage die Fähigkeit besitzt, sich von selbst in Bewegung zu setzen, besitzt Energie der Lage oder potentielle Energie.

Setzt der Körper einen anderen Körper, der sich ihm entgegenstemmt, in Bewegung, so überträgt er das in ihm vorhandene Arbeitsvermögen auf diesen

1) Statt träger Masse sagt man auch kurz Masse.

Körper. Wird der hemmende Körper nicht in Bewegung gebracht, verliert aber der auftreffende Körper seine Bewegung, so entsteht Wärme. Die Energie der Lage des ersten Körpers wird also entweder in mechanische Arbeit oder in Wärme beim Auftreffen auf den zweiten Körper verwandelt.

Unbeantwortet ist bis jetzt die Frage geblieben, was aus der Energie der Lage wird, wenn der erste Körper nicht auf einen zweiten auftrifft. Wenn ein Körper die Höhe h frei durchfällt, so wird dabei eine Arbeit geleistet, die gleich der Abnahme der Energie der Lage des Körpers ist. Wenn ein Geschoß durch die Kraft der Pulvergase aus dem Lauf gestoßen wird, so wird dabei eine Arbeit geleistet, die gleich der Energie des Pulvers ist. Der frei fallende Körper und das Geschoß erlangen beide eine gewisse Geschwindigkeit, während sie vorher in Ruhe waren. Treffen sie aber nicht auf einen anderen Körper auf, so ist der Energiebetrag scheinbar verschwunden, denn er wird weder in mechanische Arbeit noch in Wärme umgewandelt. Wir wissen aber, daß jeder bewegte Körper von sich aus Arbeit leisten kann. Das Geschoß kann längere Zeit nach Verlassen des Laufes noch ein Brett durchbohren. Jeder bewegte Körper wird, einerlei auf welche Weise er in Bewegung geraten ist, beim Auftreffen auf einen anderen Arbeit auf diesen übertragen. Wir müssen also aus der Erfahrung darauf schließen, daß jeder bewegte Körper in seinem Bewegungszustand ebenso gut einen gewissen Energievorrat besitzt wie z. B. ein hoch gelegener Körper in seiner Lage. Wir stellen damit also fest, daß auch ein bewegter Körper mechanische Energie besitzt, und sagen:

Den Arbeitsvorrat, den ein bewegter Körper infolge seiner Bewegung besitzt, nennen wir Energie der Bewegung oder kinetische Energie.

Bewegungsenergie ist eine der Lagenenergie gleichwertige Form der mechanischen Energie. Wir kennen aus der täglichen Erfahrung Beispiele, wo ein bewegter Körper durch einen Stoß einen anderen Körper in erhöhte Lage bringt und ihm dabei Energie der Lage verleiht. Ein Beispiel für die Umwandlung von Bewegungsenergie in Lagenenergie und umgekehrt bietet das Pendel. Wird es aus seiner Ruhelage herausgehoben, bis es h cm über dem tiefsten Punkt schwebt, dann ist seine Energie der Lage $G \cdot h$. Denn die Kraft G hätte die Pendelkugel vom Gewicht G um die Höhe h heben müssen, damit das Pendel in diese Lage kommt. Läßt man die Kugel dann los, so fällt sie auf der Bahn, die das Pendel beschreiben kann. Diese Bahn geht durch den tiefsten Punkt, die Ruhelage. Das Pendel bleibt aber an dieser tiefsten Stelle nicht stehen, sondern schwingt darüber hinaus, und zwar so weit, daß es dieselbe Höhe wie vorher erlangt. Es besitzt dann wieder dieselbe Energie der Lage wie zu Anfang (Fig. 102). Zwischendurch war die Energie der Lage einmal vollkommen in Energie der Bewegung umgewandelt worden. Die Bewegung des Pendels zeigt also, wie die Umwandlung der beiden Arten der mechanischen Energie unter Erhaltung der Gesamtenergie vor sich geht. Allerdings gilt das Gesetz der Erhaltung der mechanischen Energie nur für Vorgänge, bei denen

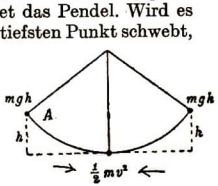


Fig. 102.

keine Reibung auftritt. Bei Reibungsvorgängen tritt an seine Stelle das allgemeine Energiegesetz.

Kann ein Körper vom Gewicht G die Strecke h frei durchfallen, so besitzt er die potentielle Energie $E_1 = G \cdot h$. Der Körper erfährt durch die Kraft G eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung, für die $G = m \cdot g$ ist. Ist der Körper um die Strecke h gefallen, so besitzt er statt der Energie der Lage, Energie der Bewegung von demselben Betrag. Man sieht aber dem Körper in diesem Augenblick nicht an, welche Strecke er durchfallen hat. Sein Bewegungszustand ist nur durch die augenblickliche Geschwindigkeit gekennzeichnet. Die Geschwindigkeit, die ein Körper erreicht, der die Strecke h frei durchfällt, ist aber $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$. Setzen wir daher die kinetische Energie E gleich der vorher vorhandenen potentiellen Energie E_1, so ergibt sich für sie

$$E = E_1 = G \cdot h = m \cdot g \cdot h.$$

Da $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ ist, kann in dieser Formel h ersetzt werden durch

$$h = \frac{v^2}{2 \cdot g},$$

und es ergibt sich für die kinetische Energie

$$\boxed{E = \tfrac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}.$$

Die kinetische Energie eines Körpers ist gleich dem halben Produkt aus der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit, die der Körper besitzt.

Beispiel: Ein Strom besitzt eine Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 m/sec. Durch das Flußbett fließen in 1 sec etwa 2000 l. Welche Energie könnte in jeder Sekunde gewonnen werden, wenn die gesamte Energie der Bewegung umwandelbar wäre? Die Masse ist rund $2 \cdot 1000$, die Geschwindigkeit 150 cm/sec, die Energie also

$$E = \tfrac{1}{2} \cdot 2000 \cdot 150 \cdot 150 \text{ in g, cm, sec gemessen}$$
$$E = 225 \text{ mkg/sec}$$
$$E = 3 \text{ PS}.$$

§ 35. Die Schwingungsbewegung

Unter einer Schwingungsbewegung verstehen wir eine hin- und hergehende Bewegung, wie sie z. B. das Pendel beschreibt.

Unter einem Pendel verstehen wir einen Körper, der, in einem Punkte festgehalten, um seine Ruhelage schwingt. Die einfachste Form des Pendels ist ein Faden, an dessen Ende ein Körper befestigt ist (Fig. 103).

Unter Schwingungsdauer verstehen wir die Zeit, die der schwingende Körper für einen Hin- und Hergang braucht.

Der Ausschlag aus der Ruhelage nach der Seite wird Amplitude oder Schwingungsweite genannt.

Aus Versuchen lassen sich für das Pendel folgende Gesetze ableiten:

a) Pendel von gleicher Länge haben die gleiche Schwingungsdauer, solange die Schwingungsweite einen Winkel von etwa 5^0 nicht überschreitet.

b) Ein Pendel besitzt bei sehr großer Schwingungsweite eine größere Schwingungsdauer als bei kleiner Schwingungsweite.

c) Die Schwingungsdauer ist unabhängig von der Masse des Pendels (vgl. freien Fall, Fall in der Fallrinne.

d) Die Quadrate der Schwingungszeiten ungleich langer Pendel verhalten sich wie die Pendellängen.

Fig. 103.

Auch bei einem eingespannten schwingenden Stab, bei einer schwingenden Spiralfeder läßt die Beobachtung erkennen, daß die Schwingungsdauer bei kleinen Schwingungsweiten unabhängig von der Schwingungsweite ist.

Aus diesem Grunde finden schwingende Körper Verwendung bei unseren Uhren. Der wesentlichste Bestandteil des Zeitmessers ist das Pendel oder die schwingende Spiralfeder (Unruhe) (Fig. 9). Sind Pendel und Unruhe so konstruiert, daß sie auch bei Temperaturschwankungen ihre Länge nicht verändern, so geben sie sehr genaue Zeitmesser ab.

Bei jedem Schwingungsvorgang tritt ein Zeitpunkt auf, an dem der schwingende Körper in seiner ganzen Ausdehnung in Ruhe ist, und einer, an dem alle Teile in der stärksten Bewegung begriffen sind. In Ruhe sind alle Teile des schwingenden Körpers in der Stellung des größten Ausschlags, in heftigster Bewegung beim Durchschwingen durch die Ruhelage des nichtschwingenden Körpers. Es findet also bei allen schwingenden Körpern fortgesetzt ein Austausch zwischen Energie der Lage und Energie der Bewegung statt. Durch Reibung im Körper selbst und an der umgebenden Luft usw. wird diese Energie allmählich umgewandelt, die Schwingung hört auf.

Ein schwingender Körper gibt Energie an seine Umgebung ab, wenn sich seine Schwingungsweite verringert.

Man kann auch durch einen einfachen Versuch zeigen, wie die Energie eines schwingenden Körpers auf einen anderen übertragen wird. Zwei Pendel von gleicher Länge werden nebeneinander aufgehängt und durch einen Faden an einer beliebigen Stelle verbunden. Der Faden wird mit einem Gewicht beschwert, das sehr klein gegen das Gewicht der beiden gleichen Pendelmassen ist. Dann wird das eine Pendel in Schwingung versetzt. Durch den Faden wird die Schwingung auf das andere Pendel übertragen. Nach einer Anzahl Schwingungen ist das erste Pendel zur Ruhe gekommen, während das zweite Pendel mit der ganzen Energie des ersten Pendels schwingt. Dann geht der Vorgang wieder rückwärts in gleicher Weise vor sich (Fig. 104).

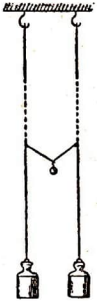


Fig. 104.

Dieser Versuch gelingt nur dann, wenn die Pendel gleiche Schwingungsdauer besitzen. Man sagt, die Pendel befinden sich in Resonanz und nennt die Übertragung: Übertragung durch Schwingungsresonanz.

Die kleine Kraft, die die zwei Pendel verbindet, nennen wir Koppelungskraft.

§ 36. Die Zentralbewegung

Ein in Bewegung befindlicher Körper beschreibt, solange ihn keine Kraft daran hindert, eine geradlinige Bahn.

Bewegen wir einen Körper auf einer Kreisbahn, indem wir ihn z. B. in eine Schleuder legen, so ergibt der Versuch, daß der Faden der Schleuder stets nach außen straff gespannt ist (Fig. 105). *In dem Augenblick, wo wir den Faden loslassen, bewegt sich der Körper in der Richtung der Tangente der Kreisbahn weg. Der Versuch lehrt also:*

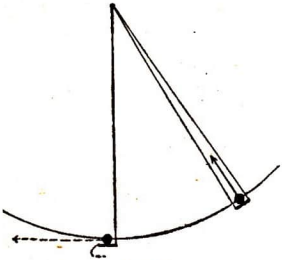


Fig. 105.

Soll sich ein Körper auf einer Kreisbahn bewegen, so muß er durch eine Kraft nach dem Mittelpunkt des Kreises gezogen werden. Der Körper selbst zieht in entgegengesetzter Richtung. Er äußert also eine Kraft, die von dem Zentrum weggerichtet ist.

Die Kraft, mit der sich ein kreisförmig bewegter Körper vom Zentrum zu entfernen sucht, nennen wir **Fliehkraft** oder **Zentrifugalkraft**[1]).

Die Zentrifugalkraft ist um so größer, je größer die Geschwindigkeit und die Masse des Körpers ist.

Versuche mit der Schwungmaschine erläutern diese Wirkung der Zentrifugalkraft noch näher. An Fäden und Bändern herabhängende Körper werden nach der Seite geschleudert und rotieren in horizontaler Lage. Wasser nimmt in einem rotierenden Gefäß eine gekrümmte Oberfläche an, die in der Mitte am tiefsten ist (Fig. 106). *An einem Modell aus leichtbeweglichen Stahlbändern kann man zeigen, wie sich ein rotierender Körper von geringer Starrheit wie etwa die Erde infolge der Zentrifugalkräfte abflacht* (Fig. 107). *Die Schleifenbahn zeigt das Wirken der Zentrifugalkraft.*

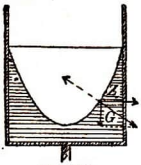


Fig. 106.

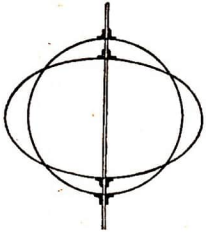


Fig. 107.

Verwendung findet die Zentrifugalkraft in der Technik:

a) in der Zentrifuge zur Butterbereitung; Absonderung des spez. leichteren Rahmes in der Mitte, Wasser an der Wand der Zentrifuge;

b) in der Trocknungszentrifuge der Spinnereien, Wäschereien und Färbereien, Ausschleudern des Wassers nach außen;

c) in der Zentrifugalpumpe. In der mit Wasser gefüllten Trommel wird durch das rotierende Schaufelrad das Wasser so stark nach außen und in das Steig-

1) centrum = Mittelpunkt, fugere = fliehen.

rohr geschleudert, daß in der Mitte ein luftverdünnter Raum entsteht, in den das Wasser einströmt (Fig. 108);

d) Schienen und Fahrbahn in Kurven müssen auf der Außenseite erhöht werden, damit das Fahrzeug nicht aus seiner Bahn geschleudert wird.

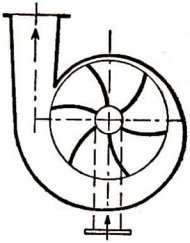


Fig. 108.

§ 37. Das Gravitationsgesetz

Die Erde bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 30 km/sec auf ihrer Bahn. Diese Bahn ist eine Ellipse, die nur wenig von einem Kreise verschieden ist. Der Radius dieses Kreises beträgt 150000000 km. Im einen Brennpunkt der Ellipse befindet sich die Sonne.

Außer der Erde bewegen sich noch sieben andere Himmelskörper in Ellipsen um die Sonne: Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

Warum verlassen diese mit ungeheurer Geschwindigkeit auf einer gekrümmten Bahn eilenden Körper nicht diese Bahn und fliegen in der Richtung der Tangente davon, wie wir das bei den irdischen Körpern soeben erfahren haben? Warum entfernt sich der Mond, der einen mittleren Abstand von 384000 km von der Erde hat und innerhalb eines Monats einmal um die Erde in dieser großen Bahn herumläuft, nicht infolge der Zentrifugalkraft von der Erde?

Die Antwort hat der englische Physiker Newton gegeben. Sie lautet:

a) Alle Körper ziehen sich gegenseitig an.

Die Erde zieht die irdischen Körper an, so daß sie alle nach ihrem Mittelpunkt zu fallen bestrebt sind. Die Erde zieht den Mond an, der Mond aber auch die Erde. Die Sonne zieht die Erde an, die Erde die Sonne. Jeder Körper zieht jeden anderen Körper an.

b) Die Kraft, mit der sich zwei Körper gegenseitig anziehen, ist proportional dem Produkt der beiden Massen der Körper und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung der beiden Körper.

Nach diesem Gesetz ist die Kraft, mit der die Erde den Mond anzieht, in der Entfernung des Mondes genau so groß wie die Zentrifugalkraft, die den Mond nach außen treibt. Ebenso ist es mit den Anziehungskräften zwischen der Sonne und den Planeten und den Zentrifugalkräften der Planeten.

Würden die Planeten und der Mond nicht eine so große Geschwindigkeit und damit eine entsprechende Zentrifugalkraft besitzen, so würde der Mond nach der Erde fallen und die Planeten nach der Sonne, genau so wie ein Stein auf der Erde nach unten fällt. Der leichtere Körper bewegt sich fallend nach dem schwereren, oder richtiger beide aufeinander zu.

Daher wird dieses Gesetz das Gesetz der allgemeinen Schwere oder das Gravitationsgesetz genannt[1]).

Mit Hilfe dieses Gesetzes kann man die Massen der Himmelskörper berechnen. Aus diesem Gesetz kann man durch mathematische Methoden auch die Gesetze

1) gravis = schwer.

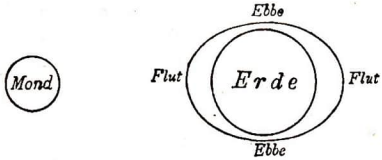


Fig. 109.

der Planetenbewegung, die der deutsche Astronom Kepler zuerst entdeckt hat, ableiten.

Aus dem Gravitationsgesetz erklärt sich auch die Erscheinung der Ebbe und Flut (Fig. 109).

Der Mond zieht die Erde genau so stark an wie die Erde den Mond. Während die beiden freibeweglichen Himmelskörper um die Sonne laufen, schwingen sie 12 mal im Kreise um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Alle Teile der Erde sind daher Zentrifugalkräften ausgesetzt, die nach der vom Monde abgewandten Seite wirken. Leichtbewegliche Flüssigkeiten werden dabei überall auf der Erde mit der gleichen Kraft nach außen geschleudert. Andererseits zieht der Mond die Teile der Erde, die ihm näher sind, stärker an als die entfernt liegenden. Zentrifugalkräfte und Anziehungskräfte halten sich in der mittleren Erdentfernung das Gleichgewicht. Auf der dem Monde zugewandten Seite überwiegen daher die Anziehungskräfte, auf der abgewandten Seite die Fliehkräfte.

So kommt es, daß das Meerwasser an den Stellen, die dem Monde nahe oder fern liegen, höher steht als an den Orten, für welche der Mond im Horizont steht. Die Meeresoberfläche ist elliptisch nach dem Monde hin verzerrt. Ein bestimmter Ort auf der Erde wandert daher bei der täglichen Rotation die Erde um sich selbst zweimal durch das Gebiet hohen und zweimal durch das Gebiet niedrigen Wasserstandes. Innerhalb 24 Stunden herrscht an dem Orte zweimal hoher Wasserstand (Flut) und zweimal niedriger Wasserstand (Ebbe).

Ebbe und Flut heißen die Gezeiten. Im offenen Meer beträgt der Unterschied zwischen Ebbe und Flut nur etwa 60 cm. In den Häfen bis zu 10 m. Das kommt daher, daß das mit der Flutwelle steigende Wasser sich in den Flußmündungen staut. Die in den Häfen ankommende Flutwelle trifft meist sehr viel später ein, als der Mond am höchsten oder tiefsten steht. Die Verspätung, die oft viele Stunden beträgt, nennt man Hafenzeit.

Auch die Sonne ruft auf der Erde eine Gezeitenwirkung hervor. Sie ist nicht so bedeutend wie die Wirkung des Mondes. Wirken beide Himmelskörper in demselben Sinne (bei Neu- und Vollmond), so herrscht Springflut, wirken sie senkrecht zueinander (bei Halbmond), so herrscht Nippflut. Sturmflut ist eine Springflut, bei der der Sturm das Stauen des Wassers durch die Richtung, aus der er weht, noch unterstützt.

§ 38. Geschichtliche Entwicklung

Über die Gesetze der Bewegung hatte man im Altertum nur sehr unrichtige Vorstellungen. Bis vor wenigen Jahrhunderten glaubte man, leichte Körper fielen langsamer zur Erde als schwere. Die Zunahme der Geschwindigkeit beim freien Fall erklärte man durch die Annahme, daß die Luft dem fallenden Körper fortgesetzt Stöße in seiner Bewegungsrichtung erteile.

Eine Wandlung in diesen Anschauungen trat erst ein, nachdem am Ende des

16. Jahrhunderts der italienische Gelehrte Galileo Galilei durch planmäßige Versuche Klarheit in die tatsächlichen Vorgänge gebracht hatte. An der Fallrinne studierte er die Fallbewegung. Von dem schiefen Turm in Pisa ließ er Körper fallen und prüfte nach, ob ein Unterschied in der Fallzeit zwischen leichten und schweren Körpern bestünde. Die Schwingungen der Kronleuchter des Domes zu Pisa sollen ihn angeregt haben, die Pendelschwingungen experimentell zu erforschen. Galilei war der erste Naturforscher, der auf die überragende Bedeutung des Experimentes für die Richtigkeit der Naturbeschreibung hinwies. Er ist mit seinen Forschungsergebnissen der Bahnbrecher für die moderne Naturwissenschaft geworden.

Etwa ein halbes Jahrhundert später hat der Holländer Huygens die Ergebnisse Galileischer Forschung über die Bewegungslehre erweitert. Er hat besonders die Pendelbewegung und die Zentralbewegung untersucht und hat dabei nicht nur die theoretischen Gesetze festgestellt, sondern auch, wie wir oben gesehen haben, die erste genau gehende Uhr, die Pendeluhr, und die erste Federuhr geschaffen.

Bis zum 15. Jahrhundert haben nur wenige Menschen daran gezweifelt, daß die Erde im Mittelpunkt der Welt stünde, und daß sich Sonne und Sternhimmel um sie herumbewegten. Erst im ausgehenden Mittelalter wurden Bedenken laut, die durch astronomische Entdeckungen jener Zeit verstärkt wurden. Im Jahre 1543 erschien eine kleine Schrift von dem Domherrn Kopernikus in Frauenburg, in der dieser die Bewegungen der Gestirne am Himmel durch die Annahme erklärte, daß die Erde sich mit den Planeten in Kreisen um die Sonne bewege. Diese Lehre faßte Fuß und wurde von Gelehrten wie Galilei, Kepler und anderen weiterverbreitet. Dem deutschen Astronomen Johannes Kepler gelang es in zehnjähriger schwieriger Arbeit, aus umfangreichem Beobachtungsmaterial über die Bewegung der Planeten die Gesetze zu finden, nach denen die Planetenbahnen Ellipsen sind. Die Gesetze stellten ferner fest, daß Geschwindigkeit und Umlaufszeit der Planeten in bestimmtem Verhältnis zu ihrer Bahn stehen. Diese wichtige Entdeckung geschah um das Jahr 1610.

Gegen Ende des 17. Jahrhunderts hat dann der englische Gelehrte Isaak Newton die erste zusammenfassende Darstellung der Mechanik gegeben, in der er schon streng zwischen Masse und Gewicht unterschied. Im Jahre 1682 gelang es ihm endlich, durch Rechnung das Gesetz der Gravitation zu finden, das die von Kepler ausgesprochenen Gesetze der Bewegung der Planeten am Himmel in der einfachsten Weise erklärte.

VII. Der Schall

§ 39. Das Wesen des Schalles

Der Schall wird aufgenommen von dem Ohr, ausgebreitet durch die Luft und erregt durch Körper, die stoßartige Bewegungen ausführen.

Dies wissen wir aus der im täglichen Leben gewonnenen Erfahrung. Bei genauerer Beobachtung ergibt sich:

1. Die Ausbreitung des Schalles. *Bringt man eine Glocke unter den Rezipienten der Luftpumpe und saugt die Luft aus, so dringt der Schall nicht nach außen.*

Dieser Versuch gelingt nur dann, wenn die Glocke durch eine weiche Unterlage von dem Teller des Rezipienten getrennt ist. Berühren die festen Teile der Glocke den Rezipienten, so dringt auch der Schall nach außen, selbst wenn die Luft sehr stark verdünnt ist. Das Ticken einer Taschenuhr ist auf größere Entfernung vernehmbar, wenn sie auf einem festen Körper ruht (z. B. Experimentiertisch), und man das Ohr auf diesen Körper bringen kann. Zwei Steine, die man unter Wasser gegeneinander schlägt, verursachen einen sehr weit vernehmbaren deutlichen Schall. Der Erdboden, die Schienen der Eisenbahn begünstigen die Übertragung des Schalles auf weite Entfernungen. Aus allen Beobachtungen ergibt sich:

a) Der Schall kann sich nicht durch den luftleeren Raum ausbreiten. Er breitet sich nur durch Körper aus, die sich zwischen Schallquelle und Ohr befinden.

b) Feste und flüssige Körper leiten den Schall besser als die Luft. Am schlechtesten leiten den Schall lockere, unelastische Stoffe.

2. Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles. Zur Fortpflanzung des Schalles ist eine gewisse Zeit erforderlich. Man macht diese Erfahrung, wenn man z. B. die Zeit mißt, die von dem Augenblick an vergeht, wo man das Aufleuchten eines abgefeuerten Geschützes sieht, bis zu dem Augenblick, wo der Schall ins Ohr trifft. Kennt man die Entfernung, so ergibt sich daraus die Geschwindigkeit des Schalles. Der Donner ist der durch den Blitz hervorgerufene Schall. Man kann beim Gewitter beobachten, daß die zeitliche Differenz zwischen Blitz und Donner um so größer ist, je weiter das Gewitter entfernt ist.

Man hat durch viele Versuche festgestellt:

Die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft beträgt 340 m/sec.

Die Geschwindigkeit des Schalles in Wasser ist etwa 1450 m/sec.

Die Geschwindigkeit des Schalles in elastischen Metallen beträgt zwischen 3000 und 5000 m/sec.

3. Die Richtung der Ausbreitung des Schalles in der Luft. Im allgemeinen breitet sich der Schall in der Luft nach allen Seiten aus. Bäume, Häuser, Berge hemmen aber die Ausbreitung des auf sie treffenden Schalles. Meist wird dabei der Schall zurückgeworfen und vom Ohr als Echo vernommen. Auch in einem größeren Zimmer kann man bemerken, wie der Schall von der Wand zurückgeworfen wird. Man vernimmt ihn als Nachhall, d. h. so kurz auf den gesprochenen Laut folgend, daß er nur etwas nachklingt. Durch das Sprachrohr kann der Schall in einer bestimmten Richtung zusammengefaßt werden. Durch einen Hohlspiegel wird der Schall in bestimmter Richtung weitergeleitet, wenn sich der Schallerreger in der Mitte nahe vor dem Spiegel befindet. Eine Glasscheibe z. B. vermag den Schall, der aus einem Standglas kommt, abzulenken.

4. Schallerreger. Ein Schall, den wir Knall nennen, kann in der Luft erzeugt werden durch das Aufeinanderschlagen zweier Steine, den Schlag eines Beiles auf Holz oder die Explosion des Pulvers in einem Gewehr.

Das Rattern eines Wagens auf dem Pflaster, die in einer Werkstätte auftretenden Schallerregungen bezeichnen wir als Geräusch.

Schallerregung, wie sie von einer eingespannten Feder, einer frei aufgehängten Metallplatte, einer Glocke, einer Stimmgabel, einer gespannten Saite, einer Pfeife, der menschlichen Stimme ausgesandt wird, bezeichnen wir als Ton.

5. Schallempfänger. Schallempfänger ist das Ohr. Das Ohr ist nach außen durch eine dünne bewegliche Haut abgeschlossen, die Trommelfell heißt. Über die Vorgänge, die bei dem Auftreffen des Schalles auf das Trommelfell eintreten, können wir uns Aufschluß verschaffen, wenn wir den Schall, der von irgendeinem Schallerreger erzeugt wird, in folgendem Apparat aufnehmen (Fig. 110).

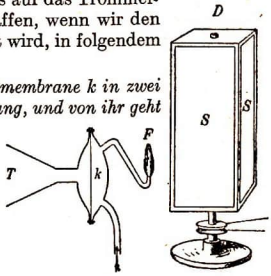


Fig. 110.

Eine Kapsel ist in der Mitte durch eine Gummimembrane k in zwei Teile geteilt. In die eine Hälfte mündet die Gasleitung, und von ihr geht eine kurze Leitung zu einem Brenner, der das in die rechte Kapselhälfte einströmende Gas in einer kleinen langgezogenen Flamme brennen läßt. Die linke Hälfte ist durch einen Schalltrichter T mit der äußeren Luft verbunden. Dieser Teil des Apparates gleicht also Ohrmuschel und Trommelfell. Stellt man neben der Flamme einen Spiegel S auf, der in rasche Umdrehung versetzt werden kann, so nimmt man die Flamme als ein breit auseinander gezogenes Band wahr. Trifft aber ein Knall oder ein Ton oder ein Geräusch auf den Empfangstrichter, so nimmt man wahr, wie die Flamme zusammenzuckt.

Das Zusammenzucken ist einmalig bei einem Knall.

Das Zusammenzucken ist ganz regelmäßig und von gleicher Stärke bei einem Ton, der in gleicher Stärke anhält.

Das Zusammenzucken zeigt keine Regelmäßigkeiten bei einem Geräusch.

Der Vorgang erklärt sich so: Das Zusammenzucken der Flamme ist dadurch verursacht, daß der Druck des Gases in der rechten Kapselhälfte in diesem Augenblick geringer geworden ist. Dies kann nur dadurch hervorgerufen sein, daß sich die Membrane nach außen bewegt hat. Bei hochbrennender Flamme muß die Membrane zurückgeschwungen sein. Das Flammenbild zeigt also die außerordentlich rasch erfolgenden Schwingungen der Membrane an, die nur durch den auftreffenden Schall verursacht sein können. Da der Schall durch die Luft übertragbar ist, müssen die Schwingungen in der Luft ausgebildet sein. Das ist sehr leicht erklärlich, weil die Schallerreger Körper sind, die der Luft Stöße erteilen. Besonders auffällig ist das bei tönenden Körpern. Tatsächlich zeigt das Flammenbild bei Tönen auch die Schwingungen am deutlichsten.

Die Schwingung muß, da sie hin- und hergeht, an Ort und Stelle erfolgen. Sie muß von den kleinsten Teilchen der Luft ausgeführt werden. Es ergibt sich also aus diesem Versuch:

Die Schallempfindung führt auf eine schwingende oder stoßartige Bewegung der einzelnen Luftteilchen zurück.

Der Ton ist eine regelmäßig erfolgende Schwingung der Luftteilchen.

Ein Knall ist ein einmaliger durch die Luft ausgebreiteter Stoß.

Ein Geräusch ist eine unregelmäßige Folge von Stößen in der Luft.

Diese Auffassung von der Natur des Schalles erklärt nun auch, warum der Schall sich in elastischen festen und flüssigen Körpern besonders gut und schnell ausbreitet. Stöße, die vom Schallerreger auf den Körper ausgeübt werden, werden durch starke elastische Kräfte schnell und kräftig von Teilchen zu Teilchen weitergegeben.

§ 40. Tonerregung

1. Der musikalische Ton. Schwingungen der Luft, bei denen die Teilchen regelmäßig und mindestens 20 bis 30 mal in einer Sekunde hin- und hergehen, bezeichnen wir als musikalische Töne. Erfolgen die Schwingungen mehr als 8000 mal in der Sekunde, so nimmt sie unser Ohr nicht mehr als musikalischen Ton wahr.

Ein Ton heißt höher als ein anderer, wenn die Zahl seiner Schwingungen pro Sekunde größer ist.

Der Ton, der durch 435 Schwingungen in der Sekunde erzeugt ist, wird in der Musik als eingestrichenes a bezeichnet.

Ein Ton, dessen Schwingungszahl doppelt so groß ist wie die Schwingungszahl eines anderen, heißt die Oktave zu diesem Ton.

Die Tonleiter der Musikinstrumente enthält Töne, die nach folgender Skala der Schwingungszahlen angeordnet sind:

....	c	d	e	f	g	a	h	nächste Oktave	c′	d′	....
	24	27	30	32	36	40	45		48	54	

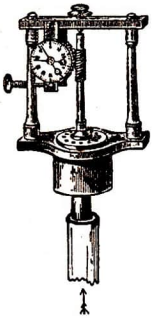


Fig. 111.

In derselben Zeit, in der c 24 Schwingungen ausführt, müssen die Töne d, e, f usw. 27, 30, 32 usw. Schwingungen machen.

Mit der Zahnradsirene oder der Lochsirene kann man den experimentellen Beweis dafür erbringen. Man bestimmt die Umlaufsgeschwindigkeit der Sirene mit einem Zählwerk und läßt nacheinander die Töne von Zahn- oder Lochreihen erzeugen, deren Zähne oder Löcher sich der Zahl nach wie die Schwingungszahlen verhalten (Fig. 111).

Fig. 112 gibt die Klaviatur des Klaviers wieder.

Zwischen die Töne, die oben genannt sind (weiße Tasten), sind bei den Musikinstrumenten noch halbe Töne eingeschoben (schwarze Tasten) und zwar im ganzen fünf halbe Töne:

cis zwischen c und d, dis zwischen d und e,
fis zwischen f und g, gis zwischen g und a,
ais zwischen a und h.

Im ganzen enthält also eine Oktave der Tonleiter 12 Töne. Ein Klavier umfaßt etwa 7 ganze Oktaven in seiner Klavitur.

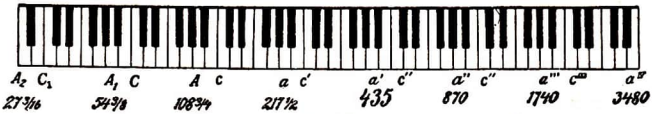


Fig. 112.

Für Konsonanz (Wohlklang zweier Töne) und Dissonanz (Mißklang) sind in der Regel die Verhältnisse maßgebend, in denen die Schwingungszahlen der beiden zusammenklingenden Töne zueinander stehen. Konsonanz herrscht, wenn die Schwingungszahlen der Töne in einem einfachen, durch kleine ganze Zahlen (kleiner als 7) ausdrückbaren Verhältnis zueinander stehen, z. B. $c : c' = 1 : 2$, $c : g = 2 : 3$, $c : f = 3 : 4$, $c : e : g = 4 : 5 : 6$ usw.; Dissonanzen sind z. B. $c : d = 8 : 9$ oder $c : h = 8 : 15$.

2. Tonerreger. Tonerreger sind:

a) Elastische Stäbe. Einseitig eingespannte Stäbe schwingen je nach ihrer Länge mit höherem oder tieferem Ton. Je länger das frei stehende Ende des Stabes ist, desto tiefer ist der Ton (Fig. 113).

Fig. 113.

Fig. 114.

Fig. 115.

Ein in der Mitte eingespannter Stab kann dadurch zum Tönen gebracht werden, daß man ihn mit einem Lederlappen in seiner Längsrichtung reibt. Die Teilchen des Stabes schwingen dann in der Richtung des Stabes (Fig. 115).

Ein frei liegender Stab gibt seinen tiefsten Ton, wenn er so schwingt, wie dies Fig. 114 andeutet.

Die Stimmgabel ist ein frei schwingender Stab. Sie schwingt mit ihren beiden Enden gegeneinander und auseinander. Aus Fig. 116 ist ersichtlich, welche Stellen der Gabel bei der Schwingung in Ruhe bleiben. Die Höhe des Tones der Stimmgabel hängt von der Dicke und Länge der Gabel ab.

Fig. 116.

b) Elastische Platten. An schwingenden Metallplatten kann man zeigen, daß ganz bestimmten Tönen der Platte bestimmte Schwingungen der einzelnen Teile der Platte entsprechen. Streut man Sand auf die horizontal eingespannte Platte, so bleibt er da liegen, wo die Platte beim Tönen nicht schwingt. Es entstehen Figuren, die man Chladnische Klangfiguren nennt (Fig. 117).

Fig. 117.

Glocken schwingen ähnlich wie Platten. Man kann die Schwingung der Glocken durch leicht bewegliche Pendel, die die Wand der Glocke gerade berühren, nachweisen.

c) Straff gespannte Saiten. Die Schwingungszahl einer Saite hängt von der Länge, der Dicke, dem Material und von der Spannung der Saite ab. Bei gleichbleibender Spannung ist die Schwingungszahl nur abhängig von der Länge der Saite. Stehen die Längen im Verhältnis der obengenannten Zahlen 24, 27, 30 usw., so geben sie die Töne der Tonleiter.

d) Pfeifen. Bei der Lippenpfeife wird der Ton durch eine Schneide erzeugt, gegen die ein Luftstrom geblasen wird. Bei der Zungenpfeife setzt der Luftstrom ein kleines Stäbchen in schwingende Bewegung. Die Töne der Pfeifen werden durch Lufträume, die bestimmte Länge besitzen, verstärkt (siehe § 41).

3. Obertöne. Der tiefste Ton, den ein Tonerreger erzeugen kann, wird der Grundton genannt. Bei allen Tonerregern entstehen neben dem Grundton noch höhere Töne, die Obertöne heißen.

Für eine schwingende Saite ist der Grundton der Ton, bei dem sie in der Mitte am heftigsten schwingt und an den beiden Enden ruht. Legt man in der Mitte den Finger leicht auf und schlägt die Saite wieder an, oder legt man auf die angeschlagene Saite den Finger in der Mitte auf, so tönt die Saite in einem Ton, der die Oktave zum Grundton ist. Berührt man sie auf ein Drittel der Länge, so entsteht ein Ton mit dreifacher Schwingungszahl, bei ein Viertel der Länge mit vierfacher Schwingungszahl usw. Die Saite zeigt dann ruhende Stellen in der Mitte oder nach jedem Drittel, jedem Viertel der Länge usw. Dies kann man durch kleine Papierreiter, die man auf die Saite setzt, nachweisen (Fig. 118). Die ruhenden Stellen heißen Schwingungsknoten, die Stellen heftigster Bewegung Schwingungsbäuche. Die höheren Töne bezeichnet man als Obertöne.

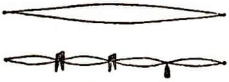


Fig. 118.

4. Der Klang. Unter dem Klang eines Musikinstrumentes versteht man die Gesamtheit der Töne, die das Instrument beim Anschlagen eines Tones erklingen läßt. Der Klang setzt sich also aus dem Grundton und allen mittönenden Obertönen zusammen. Der Ton eines Musikinstrumentes ist nie ein reiner Ton in dem Sinne, daß er nur eine einzige Schwingungszahl enthielte.

Ebensowenig sind die Töne der menschlichen Stimme nur Töne einer einzigen Schwingungszahl. Eine Aufnahme mit dem rotierenden Spiegel und der Flammenkapsel zeigt, daß die Vokale sehr verschiedene Schwingungen enthalten. Die Flamme zeigt Längenänderungen, die durch die Kurven von Fig. 119 angedeutet sind, die von oben nach unten für die Vokale a, u und i gelten.

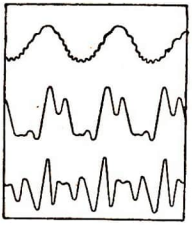


Fig. 119.

§ 41. Tonempfang

1. Resonatoren. *Schlagen wir eine Stimmgabel an und stellen in ihre Nähe eine zweite Stimmgabel mit genau dem gleichen Eigenton, so zeigt sich, daß der Ton von der ersten Stimmgabel auf die zweite durch die Luft übertragen wird* (Fig. 120). *Halten wir über eine Röhre g, deren Luftraum durch Wasser oder einen verschiebbaren Kork länger oder kürzer gemacht werden kann* (Fig. 121), *eine Stimmgabel, so ertönt die Luftsäule in der Röhre bei einer für den Ton der Stimmgabel charakteristischen Länge L sehr deutlich.*

In beiden Fällen wird die Schwingung des Tonerregers von dem Tonempfänger nur bei genauer Übereinstimmung zwischen Eigenton des Tonerregers und Tonempfängers übertragen. Diese Übereinstimmung läßt sich an der Luftsäule dadurch nachweisen, daß man den Ton einer geschlossenen Pfeife von gleicher Länge damit vergleicht. Beide Versuche erinnern an die Übertragung von

Schwingungsenergie von einem Pendel auf ein anderes gleichlanges Pendel. So gering auch der Anstoß der durch die Luft dringenden Stöße des Tonerregers ist, er reicht hin, um den Empfänger in Schwingung zu versetzen, wenn die Stöße im gleichen Takte erfolgen, wie der Empfänger von sich aus schwingen würde.

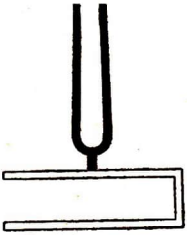


Fig. 120.

Wir nennen diese Übertragung zwischen zwei Tonerregern von gleicher Eigenschwingungsdauer Resonanz und können sagen:

> Ein Ton wird durch Resonanz vom Tonerreger auf einen Tonempfänger übertragen, wenn dieser die gleiche Eigenschwingungsdauer wie der Tonerreger besitzt.

Fig. 121.

Solche Tonempfänger nennen wir Resonatoren. Ein Resonator hebt aus einer ganzen Anzahl von Tönen, die auf ihn treffen, den Ton heraus, der ihm eigentümlich ist. Dazu eignen sich Glasgefäße, wie sie Fig. 122 darstellt, sehr gut. Sie sind stets auf einen einzigen Ton abgestimmt.

2. Allgemeine Resonanz. *Stellen wir eine angeschlagene Stimmgabel auf ein leichtes Brett, einen Kasten oder den Tisch, so hört man den Ton mit sehr viel größerer Deutlichkeit. Das Eintreten der Verstärkung des Tones ist aber nicht abhängig von der Höhe des Tones. Vielmehr werden alle Töne von einem Kasten aus Holz verstärkt.*

Fig. 122.

Hier zeigt also der Holzkasten eine Resonanzerscheinung, die über die Resonanz einer Stimmgabel hinausgeht. Allerdings fehlt dem Kasten die Fähigkeit, aus einem Gemisch von Tönen einen bestimmten Ton herauszuheben.

Diese Art der Resonanz, die also nur dem Verstärken, nicht dem Aufnehmen eines Tones dient, heißt allgemeine Resonanz und dient bei den Musikinstrumenten zum Verstärken des Tones der Saiten. Holzteile und Hohlräume der Geige, der Zither, des Klaviers zeigen diese Eigenschaft.

3. Membranen. Ist der Körper so leicht, daß er durch die Schallstöße der Luft sehr stark bewegt wird, so ist er nicht nur geeignet, einen bestimmten Ton, sondern alle Töne, die auf ihn treffen, wiederzugeben.

Ein solcher Körper ist die Membrane. Sie besteht aus einem dünnen Häutchen oder einer dünnen Scheibe aus irgendeinem festen Stoff. Eine Membrane macht die raschen Schwingungen der menschlichen Stimme mit. Sie findet z. B. im Telephon sowohl im Sprechapparat als auch im Hörer Verwendung. Das Trommelfell ist eine dünne Membrane, die die Schallstöße auf das innere Ohr überträgt.

4. Das Dopplersche Prinzip. Eine Tonquelle sendet in das Ohr eines Beobachters einen Ton, der dem Beobachter höher erscheint, wenn sie sich ihm nähert, einen scheinbar tieferen Ton, wenn sie sich von ihm entfernt.

Diese Beobachtung kann man bei einem vorüberfahrenden Radfahrer machen, der die Klingel läuten läßt, ebenso wie im Zimmer mit einer durch einen Schlauch zum Tönen gebrachten Flöte, wenn man sie im Kreise herumschwingt.

Die Erscheinung erklärt sich so: Die nahende Tonquelle schickt mehr Schallstöße in 1 sec ins Ohr des Beobachters, weil jeder neue Stoß einen kürzeren Weg als der vorangegangene zum Ohr hat; aus demselben Grund gelangen von der wegeilenden Tonquelle in 1 sec weniger Schallstöße ins Ohr als bei gegenseitig unveränderter Lage. Das Ohr hört also einen höheren Ton beim Nähern, einen tieferen beim Entfernen. Ist der Ton bekannt, so kann man aus der Tonänderung auf die Geschwindigkeit der Tonquelle schließen.

Dieses Naturgesetz heißt Dopplersches Prinzip. Es gilt nicht nur für den Schall, sondern überall, wo eine Folge von schnell aufeinanderfolgenden Stößen aufgenommen wird. Es ist besonders für die Erforschung der Geschwindigkeit der Gestirne wichtig gewesen, denn auch das Licht zeigt ähnliche Eigenschaften wie der Schall bei der Aussendung und Aufnahme.

§ 42. Sprechen und Hören

1. Das Sprechorgan. Das menschliche Sprechorgan besteht aus zwei elastischen, im Kehlkopf sitzenden Stimmbändern, die sich beim Sprechen anspannen und in der Ruhe der Luft den Zutritt durch die Stimmritze in die Lunge gestatten. Die aus den Lungen gepreßte Luft setzt die Stimmbänder in Schwingungen. Gaumen und Nasenhöhle wirken als Resonanzräume. Zunge, Lippen und Zähne beteiligen sich an der Bildung der Laute.

2. Das Hörorgan. Die Ohrmuschel fängt den Schall auf und leitet ihn zum Trommelfell *T* (Fig. 123), einem dünnen Häutchen, das den äußeren Gehörgang abschließt. Innen übertragen drei Gehörknöchelchen (Hammer *H*, Amboß *A* und Steigbügel *St*) die Schwingungen des Trommelfelles auf eine zweite dünne Haut, das ovale Fenster, das zum inneren Ohr führt. Dieses aus Vorhof D, Bogengängen *K* und Schnecke *S* bestehende Gebilde ist mit einer Flüssigkeit gefüllt. Die Schnecke enthält eine teils knöcherne, teils häutige Scheidewand, auf der das Cortische Organ sitzt. Dieses enthält bis zu 5000 Fasern verschiedener Dicke und Länge, in denen die Gehörnerven enden. Die Fasern sprechen durch Resonanz auf die Schwingungen an, die in der Flüssigkeit des inneren Ohres vom ovalen Fenster aus erregt werden.

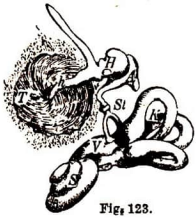


Fig. 123.

Durch die sogenannte Eustachische Röhre steht das Ohr in Verbindung mit dem Munde.

3. Der Phonograph. Spricht man gegen eine leicht bewegliche Membrane, so schwingt diese im Takte der Schallstöße. Verbindet man die Membrane mit einem leicht beweglichen Stift, so kann man durch diesen Stift die Schallstöße in eine Scheibe von Wachs eingraben lassen, die man unter dem Stift fortbewegt. Dadurch wird die Art der Schwingung der Nadel dauernd fixiert. Läßt man umgekehrt eine Nadel, die mit einer Membrane verbunden ist, auf dieser eingegrabenen Linie gleiten, während man die Platte wieder vorüberbewegt, so

wird die Nadel auf die Membrane die gleichen Schwingungen wie bei der Aufnahme übertragen. Die Membrane wird dann in denselben Schwingungen ertönen, die bei der Aufnahme vorhanden waren. Auf dieser Wirkungsweise beruht der Phonograph oder das Grammophon.

§ 43. Geschichtliche Entwicklung

Die Gesetze der Schwingungen der Saiten und der Tonleiter sind schon im Altertum bekannt gewesen.

Wissenschaftlich hat den Schall zuerst der Philosoph Bacon um 1600 erforscht. Er hat unterschieden zwischen Schall und Ton und zwischen der Tonerregung und der Tonfortpflanzung. Ein Schüler Galileis, Gassendi (um 1630), hat zuerst die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft durch Messung bestimmt. Um 1670 hat der Engländer Watson das Sprachrohr erfunden.

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts hat die Lehre vom Klang durch die beiden deutschen Physiker Ohm und Helmholtz ihre Ausgestaltung erfahren.

Der Phonograph ist eine Erfindung des amerikanischen Technikers Edison aus dem Jahre 1875.

VIII. Magnetismus

§ 44. Die Eigenschaften magnetischer Körper

Ein Eisenstab, der leicht bewegliche Eisenteilchen anzieht, die in seine Nähe kommen, heißt magnetisch.

In der Natur finden sich magnetische Körper als Magneteisenstein. Nur Stahl besitzt die Eigenschaft, den magnetischen Zustand dauernd und stark beizubehalten, wenn dieser in ihm erregt ist. Eisen zeigt starke magnetische Eigenschaften, solange es mit einem Magneten in Berührung steht. Es ist aber unmagnetisch, wenn der Magnet aus seiner Nähe entfernt wird.

Tauchen wir einen Stahlstab in Eisenfeilspäne, so bleiben in der Umgebung der Enden des Stabes die Eisenteilchen haften. An diesen Stellen ist die magnetische Kraft des Stahlstabes besonders groß.

Die Stellen größter magnetischer Wirkung heißen die Pole des Magneten.

Die Kraftwirkung der Pole kann durch die Menge des Eisenfeilichts, die der Magnet tragen kann, verglichen werden.

Beide Pole des Magneten wirken gleich stark.

Hängen wir einen Magnetstab frei beweglich auf, so schwingt er hin und her und stellt sich schließlich in eine Richtung, nahezu die Nordsüdrichtung, ein. Der eine Pol zeigt dauernd nach Norden, der andere nach Süden; dreht man den Magneten um, so geht dennoch der Pol nach der Nordseite, der vordem nach Norden gezeigt hat.

Die Pole eines Magneten erweisen sich verschieden hinsichtlich der Richtung, die sie einnehmen, wenn der Magnet frei beweglich ist. Wir nennen den nach Norden zeigenden Pol den Nordpol, den nach Süden zeigenden Pol den Südpol des Magneten.

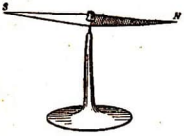


Fig. 124.

Ein in der Mitte auf einer Nadel sitzender, freibeweglicher Magnet, der (Fig. 124) an den beiden Enden gewöhnlich zugespitzt ist, wird als Magnetnadel bezeichnet.

Nähert man dem Nordpol einer Magnetnadel einen Nordpol, so erfolgt Abstoßung, nähert man ihm einen Südpol, so erfolgt Anziehung. Beim Südpol erzeugt der Südpol Abstoßung und der Nordpol Anziehung. Es ergibt sich also:

Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an.

Ein Magnetstab läßt sich verbiegen, ohne daß er seine magnetischen Eigenschaften verliert.

Einen zu Hufeisenform gebogenen Magnet nennt man einen Hufeisenmagnet. In dieser Form behält er den Magnetismus am besten auf die Dauer bei, besonders wenn man ihn ein Stück Eisen dauernd anziehen läßt.

Fig. 125.

Trennt man aber die Magnetpole, indem man den Magnet zerschneidet, so erweisen sich die beiden Stücke des Stabes wieder als Magnete mit zwei Polen (Fig. 125).

Man kann die Pole eines Magneten nicht trennen. Jedes Stück eines Magneten ist wieder ein vollständiger Magnet.

Ein unmagnetischer Stahlstab kann dadurch magnetisch gemacht werden, daß man ihn mit einem Magneten der Länge nach bestreicht und zwar immer mit demselben Pol in gleicher Richtung. An dem Ende, an dem die Bewegung aufhört, entsteht der entgegengesetzte Pol zu dem Pol, der den Magnetismus überträgt. Der erzeugende Magnet verliert dabei nichts von seinem Magnetismus. Dieser Versuch legt die Annahme nahe:

Der magnetische Zustand des Stahls besteht in dem Einstellen der Teile des Stahles in einer bestimmten Richtung.

Stahl besitzt die Eigenschaft, die gerichteten Teile in ihrer Stellung festzuhalten. Eisen kann die Teilchen nicht festhalten. Glüht man einen magnetischen Stahlstab, so verliert er seinen Magnetismus. Auch dies spricht dafür, daß die Teilchen eines Magneten sich in einer gerichteten Zwangslage befinden.

Man kann sich also vorstellen, ein Magnet bestünde aus lauter gleichgerichteten sehr kleinen Magneten.

§ 45. Das magnetische Feld

Bedecken wir einen Stabmagneten mit einem Stück Papier oder einer Glasscheibe und streuen Eisenfeilspäne darauf, so ordnen sich die Feilspäne in Linien, die von dem einen Pole des Magneten ausgehen und an dem anderen Pole münden. Bringen wir eine kleine, auf einer Nadelspitze drehbare Magnetnadel in die Nähe dieser Linien, so stellt sich diese kleine Magnetnadel an jeder Stelle so ein, wie die an die Linien gezogenen Tangenten zeigen würden.

Die Magnetnadel wird von dem Magneten durch die Kraft, die der Magnet auf sie ausübt, in dieser Richtung gehalten. Daraus folgt, daß die durch die Eisenfeilspäne aufgezeichneten Linien an jeder Stelle die Richtung der von den beiden Polen des Magneten ausgeübten magnetischen Kraft darstellen.

Die Linien, die die Richtung der von einem Magneten ausgehenden magnetischen Kraft angeben, heißen **Kraftlinien**.

Der Raum, in dem die Kraftwirkung eines Magneten nachweisbar ist, heißt das **Kraftfeld** oder das **magnetische Feld** des Magneten.

Fig. 126 gibt das Kraftfeld eines Stabmagneten wieder. In gleicher Weise kann man das Kraftfeld zwischen zwei Nordpolen, das Feld in der Nähe eines Poles, das Feld zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten usw. feststellen.

Die Kraftlinien scheinen von einem Pole auszugehen, sich strahlenförmig auszubreiten und dann im Bogen zu dem anderen Pole hinzuführen. Stehen sich gleichartige Pole gegenüber, so weichen die Kraftlinien, die von dem einen Pole ausgehen, den vom anderen Pole ausgehenden aus. Verlaufen die Kraftlinien parallel zueinander, wie dies etwa bei einem Hufeisenmagnet auf dem kleinen Raum zwischen den Polen der Fall ist, so nennen wir das Kraftfeld ein **homogenes magnetisches Feld**.

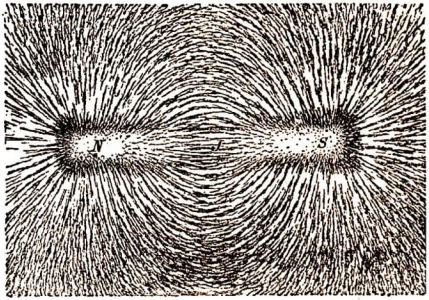


Fig. 126.

Bringen wir in ein homogenes Feld ein Stück Eisen, so zeigt sich an der Veränderung, die das Kraftlinienbild erfährt, daß die Kraftlinien in das Eisen hineingezogen werden (Fig. 127). *Bringen wir irgendeinen anderen Stoff in das Feld, so zeigt sich kaum eine Veränderung.*

Da wir aus dem Kraftlinienbild eines Stabmagneten erkennen, daß die Kraftwirkung dort am größten ist, wo die Kraftlinien zusammenlaufen, müssen wir schließen:

Durch die meisten Stoffe geht die Kraftwirkung eines Magneten unverändert hindurch, genau wie durch die Luft. Nur Eisen hat die Fähigkeit, die Kraftlinien in sich zu sammeln. Eisen verstärkt also die Wirkung der Kraft eines Magneten in der Richtung, in der es sich erstreckt.

Fig. 127.

Während wir bei den meisten Stoffen keine ausgesprochen magnetischen Eigenschaften entdecken können, zeigt Eisen an den Stellen, wo die Kraftlinien des Feldes verschwinden und wo sie auftreten, je einen magnetischen Pol (in Fig. 127 rechts und links). *Wird das Eisen aus dem magnetischen Felde herausgenommen, so kann es die Kraftlinien nicht mehr in sich hineinziehen, und daher ist es dann unmagnetisch.*

Dieses Verhalten des Eisens und der anderen Stoffe stimmt auch damit überein, daß man durch eine Glasscheibe, ein Stück Zinkblech oder einen Karton von einem Magneten andere Eisenstückchen anziehen lassen kann, solange die Entfernung nicht zu groß ist. In einer Entfernung, in der aber an und für sich die Kraftwirkung des Feldes recht klein ist, werden Eisenstückchen stark angezogen, wenn man zwischen den anziehenden Magneten und die Eisenstückchen ein Stück Eisen fügt.

Eisen verstärkt die Wirkung des magnetischen Feldes sehr erheblich.

§ 46. Der Erdmagnetismus

Eine um die vertikale Achse drehbare Magnetnadel zeigt ungefähr von Süden nach Norden. Genauere Messungen zeigen, daß die Richtung, in der die Magnetnadel sich einstellt, ungefähr um 12° im mittleren Deutschland von der Südnordrichtung nach Westen abweicht. An anderen Stellen der Erde ist die Nadel anders gerichtet.

Die Abweichung der Richtung der Magnetnadel von der Richtung des Meridians eines Ortes nennen wir die magnetische Deklination.

Hängen wir eine Nadel, die um eine horizontale Achse beweglich ist, in der Richtung des magnetischen Meridians auf, so zeigt sie mit ihrem Nordende gegen den Erdboden, und zwar unter einem Winkel von etwa 65°—70° gegen die Horizontale in Deutschland. An anderen Stellen der Erde ist dieser Winkel meist von anderer Größe.

Die Abweichung der Magnetnadel von der horizontalen Richtung nennen wir die magnetische Inklination.

Untersuchungen, die über die Größe der Deklination und Inklination auf der ganzen Erde angestellt worden sind, haben gezeigt, daß auf der nördlichen Halbkugel eine ganz frei bewegliche Magnetnadel nach einer Insel im Norden von Nordamerika weist. Dort zeigt der Nordpol der Nadel senkrecht nach dem Boden, und auf der südlichen Halbkugel findet sich eine Stelle auf dem antarktischen Kontinent, wo der Südpol senkrecht nach dem Boden zeigt. Es ist daraus zu schließen, daß im Innern der Erde ein großer Magnet gelagert ist, oder daß durch andere Umstände ein solcher Magnet vorgetäuscht wird, dessen Südpol im Norden, dessen Nordpol im Süden liegt.

Die Erde ist also von einem magnetischen Feld umgeben. An jeder Stelle hat die magnetische Kraft des Erdfeldes eine ganz bestimmte durch die Magnetnadel nachweisbare Richtung. Kennt man die Abweichung dieser Richtung von der geographischen Nordsüdrichtung, so kann man die geographische Nordsüdrichtung aus der Richtung, in der sich die Nadel einstellt, erschließen.

Fig. 128.

Die Apparate, mit denen das geschieht, heißen Kompaß und Bussole.

Der Kompaß ist das Instrument des Schiffers. Fig. 128 stellt einen Taschenkompaß dar. Er besteht aus einer um eine vertikale Achse frei beweglichen Magnetnadel, die auf einer Skala spielt, auf der die Himmelsrichtungen eingetragen sind. Die Nadel muß

so einspielen, daß sie um die Größe der Deklination von der Nordsüdrichtung abweicht, dann zeigt die Skala (Windrose) die richtigen Himmelsrichtungen an.

Die Bussole ist das Instrument des Feldmessers. Es dient dazu, auf einem kleinen Bezirk, in dem sich die Deklination nicht wesentlich ändert, dem Feldmesser immer dieselbe Richtung anzugeben. Es findet vor allem in Bergwerken, bei Tunnelbauten usw. Verwendung.

Damit der Schiffer an allen Orten die für den Gebrauch des Kompasses unerläßlichen Angaben über die Deklination erfahren kann, sind Karten der Erde angefertigt worden, auf denen die Deklination verzeichnet ist.

§ 47. Geschichtliche Entwicklung

Der Kompaß ist von den Chinesen erfunden worden. Er wurde in China schon zur Zeit vor Christi Geburt zu Landreisen benutzt. Später wurde er auch von Seefahrern verwendet. Um das 13. oder 14. Jahrhundert gelangte die Kenntnis vom Kompaß nach Europa, und zwar zu den damals bedeutendsten seefahrenden Nationen, den italienischen Städten. Man benutzte anfangs ein auf Wasser schwimmendes Holzkreuz, auf das man den durch einen Magneteisenstein magnetisierten Stahlstab legte, um dem Magneten die erforderliche Beweglichkeit zu geben.

Zur Zeit der Entdeckungsfahrten war der Gebrauch des Kompasses schon sehr verbreitet. Von der Deklination begann man damals erst etwas zu ahnen. Das nimmt nicht wunder, weil man ja noch keine klare Vorstellung von der Gestalt der Erde hatte. Große Verdienste um die Entwicklung der Lehre vom Magnetismus hat sich der Londoner Arzt Gilbert (1540—1603) erworben. Er beschrieb die Grundeigenschaften des Magnetismus richtig und erkannte, daß die Erde als ein großer Magnet anzusprechen sei.

Die erste Karte der Deklination wurde von dem englischen Physiker und Astronomen Halley um 1700 angelegt.

IX. Die ruhende Elektrizität

§ 48. Die Eigenschaften elektrischer Körper

1. Erzeugung von Elektrizität durch Reibung. *Reiben wir einen Hartgummistab mit einem Stück Pelz oder einen Glasstab mit einem Lederlappen, so zeigen die Stäbe die Eigenschaft, leicht bewegliche Körper, z. B. Papierschnitzel oder Korkspäne anzuziehen und nach erfolgter Berührung wieder abzustoßen. Diese Eigenschaft besitzt Glas oder Hartgummi in nicht geriebenem Zustand nicht.*

Durch Reiben ist auf dem Hartgummistab oder dem Glasstab ein Zustand erzeugt worden, den wir elektrisch nennen. Die Stäbe sind nach dem Reiben elektrisch geladen.

Dieselbe Eigenschaft zeigen Schwefel, Siegellack und andere Körper. Untersucht man den Vorgang der Anziehung und Abstoßung genauer, indem man eine an einem Seidenfaden aufgehängte Holundermarkkugel durch einen Hartgummistab anziehen läßt, so zeigt sich, daß die Holundermarkkugel vor der Berührung nach dem elektrischen Stabe hingezogen wird, nach der Berührung aber dem Stabe ausweicht.

Fig. 129.

Fig. 130.

Durch die Berührung muß also die Holundermarkkugel eine Veränderung erfahren haben (Fig. 129).

Nimmt man den Versuch an zwei als Doppelpendel aufgehängten Holundermarkkugeln vor, so zeigt sich, daß beide Kugeln nach der Berührung mit dem Stab sich dauernd abstoßen (Fig. 130). *Die Kugeln zeigen jetzt dieselben Eigenschaften wie der Stab. Sie sind elektrisch. Daraus ergibt sich:*

Der elektrische Zustand läßt sich von einem Körper auf einen anderen durch Berührung übertragen.

2. Leiter und Nichtleiter. *Versucht man einen Metallstab durch Reiben elektrisch zu machen oder auf ihn durch Berührung den elektrischen Zustand zu übertragen, so gelingt dieser Versuch erst, wenn der Metallstab nicht von dem Tisch oder der Hand direkt berührt wird, sondern wenn er nur mit Körpern aus Glas, Hartgummi, Siegellack, Seide usw. in unmittelbarer Verbindung steht. Eine Metallkugel z. B., die auf einem Hartgummistab befestigt ist, läßt sich sowohl durch Reiben als auch durch Berühren mit elektrischen Körpern elektrisch aufladen. Metalle, die nur mit Körpern wie Glas, Hartgummi, Siegellack, Luft in Berührung kommen, nennt man isoliert.*

Berührt man einen geladenen und in dieser Weise isolierten Körper aus Metall an irgendeiner Stelle, so verschwindet der elektrische Zustand überall, berührt man einen elektrischen Glas- oder Hartgummistab irgendwo, so bleibt der Stab an den Stellen elektrisch, wo er nicht berührt wurde.

Wir haben danach zwei Arten von Stoffen zu unterscheiden:

Stoffe, bei denen die Elektrizität an der Stelle haftet, an der sie erzeugt wird, heißen Nichtleiter der Elektrizität oder Isolatoren.

Zu ihnen gehören Glas, Hartgummi, Schellack, Porzellan, Paraffin, Öl, Seide, Luft, Gase usw.

Stoffe, bei denen die Elektrizität nicht an der Stelle haften bleibt, heißen Leiter der Elektrizität oder Konduktoren.

Zu ihnen gehören alle Metalle, das Wasser, die Erde, der menschliche Körper usw.

3. Positive und negative Elektrizität. *Eine Holundermarkkugel, die mit einem geriebenen Glasstab, und eine zweite, die mit einem geriebenen Hartgummistab in Berührung gebracht worden ist, ziehen sich an, obwohl sie beide elektrisch sind. Ein elektrischer, frei beweglich aufgehängter Hartgummistab wird durch einen geriebenen Glasstab angezogen, durch einen geriebenen Hartgummistab aber abgestoßen, wenn diese Stäbe ihm nacheinander genähert werden.*

Diese und andere Versuche lassen erkennen, daß der elektrische Zustand des Glases und Hartgummis verschieden ist. Wir unterscheiden zwei Arten der Elektrizität:

Die Elektrizität, die das Glas beim Reiben mit Leder erhält, nennen wir positive Elektrizität.

Die Elektrizität, die der Hartgummi beim Reiben mit Pelz erhält, nennen wir negative Elektrizität.

Das oben beschriebene Verhalten von Glas und Hartgummi läßt sich nun in dem allgemeinen Gesetz ausdrücken:

Gleichartige Elektrizitäten stoßen sich ab, ungleichartige Elektrizitäten ziehen sich an.

Weitere Versuche zeigen:

Beim Reiben zweier Körper miteinander wird der eine stets so elektrisch wie das Glas, wenn es mit Leder gerieben wird, und der andere wie der Hartgummi, wenn er mit Pelz gerieben wird. Beim Reiben werden also geriebener Körper und Reibzeug in verschiedenem Sinne elektrisch.

Es gibt Körper, die mit Glas gerieben negativ und mit Hartgummi gerieben positiv elektrisch werden. Glas wird beim Reiben mit anderen Körpern fast immer positiv, Hartgummi fast immer negativ elektrisch. Daher werden die beiden Elektrizitätsarten nach ihnen benannt.

§ 49. Elektrizitätsmenge und elektrische Spannung

1. Das Elektroskop. Bringt man Elektrizität durch Berührung auf einen senkrecht aufgestellten, isolierten Metallstab (Fig. 131), an dem ein Blättchen aus dünner Metallfolie herabhängt, das am oberen Ende mit dem Stabe verbunden ist, so spreizt sich das Blättchen nach der Seite, als ob es von dem Stab abgestoßen würde. Es zeigt einen Ausschlag wie ein Pendel, das aus der Ruhelage herausgehoben ist. Mit einem so beschaffenen Apparat kann man nachweisen, ob ein Körper elektrisch ist, auch wenn der elektrische Zustand nur schwach erregt ist. Damit Luftströmungen das leichte Blättchen nicht willkürlich bewegen, wird der Apparat meist in ein Gehäuse aus Metall gesetzt, das mit Glasfenstern vorn und hinten versehen ist, und in das der Stab isoliert hineinführt. Außen trägt der Stab meist einen Knopf oder eine Schale, die mit dem zu untersuchenden Körper in Verbindung gebracht wird. Fig. 132 stellt einen so gebauten Apparat dar. Man nennt ihn Elektroskop. Das Elektroskop kann mit einem oder zwei Blättchen aus Aluminiumfolie versehen sein, oder mit einem nahezu im Schwerpunkt aufgehängten Stab wie in der Figur.

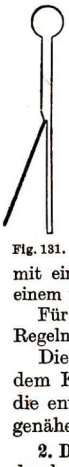


Fig. 131.

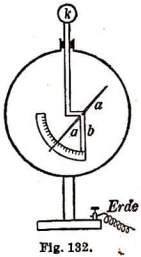


Fig. 132.

Für die Benutzung des Elektroskops lassen sich durch Erfahrung folgende Regeln ableiten:

Die Blättchen eines geladenen Elektroskopes gehen zusammen, wenn dem Knopf des Elektroskopes ein Körper von oben genähert wird, der die entgegengesetzte Ladung besitzt, und weiter auseinander, wenn der genäherte Körper die gleiche Ladung wie das Elektroskop aufweist.

2. Die Elektrizitätsmenge. Unter Verwendung des Elektroskopes lassen sich durch einfache Versuche folgende Sätze aus der Erfahrung ableiten:

Verbindet man einen geladenen und einen ungeladenen Körper durch einen Leiter, so geht der elektrische Zustand von dem geladenen auf den ungeladenen über und verteilt sich auf beide Körper.

Der elektrische Zustand verbreitet sich über die ganze Oberfläche des Leiters.

Von einem geladenen Konduktor A kann dadurch nach und nach die Elektrizität weggenommen werden, daß man ihn mit ungeladenen, kleinen, isolierten Konduktoren r (sogenannten Probekugeln) berührt (Fig. 133, *I*).

Auf einem ungeladenen Konduktor h kann ein elektrischer Zustand hervorgerufen

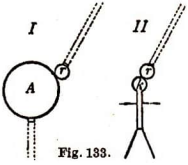


Fig. 133.

und verstärkt werden, indem man dem Konduktor nach und nach mit einer Probekugel Elektrizität von einem andern Konduktor zuführt, z. B. dem Elektroskop (Fig. 133, *II*).

Aus diesen Erfahrungssätzen können wir einen Schluß auf die Eigenschaften des elektrischen Zustandes ziehen. Die Versuchsergebnisse sind nur so zu erklären, daß es eine Elektrizität gibt, die sich in kleinere oder größere Mengen teilen läßt. Aus der Tatsache, daß sich die Elektrizität von selbst über einen Konduktor verteilt, muß geschlossen werden, daß die Teile der Elektrizität auseinanderstreben, daß sie sich gegenseitig abstoßen, wie dies nach dem Gesetz, daß gleichartige Elektrizitäten sich gegenseitig abstoßen, sein muß.

Wir sprechen deshalb in Zukunft nicht mehr von dem elektrischen Zustand, auch nicht der Elektrizität schlechthin, sondern von der Elektrizitätsmenge oder der Ladungsmenge, die irgendein Körper besitzt.

Nehmen wir mit einer Probekugel von einem kugelförmigen, isolierten, geladenen Konduktor eine kleine Elektrizitätsmenge weg und übertragen sie auf ein ungeladenes Elektroskop, so zeigt das Elektroskop denselben Ausschlag, von welcher Stelle wir auch die Ladung wegnehmen.

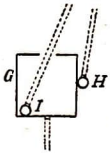


Fig. 134.

Verfahren wir ähnlich bei einem würfelförmigen Konduktor, so zeigen sich verschieden große Ausschläge am Elektroskop. Sie sind bei den von den Ecken entnommenen Mengen am größten, werden für die an den Kanten entnommenen Ladungsmengen der Probekugel kleiner und noch kleiner für die Mitten der Würfelflächen (Fig. 134).

Durch Berühren des Innern eines irgendwie gestalteten Konduktors kann nie Elektrizität mit der Probekugel auf das Elektroskop überführt werden.

Diese Versuche zeigen:

Elektrische Ladung sitzt nur auf der äußeren Oberfläche eines Konduktors, nie im Inneren.

Auf beliebig gestalteten Konduktoren ist die Ladungsmenge nicht überall gleichmäßig verteilt. An den flachen Stellen der Oberfläche sitzt weniger Elektrizität als an den stark gekrümmten Stellen.

Danach würde sich die Elektrizitätsmenge genau so einem ungeladenen Konduktor gegenüber verhalten wie eine Gasmenge gegenüber einem evakuierten Raum. Nur der Unterschied bestünde: Während das Gas den ganzen Raum einnimmt, der ihm offen steht, verteilt sich die Ladung nur über die nach außen gewölbte Oberfläche.

Auf diesen Begriff der Elektrizitätsmenge beziehen wir uns in der weiteren Untersuchung. Er wird die Grundlage der Erklärungen der elektrischen Erscheinungen für uns bilden[1]).

3. Die elektrische Spannung. Die Wirkung des Elektroskopes erklären wir uns in folgender Weise: Knopf, Stab und Blättchen des Elektroskopes bilden

1) Exakte Definition siehe Oberstufe.

zusammen einen einzigen Konduktor, auf dem sich die Ladung, die dem Elektroskop zugeführt wird, verteilt. Die Abstoßung des Blättchens kann nur darauf beruhen, daß die auf dem Blättchen und dem Stab sitzenden Ladungsmengen sich gegenseitig abstoßen. Würde die ganze Ladungsmenge des Blättchens auf die übrigen Teile des Elektroskopes (Stab und Knopf) entweichen können, so ginge der Ausschlag wieder zurück. Dies geschieht aber nicht. Daher ist anzunehmen, daß die Ladung auf dem Blättchen durch die abstoßende Wirkung der anderen Ladungsteile festgehalten wird. Je größer diese Kraft ist, desto stärker wird das Blättchen ausschlagen, denn diese Kraft hebt im Grund genommen das Blättchen. Das Elektroskop zeigt also nicht zunächst die Menge der Elektrizität auf dem Elektroskop an, sondern die Kraft der gegenseitigen Abstoßung, den Druck oder die Spannung, die zwischen den Teilen der Ladung besteht.

Für andere Konduktoren muß in gleicher Weise gelten, daß zwischen den Teilen der Ladung eine abstoßende Kraft herrscht, oder daß der Konduktor eine elektrische Spannung besitzt. Daher können wir aussagen:

> Auf einem geladenen Konduktor herrscht eine elektrische Spannung, deren Größe durch den Ausschlag des Elektroskopes gemessen werden kann[1]).

Verbinden wir das Innere eines Konduktors durch eine leitende Schnur mit einem Elektroskop, so zeigt das Elektroskop einen Ausschlag. Dies beweist, daß auch im Inneren des Konduktors Spannungszustände herrschen, trotzdem keine Ladung im Inneren ist. Ein Teil der Ladung findet den Weg durch das Innere des Konduktors nach dem außen befindlichen Elektroskop.

Ist die Spannung oder die elektrische Abstoßung zwischen den Teilen der Ladung die Ursache der Verteilung der Ladung, so muß erwartet werden, daß die Verteilung so lange andauert, bis überall die gleiche Spannung vorhanden ist. Denn wäre dies nicht so, dann würden an gewissen Stellen abstoßende Kräfte nicht im Gleichgewicht sein, wodurch die eine Ladung zurückgedrängt, die andere vorwärtsgeschoben würde. Daher ergibt sich als eine Folge der zugrunde gelegten Anschauung der Satz:

> Auf der Oberfläche eines Konduktors verteilt sich die Ladung so, daß überall dieselbe elektrische Spannung herrscht.

Der Vergleich zwischen Ladungsmenge und Gasmenge trifft auch hier zu. Ein Gas verteilt sich in einem Raume so, daß überall derselbe Druck herrscht, die Ladung auf einem Konduktor so, daß überall dieselbe elektrische Spannung herrscht. Der Druck eines Gases wird durch die Höhe der Flüssigkeitssäule eines Manometers (bzw. die Energie der Lage der Flüssigkeitssäule) gemessen, die Spannung eines Konduktors durch die Höhe, um die das Blättchen des Elektroskopes gehoben wird, bzw. die Energie der Lage des Blättchens.

Die Tatsache, daß im Innern eines geladenen Konduktors keine Ladung sitzt, kann auch in folgender Weise nachgewiesen werden:

Auf einen isolierten scheibenförmigen Konduktor wird leitend verbunden ein Blattelektroskop gestellt und darüber ein Drahtkäfig gestülpt, der das Elektroskop

---

1) Exakte Definition siehe Oberstufe.

umhüllt. Bringt man elektrische Ladung auf den Konduktor, der mit dem Käfig leitend verbunden ist, so schlägt das Elektroskop nicht aus. Hebt man den Käfig aber an einem Seidenfaden in die Höhe, so daß das Elektroskop sich nun auf der Außenseite der Scheibe befindet, so zeigt es Ladung an. Sie verschwindet wieder, wenn der Käfig darüber gestülpt wird.

Die auf einer Probekugel sitzende Ladung kann nur dann vollständig auf das Elektroskop übergeführt werden, wenn man das Elektroskop mit einer Hohlkugel als Knopf versehen hat, in deren Inneres die Probekugel eingeführt wird. Da im Inneren der Hohlkugel keine Ladung zurückbleiben kann, wird die Probekugel vollständig entladen herausgenommen.

Verbindet man einen positiv und einen negativ geladenen Konduktor, so gleichen sich die Elektrizitätsmengen anteilsgemäß aus. Es bleibt ein Überschuß der größeren Ladung zurück.

Daraus ergibt sich, was schon bei früheren Versuchen erkannt worden ist, daß zwischen positiver und negativer Ladung ein Spannungsunterschied herrscht. Ein ungeladener Konduktor kann beide Arten der Elektrizität enthalten, ohne daß sie durch das Elektroskop nachgewiesen werden können. Sie können aber z. B. durch Reibung getrennt werden.

4. Die Kapazität. Durch einfache Versuche läßt sich ferner zeigen:

Ein Konduktor vermag zwar beliebige Mengen Elektrizität aufzunehmen, die Spannung, die er dabei annimmt, ist aber sehr davon abhängig, ob er groß oder klein ist. Man spricht daher von dem Fassungsvermögen oder der Kapazität eines Konduktors.

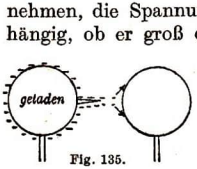


Fig. 135.

Wird die Spannung zu groß, dann entlädt sich der Konduktor von selbst. Dies tritt besonders dann leicht ein, wenn der Konduktor Spitzen und scharfe Kanten besitzt (Fig. 135).

Spannung, Elektrizitätsmenge und Kapazität bedingen sich gegenseitig. Sind zwei von diesen Größen gegeben, so ist die dritte dadurch bestimmt.

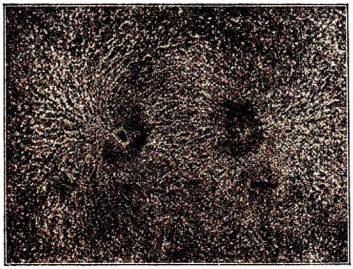


Fig. 136.

§ 50. Das elektrische Feld

1. Das elektrische Feld. Ein geladener Konduktor wirkt durch die Luft oder den luftleeren Raum auf einen zweiten geladenen Konduktor anziehend oder abstoßend. Eine solche Wirkung in die Ferne ohne Zwischenkörper ist von uns auch beim Magnetismus festgestellt worden. Wir nannten den Wirkungsbereich eines Magneten das magnetische Feld und machten es durch Kraftlinien aus Eisenfeilspänen anschaulich sichtbar.

Durch Verwendung von Gipskristallpulver kann man zeigen, daß auch ein elektrisch geladener Konduktor ein Feld besitzt, in dem Kraftlinien nachzuweisen sind (Fig. 136).

2. Die elektrische Influenz. Wird ein ungeladener Konduktor in die Nähe eines geladenen Konduktors gebracht, so erweist er sich an den Enden als elektrisch geladen. In dem genäherten Ende des Konduktors wird die entgegengesetzte, in dem abgewandten Ende die gleichnamige Elektrizität hervorgerufen wie auf dem felderregenden Konduktor.

Dies kann man dadurch zeigen, daß man den Versuch mit einem teilbaren Konduktor vornimmt, so wie ihn Fig. 137 *andeutet. Trennt man die beiden Konduktoren L_1 und L_2, so bleiben beide geladen, nimmt man aber den felderregenden Konduktor A weg, ohne daß man die beiden Teile getrennt hat, so bleibt keinerlei Ladung auf dem Konduktor L_1 L_2 zurück.*

Man nennt diese Erscheinung Influenz.

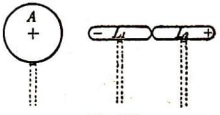


Fig. 137.

Man kann sie durch die Annahme erklären, auf jedem ungeladenen Konduktor sei gleichviel negative und positive Elektrizität vorher vorhanden gewesen. Unter der anziehenden Wirkung des geladenen Konduktors wird die entgegengesetzte Elektrizitätsart in das nähere Ende gezogen, die gleichartige Elektrizität in das entfernte Ende abgestoßen.

Berührt man den ungeladenen Konduktor mit der Hand, während er der Wirkung des felderregenden Konduktors ausgesetzt ist, so bilden die Erde, der Körper und der ungeladene Konduktor einen einzigen Leiter, auf dem die abgestoßene Elektrizität zur Erde als dem entferntesten Teil des Konduktors abfließt. Nimmt man den Finger weg, ehe die Feldwirkung aufhört, so bleibt auf dem ungeladenen Konduktor die entgegengesetzte Elektrizität zurück. In dieser Weise kann man mit einer auf einem Konduktor vorhandenen Ladung viele ungeladene Konduktoren laden, ohne daß Ladung verloren geht.

Ist der influenzierte Konduktor mit einer Spitze versehen, die nach dem felderregenden Konduktor hinweist, so strömt die entgegengesetzte Influenzelektrizität aus der Spitze durch Anziehung auf den felderregenden Konduktor und hebt dessen Ladung auf. Auf dem influenzierten Konduktor bleibt dagegen die gleichartige Elektrizität zurück (Fig. 138). Es ist gleichsam so, als ob die felderregende Elektrizität durch die Spitze auf den influenzierten Konduktor geflossen wäre.

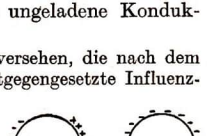


Fig. 138.

3. Der Kondensator. *Nimmt man zwei Metallplatten gleicher Größe, verbindet jede mit einem gleich empfindlichen Elektroskop, stellt jedoch der einen Metallplatte in geringem Abstand eine Metallplatte gegenüber, die mit der Erde verbunden ist, so zeigt sich beim gleichen Aufladen der beiden mit dem Elektroskop verbundenen Metallplatten, daß die Kapazität derjenigen Platte viel größer ist, die der zur Erde abgeleiteten Platte gegenübersteht.*

Die Verbindung zweier Metallplatten, von denen die eine isoliert ist, und die andere dieser in geringem Abstand zur Erde abgeleitet gegenübersteht, nennt man einen **Kondensator** oder **Verdichter der Elektrizität**.

Lädt man ein Elektroskop, das an Stelle des Knopfes einen Kondensator besitzt, dessen obere Platte zur Erde abgeleitet ist, mit einer Ladung schwach auf und hebt dann die obere Platte weg, dann schlägt das Blättchen stark aus (Fig. 139).

Die Versuche erklären sich nach Fig. 140. Ist die linke isolierte Platte positiv geladen, so wird auf der rechten abgeleiteten Platte negative Elektrizität influenziert. Die beiden Ladungen ziehen einander um so stärker an, je näher die Platten aneinander liegen. Würden die Teile der Ladung diesen anziehenden Kräften nicht ausgesetzt sein, so würden sie sich mit einer Kraft gegenseitig abstoßen, wie sie in der Spannung bemerkbar ist. Werden die Teilchen der Ladung aber nach dem linken influenzierenden Konduktor stark hingezogen, so können sie sich untereinander nicht mehr mit derselben Kraft abstoßen, d. h. die Spannung des geladenen Konduktors muß kleiner werden. Erst wenn mehr Elektrizität auf den Konduktor gebracht ist, kann wieder dieselbe Spannung erreicht werden.

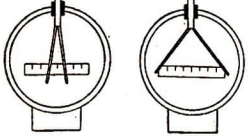


Fig. 139.

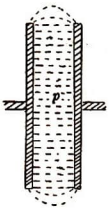


Fig. 140.

Kondensatoren können demnach vorzüglich zur Aufnahme größerer Elektrizitätsmengen verwendet werden.

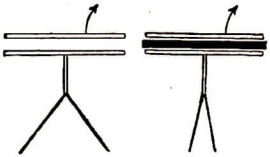


Fig. 141.

Ein Kondensator sei mit einem Elektroskop (Fig. 141) *verbunden und geladen. Bringt man in den Zwischenraum der beiden Platten eine Platte aus Glas, Hartgummi, Glimmer oder irgendeinem anderen Isolator, so zeigt das Elektroskop eine geringere Spannung an. Entfernt man die Platte wieder, so steigt die Spannung auf ihren ursprünglichen Betrag.*

Durch das Einfügen eines Isolators zwischen die Platten eines Kondensators wird die Kapazität des Kondensators vergrößert.

Daher fertigt man die Kondensatoren meist nicht in der Form zweier gegenüberstehenden, durch Luft getrennten Metallplatten an, sondern nimmt entweder:

Glasflaschen nach Fig. 142, die innen und außen mit Stanniol belegt werden, deren innerer Beleg isoliert und deren äußerer geerdet ist, sogenannte Leidener Flaschen, oder Glas- oder Hartgummiplatten, auf deren beide Seiten Stanniol geklebt ist, sogenannte Franklinsche Tafeln,

Fig. 142.

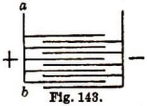


Fig. 143.

oder Blätter aus Stanniol und paraffiniertem Papier, die man abwechselnd übereinander schichtet und so untereinander verbindet, daß der erste Beleg aus dem 1., 3., 5. usw., der zweite aus dem 2., 4., 6. usw. Stanniolblatt gebildet ist; Trennungsschicht ist das paraffinierte Papier (Fig. 143).

§ 51. Erzeugung und Entladung von Elektrizität

1. Die Elektrisiermaschine. Die Elektrisiermaschine besteht aus einer kreisrunden Glasscheibe, die durch eine Kurbel zwischen zwei von beiden Seiten auf die Scheibe drückenden Reibkissen *R* aus Leder hindurchgedreht wird (Fig. 144). Die geriebenen Teile der Scheibe werden dadurch positiv elektrisch. Die Ladung wandert mit der Scheibe nach der entgegengesetzten Seite, wo der Scheibe Saugkämme *S* dicht gegenüberstehen. Diese sind kammartige Gebilde, deren Zinken in Spitzen enden, die auf die Platte gerichtet sind. Durch die Wirkung der Spitzen wird die Elektrizität von der Platte weggenommen und auf den Konduktor *K* geleitet, der mit den Kämmen verbunden ist. Das Reibzeug ist geerdet. Auf dem Konduktor wird also die erzeugte positive Elektrizität gesammelt.

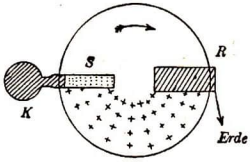


Fig. 144.

Mit der Reibungselektrisiermaschine kann man fortdauernd Elektrizität erzeugen, die in dem Konduktor sich ansammelt. Es gibt andere Maschinen, die durch Influenz die gleiche Wirkung erzielen. Ihre Beschreibung führt hier zu weit.

2. Die elektrische Entladung. Ein aufgeladener Konduktor behält seine Ladung nicht auf die Dauer unverändert bei. Die Elektrizität entweicht allmählich durch den Isolator und die Luft, die den Konduktor berühren. Neben dieser langsam verlaufenden Entladung, die ihren Grund in der mangelhaften Isolationsfähigkeit der Isolatoren hat, gibt es noch verschiedene andere Formen der Entladung:

Läßt man die Verbrennungsgase eines Bunsenbrenners an dem Knopf eines geladenen Elektroskopes vorbeistreichen, so tritt plötzlich Entladung ein. Die Gase der Flamme sind leitend, obwohl Leuchtgas und Luft Isolatoren sind. Kellerluft zeigt ähnliche Eigenschaften wie die Flammengase des Brenners.

Durch Spitzen und scharfe Kanten entweicht die Elektrizität sehr rasch. Ist die Spannung hoch, so kann man das Entweichen an einer feinen rotbläulichen Lichterscheinung erkennen.

Zwischen Konduktoren, die mit großen Elektrizitätsmengen auf eine hohe Spannung geladen sind, kann auch eine Entladung durch die Luft stattfinden, wenn keine Spitzenwirkung die Entladung unterstützt. Stehen sich die Flächen der verschiedenen geladenen Konduktoren im Abstand von einigen Millimetern oder Zentimetern gegenüber, so springt an der Stelle, wo sich die Flächen am meisten gegenseitig nähern, ein Funke

mit lautem Knalle über. Leuchtkraft des Funkens und Schallerregung sind um so intensiver, je größer die Elektrizitätsmenge ist, die zur Entladung kommt, und die Spannung, bei der die Entladung erfolgt.

3. Die Wirkungen der Entladung. An der Entladung stärkerer Funken läßt sich zeigen, daß das Überspringen einer größeren Elektrizitätsmenge von einem Konduktor auf einen anderen folgende Wirkungen hat:

a) Mechanische Wirkung. *Glas, Hartgummi, Papier werden von dem Funken durchlöchert.*

b) Wärme- und Lichtwirkung. *Die Lichterscheinung zeigt sich in dem Funken und in der Leuchtwirkung der Spitzenentladung. Die Wärmewirkung ist daran zu erkennen, daß es gelingt, mit dem elektrischen Funken Leuchtgas oder Äther oder Benzin usw. zu entzünden. Ein sehr dünner Eisendraht glüht durch den Funken auf.*

c) Chemische Wirkung. *In der Nähe der Konduktoren, zwischen denen einige Zeit hindurch elektrische Entladung stattgefunden hat, zeigt sich ein intensiver Geruch, der auf die Bildung von Ozongas aus der Luft schließen läßt. Eine Lösung von Jodkalium wird durch die elektrische Entladung zersetzt. Es scheidet sich Jod ab, das die Lösung blau färbt, wenn ihr etwas Stärke zugesetzt war.*

d) Magnetische Wirkung. *Läßt man den Entladungsschlag durch eine Wicklung von Kupferdraht gehen, die um eine unmagnetische Stricknadel herumgelegt ist, so erweist sich die Nadel nach der Entladung als magnetisch.*

e) Physiologische Wirkung. *Die elektrische Entladung ruft im menschlichen Körper, besonders in Gelenken und auf die Nerven wirkend, heftige Erschütterungen hervor.*

Aus diesen Wirkungen der elektrischen Entladung ergibt sich, daß wir es mit einem Vorgang zu tun haben, bei dem mechanische, chemische und andere Energien aus Elektrizität gewonnen werden.

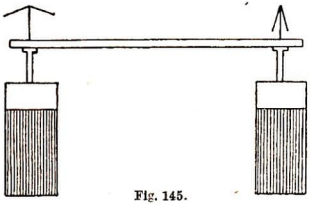


Fig. 145.

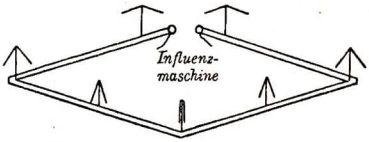


Fig. 146.

4. Entladung durch Halbleiter und Leiter. *Verbinden wir zwei Leidener Flaschen, von denen die eine geladen und die andere ungeladen ist, durch einen Holzstab, so können wir erkennen, wie sich durch den Stab ein Ausgleich zwischen den Ladungen beider Flaschen vollzieht. Beide Flaschen zeigen schließlich die gleiche Spannung. Sind die beiden Flaschen entgegengesetzt geladen, so gleichen sich die Ladungen aus. Es muß also ein Strömen der Ladung von der höheren zur tieferen Spannung stattfinden* (Fig. 145).

Verbinden wir die Pole einer Influenzmaschine durch einen langen Leiter aus Holz oder Bindfaden, auf dem eine Reihe von einfachen Blattelektroskopen sitzt, so zeigt sich, daß die an den Polen erzeugte Elektrizität durch den Stab ihren Ausgleich findet, und daß dieser Ausgleich in dem schlechten Leiter andererseits so allmählich nur vor sich geht, daß man erkennen kann, wie die Spannung von beiden Polen nach der Mitte zu abnimmt. Wird ein Pol der Maschine geerdet, so stellt sich ein allmählich eintretender Spannungsabfall in dem Stab von dem nicht geerdeten Pol bis zum geerdeten ein. Daraus ergibt sich, daß der Ausgleich der Ladung im Sinne des Spannungsabfalls erfolgt (Fig. 146).

Stellen wir die Verbindung in allen diesen Fällen durch einen metallischen Leiter her, so lassen sich diese Erscheinungen nicht mit den angewandten Hilfsmitteln erkennen. Der Ausgleich ist plötzlich da, und es gelingt nicht, eine Spannungsdifferenz an den Enden des Ausgleichsdrahtes zu erreichen, die das Blattelektroskop zum Ausschlag bringt. Daß aber auch hier ein Ausgleich im Leiter erfolgt, dafür spricht die Tatsache selbst zunächst, dann aber auch die magnetisierende Wirkung der Drahtspirale des Versuchs unter 3.

Zusammenfassend läßt sich sagen:

Der elektrische Funke und die in einem Halbleiter oder Leiter erfolgende Entladung der Elektrizität bewirkt ein Strömen der Elektrizitätsmenge (im Sinne des Spannungsabfalls). In den Wirkungen der elektrischen Entladung liegen Wirkungen des elektrischen Stromes vor.

5. Das Gewitter. Blitz und Donner sind die Licht- und Schallerscheinungen, die sich bei einer starken, in der Atmosphäre auftretenden Entladung von Elektrizität bemerkbar machen.

Bei der Kondensation des Wasserdampfes zu Wolken, die meist in höheren Luftschichten stattfindet, spielen elektrische Vorgänge eine große Rolle. Die Erde ist gegenüber den höheren Luftschichten stets negativ geladen. Tritt der Kondensationsvorgang plötzlich ein, wie dies beim Gewitter stets der Fall ist, dann bilden sich sehr große Spannungsunterschiede aus, die zu starken Entladungsvorgängen zwischen den verschieden geladenen Wolken, oder zwischen Wolken und Erde Veranlassung geben. Man unterscheidet Linienblitze, die mitunter mehrere Kilometer lang sind, und Flächenblitze, die Entladungsvorgänge zwischen verschieden geladenen Wolken darstellen.

Am meisten sind auf der Erde die Punkte dem Einschlagen des Blitzes ausgesetzt, die hoch über ihrer Umgebung liegen. Auch der Blitz wählt den kürzesten Weg zwischen der positiv geladenen Wolke und der nagtiv geladenen Erde. Man schützt hochragende Gebäude durch Blitzableiter, d. s. Stangen, die in Spitzen endigen, welche auf möglichst geradem Wege leitend durch einen dicken Draht mit dem Grundwasser des Erdbodens verbunden sind. Diese Stangen beugen dem Einschlagen des Blitzes einerseits vor, indem sie für eine fortwährend erfolgende stille Entladung der Elektrizität durch Spitzenwirkung sorgen, sie bieten aber auch dem einschlagenden Blitz einen gut leitenden Weg, den er wählt, ohne das Gebäude zu beschädigen.

§ 52. Geschichtliche Entwicklung

Die elektrischen Eigenschaften des Bernsteins waren schon viele Jahrhunderte v. Chr. den Griechen bekannt. Von dem Namen des Bernsteins (elektron) ist der Name für diesen Zweig der Physik entnommen worden. Die Eigenschaften der Elektrizität sind genauer erst am Ende des 16. Jahrhunderts durch den Mann entdeckt worden, der auch bei der Erforschung der magnetischen Eigenschaften hervorragend tätig war, William Gilbert (1540—1603). Er hat festgestellt, daß die Eigenschaft des Bernsteins vielen Körpern zukommt.

Die erste Elektrisiermaschine hat Otto v. Guericke konstruiert. Sie bestand aus einer Schwefelkugel, die durch eine Kurbel gedreht und mit der Hand als Reibzeug gerieben wurde.

Im Anfang des 18. Jahrhunderts sind dann viele elektrische Entdeckungen gemacht worden. So wurde durch Stephan Gray 1729 der Unterschied zwischen Leiter und Nichtleiter, durch Dufay 1733 das entgegengesetzte Verhalten von positiver und negativer Elektrizität gefunden und durch Bose die erste Elektrisiermaschine mit Reibzeug und Konduktor 1743 erbaut. Der Holländer Musschenbroek (Leidener Flasche) und der Geistliche v. Kleist in Pommern sind unabhängig voneinander etwa um 1750 auf die Eigenschaften des Kondensators aufmerksam geworden. Die erste richtige Erklärung der Kondensatorwirkung gab der Amerikaner Benjamin Franklin, der auch den ersten Blitzableiter schuf (1755). Influenzmaschinen kennt man seit der Mitte des 19. Jahrhunderts.

X. Die strömende Elektrizität

§ 53. Elektrizitätsquellen chemischer Art

1. Das galvanische Element. Zwischen zwei verschiedenen Metallen, z. B. Zink und Kupfer, die in dieselbe leitende Flüssigkeit, z. B. verdünnte Schwefelsäure, tauchen, besteht ein elektrischer Spannungsunterschied.

Dies kann am Kondensatorelektroskop (Fig. 139) *nachgewiesen werden. Zink und Kupfer oder Zink und Retortenkohle sind besonders geeignete Leiter für diesen Versuch. Metalle gleicher Art zeigen keinen Spannungsunterschied* (Fig. 147).

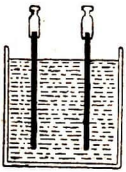


Fig. 147.

Zink wird stets gegenüber dem Kupfer oder der Kohle negativ elektrisch.

Eine Zusammenstellung zweier Leiter, die in eine leitende Flüssigkeit tauchen und dadurch einen elektrischen Spannungsunterschied erhalten, heißt ein galvanisches Element.

Zink ist der negative, Kupfer oder Kohle der positive Pol des Elementes.

Galvanisch heißt das Element nach Galvani, einem italienischen Arzt, der diese Art der Erregung von Elektrizität entdeckt hat.

Die Größe der Spannung zwischen den beiden Polen eines Elementes derselben Art ist unabhängig von der Menge der Flüssigkeit und der Größe der Metallplatten. Stets stellt sich zwischen zwei Metallplatten derselben stofflichen Art in einer bestimmten Flüssigkeit derselbe für diese Zusammenstellung eigentümliche Spannungsunterschied her.

Elemente der geschilderten Art erweisen sich als sehr undauerhaft, wenn man ihre Pole leitend verbindet. In den gebräuchlichen Elementen sind deshalb noch besondere Einrichtungen vorhanden, die der raschen Abnahme der Spannung entgegenwirken. Solche Elemente sind:

Das Daniellelement. In einem Glasgefäß befindet sich Zink in verdünnter Schwefelsäure und außerdem ein Tonzylinder, der Kupfersulfat enthält, in dem eine Kupferplatte steht. Zink ist der negative, Kupfer der positive Pol, die Spannung des Elementes beträgt etwa 1 Volt (Fig. 148).

Fig. 148.

Das Salmiakelement. Es besteht aus Zink und Kohle in einer Salmiaklösung. Die Kohle ist von einem Mantel aus pulverisiertem Braunstein umgeben. Das Element wird meist als Element für die elektrischen Klingeln benutzt. Seine Spannung beträgt etwa 1,5 Volt.

Das Trockenelement. Es ist ein Salmiakelement, in dem die Flüssigkeit durch beigefüllte Sägespäne soweit aufgesaugt ist, daß sie beim Transport des Elementes nicht ausläuft. Es kann daher z. B. als Taschenlampenbatterie verwendet werden.

2. Die Einheit der elektrischen Spannung. Der unveränderliche Spannungsunterschied zwischen den Polen eines Elementes kann uns zum Maß für andere Spannungsunterschiede dienen. Wir setzen fest:

> Der elektrische Spannungsunterschied zwischen Zink und Kupfer, die in verdünnte Schwefelsäure tauchen, sei das Grundmaß für die elektrische Spannung. Es heiße 1 Volt[1]).

Wissenschaftlich wird die Spannung 1 Volt anders definiert. Genau gemessen beträgt die Spannung eines Zinkkupferelementes 1,06 Volt. Der Name Volt ist der Einheit der Spannung zu Ehren des Physikers Volta gegeben worden.

3. Die Schaltung der Elemente. Die Größe der Spannung eines Elementes ist gegenüber den Spannungen, die wir in der Reibungselektrizität kennengelernt haben, sehr gering. Sie kann aber erhöht werden:

Verbindet man bei n Elementen den Kupferpol des ersten mit dem Zinkpol des zweiten Elementes, den Kupferpol des zweiten mit dem Zinkpol des dritten Elementes usw., so herrscht zwischen dem Zinkpol des ersten und dem Kupferpol des letzten Elementes eine n-mal so große Spannungsdifferenz (Fig. 149). Diese Art der Schaltung heißt Hintereinanderschaltung.

Schaltet man n Elemente so, daß alle Kupferpole unter sich und alle Zinkpole unter sich verbunden sind, so herrscht zwischen Kupfer- und Zinkpol nur dieselbe Spannung wie bei einem Element. Durch diese Schaltung ist nur die Größe

1) Exakte Definition siehe Oberstufe.

der Metallplatten, die einander gegenüberstehen, geändert worden; es erklärt sich also, daß die Spannung dadurch nicht vergrößert wird. Diese Schaltung heißt Parallelschaltung (Fig. 150).

Mehrere zusammengeschaltete Elemente nennt man eine Batterie.

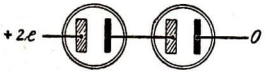


Fig. 149.

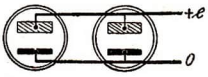


Fig. 150.

4. Der Akkumulator. Der Akkumulator ist ein Element, in dem die Spannung ebenfalls durch chemische Vorgänge (§ 54) an den Platten erzeugt wird. Er besteht aus einer reinen Bleiplatte und einer mit Bleisuperoxyd überzogenen Bleiplatte, die beide in verdünnte Schwefelsäure eintauchen. Ist der Akkumulator ausgebraucht, so kann er dadurch, daß man elektrischen Strom längere Zeit durch ihn hindurchschickt, wieder gebrauchsfähig gemacht werden (§ 54, 4). Seine Spannung beträgt 2 Volt.

§ 54. Stromwirkung und Stromstärke

1. Die Wärmewirkung. *Verbinden wir die Pole eines Akkumulators durch einen leitenden Draht, so tritt Erwärmung ein, die bis zur Rotglut und zum Durchschmelzen des Drahtes führen kann. Noch stärker zeigt sich die Wirkung bei Benutzung der Lichtleitung. Verbinden wir dabei gleichzeitig die Pole der Lichtleitung mit Knopf und Gehäuse des Elektroskops, so zeigt sich, daß der Spannungsunterschied zwischen den Polen trotz der leitenden Verbindung nicht aufgehoben wird.*

In dem Draht herrscht demnach wie bei dem durch Fig. 148 dargestellten Versuch ein dauernder Spannungsabfall. Aus der erwärmenden Wirkung müssen wir darauf schließen, daß dauernd ein Ausgleich der Ladung erfolgt, daß also ein dauernder Strom von Elektrizität zwischen den Polen fließt. Da der Spannungsunterschied bestehen bleibt, muß sehr viel Elektrizität in den Polen verfügbar sein und durch den Draht strömen.

Verbinden wir die Pole eines Elementes durch einen Leiter, so fließt darin dauernd ein elektrischer Strom, der an seinen Wirkungen erkennbar ist.

2. Die chemische Wirkung. Eine Flüssigkeit, die den elektrischen Strom leitet, nennen wir Elektrolyt. Die metallischen Zuführungen nennen wir die Elektroden. Die Elektroden bestehen häufig aus Platin, das von Säuren nicht angegriffen wird (Fig. 151).

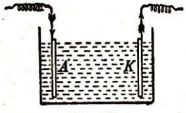


Fig. 151.

Leiten wir den elektrischen Strom einer Batterie durch verdünnte Schwefelsäure, so scheidet sich an der mit dem positiven Pol verbundenen Platinelektrode Sauerstoff, an der anderen Platinelektrode Wasserstoff aus (Fig. 152).

Leiten wir den Strom durch eine Kupfersulfatlösung, so wird an dem positiven Pol ebenfalls Sauerstoff und an dem negativen Kupfer ausgeschieden.

Leiten wir den Strom durch eine Lösung von Zinkchlorid ($ZnCl_2$), *so wird am positiven Pol Chlor und am negativen Pol Zink abgeschieden.*

Aus diesen und anderen Versuchen ergibt sich:

An dem negativen Pol wird das Metall oder der Wasserstoff, an dem positiven Pol Sauerstoff oder Chlor abgeschieden.

Nehmen wir den ersten Versuch in der Weise vor, daß wir untersuchen, wieviel Gas in 1, 2, 3 usw. Minuten entwickelt wird, so ergibt sich:

Die Menge des ausgeschiedenen Gases (Stoffes) ist proportional der Zeit, in der ein unveränderlicher Strom durch die Flüssigkeit fließt.

[Diese Erscheinungen werden durch folgende Vorstellung erklärt. Man nimmt an, in der Flüssigkeit seien viele Moleküle H_2SO_4 in 2 H und SO_4 ($CuSO_4$ in Cu und SO_4, $ZnCl_2$ in Zn und 2 Cl) zerfallen. Die am positiven Pol abgeschiedenen H-Atome (Cu-Atome, Zn-Atome) seien positiv elektrisch, die anderen Atomkomplexe negativ geladen. Sobald der Strom durch die Flüssigkeit fließt, wandern die positiv geladenen Atome nach dem negativen Pol, geben dort ihre Ladung ab und werden ausgeschieden, die negativ geladenen wandern nach dem positiven Pol, geben ihre Ladung ab und werden ausgeschieden. Die geladenen Atomgruppen SO_4, Cl nennt man nach dem griechischen Wort für wandern negative Ionen, H, Cu, Zn nennt man positive Ionen.

Bei dem Ausscheiden von SO_4 tritt eine chemische Nebenreaktion ein. Es verbindet sich SO_4 mit einem Molekül Wasser zu H_2SO_4 und scheidet ein Atom O als Sauerstoff aus.

Die chemischen Reaktionen sind also folgende:

H_2SO_4 positiver Pol: $SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$
negativer Pol: 2 H

$CuSO_4$ positiver Pol: $SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$ (bei Platinblech)
negativer Pol: Cu

$ZnCl_2$ positiver Pol: 2 Cl
negativer Pol: Zn.]

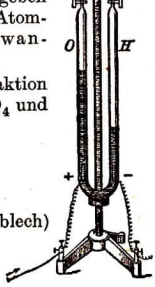


Fig. 152.

3. Das Maß der elektrischen Stromstärke.

Unter der elektrischen Stromstärke verstehen wir die Elektrizitätsmenge, die in einer Sekunde durch den Leiterquerschnitt fließt.

Diese Definition des elektrischen Stromes ergibt sich aus unserer Grundvorstellung von dem Wesen der Elektrizität.

Betrachten wir unter diesem Gesichtspunkt das letzte Versuchsergebnis: In gleichen Zeiten scheidet ein unveränderlicher Strom gleiche Stoffmengen aus. In 2, 3, 4 usw. Minuten ist dann die doppelte, dreifache, vierfache Elektrizitätsmenge durch den Leiterquerschnitt geflossen. Das Experiment erläutert also auch den Satz, der auch in anderer Weise experimentell nachgewiesen werden kann:

Die ausgeschiedene Stoffmenge ist proportional der durch den Elektrolyt gegangenen Elektrizitätsmenge.

Ist aber die Stärke eines elektrischen Stromes abhängig von der Elektrizitätsmenge, die in 1 Sekunde durch den Leiterquerschnitt fließt, so kann die ausgeschiedene Stoffmenge nun auch ein Maß für die Stärke des Stromes abgeben. Wir setzen daher fest:

Die Stärke des elektrischen Stromes ist der von dem Strom ausgeschiedenen Stoffmenge proportional.

Als Einheit der Stromstärke wählen wir dieselbe Maßeinheit, die durch Reichsgesetz festgelegt ist:

Die Einheit der Stromstärke besitzt der Strom, der in 1 sec 1,118 mg Silber ausscheidet. Dieses Maß wird 1 Ampere genannt.

Diese Benennung ist nach dem französischen Physiker Ampère erfolgt.

Wir können auch festlegen:

Die Einheit der Stromstärke besitzt der Strom, der in 1 sec 0,328 mg Cu ausscheidet.

Ebenso wäre die Festlegung nach der ausgeschiedenen Knallgasmenge zulässig (0,174 ccm Knallgas in 1 sec).

4. Der geschlossene Stromkreis. *Bringen wir in ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Gefäß zwei kleine aus Zink und Kupfer gebildete Elemente, die an einem Kork befestigt sind, und verbinden wir die Pole des einen Elementes leitend miteinander, während die Pole des anderen getrennt bleiben, so zeigt sich, daß in dem Element, das einen Strom liefert, das Zink rasch verbraucht wird. Es zeigt sich auch, daß bei diesem Element in der Flüssigkeit ein chemischer Vorgang stattfindet, denn am Kupfer steigen dauernd Gasblasen auf* (Fig. 153).

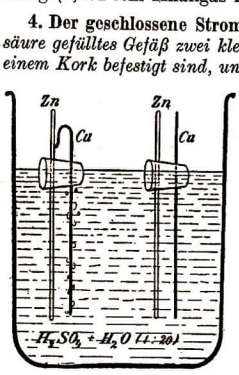


Fig. 153.

Die Erzeugung der elektrischen Spannung eines Elementes ist auf chemische Ursachen zurückzuführen.

Unterbricht man die durch die Flüssigkeit hergestellte leitende Verbindung zwischen Kupfer und Zink, indem man die beiden Metalle in verschiedene Gefäße eintaucht, so erhält man keinen Strom, wenn man Kupfer und Zink mit einem Draht verbindet. Dies spricht dafür, daß im Inneren des Elementes ein Strom fließt, sobald er außen fließt.

Das wichtige Ergebnis des Versuchs ist also:

Der elektrische Strom muß immer einen geschlossenen Leiterkreis vorfinden, wenn er dauernd fließen soll.

Ferner ergibt sich daraus, daß nirgends in einem Stromkreis Elektrizität angehäuft wird, daß überall die zufließende Elektrizität auch abfließen muß, der Satz:

Der von einem Element gelieferte Strom fließt überall innen und außen in gleicher Stärke.

[Die Vorgänge im Element und Akkumulator. Betrachten wir den oben ausgeführten Versuch mit den beiden kleinen Elementen noch einmal genauer, so ergibt sich: Die Tatsache, daß in dem Element, das Strom liefert, an dem Kupfer ein Gas ausgeschieden wird (und zwar Wasserstoff) beweist, daß in diesem Element auch die Flüssigkeit durch den Strom beeinflußt ist. Der Wasserstoff tritt an der Stelle auf, wo der Strom aus der Flüssigkeit heraustreten müßte, wenn er durch die Flüssigkeit in demselben Sinne weiterginge. Das entspricht unserer Erfahrung bei der Elektrolyse. An der Eintrittsstelle des Stromes (dem Zinkpol) müßte, wenn der Strom durch die Flüssigkeit geht, SO_4 ausgeschieden werden. Wirkt das SO_4 (anstatt H_2SO_4) auf das Zink, so muß das Zink sich mit ihm nach der Formel verbinden

$$Zn + SO_4 = ZnSO_4.$$

Das Zink würde aufgelöst, ohne daß Wasserstoff entstünde, während bei der chemischen Auflösung von Zn in H_2SO_4 am Zink H entsteht. Die Wirkung ist daher nur verständlich, wenn man elektrolytische Vorgänge annimmt.

Beide Umstände sprechen also dafür, daß der elektrische Strom in dem Element auch im Inneren des Elementes fließt, und zwar dort vom Zink zum Kupfer. Außen fließt der Strom vom Kupfer zum Zink. Der Strom durchläuft also eine vollständig geschlossene Bahn, einen vollständigen Stromkreis.

Ein Akkumulator enthält in ausgebrauchtem Zustand als Flüssigkeit eine $PbSO_4$-Lösung. Läßt man den elektrischen Strom durch den Akkumulator gehen, so scheidet sich am negativen Pol Pb und am positiven Pol SO_4 ab. Der positive Pol wird dadurch zu PbO_2 oxydiert, und am negativen Pol scheidet sich reines Blei ab. Ist dies in ausreichendem Maße geschehen, so besitzt der Akkumulator eine Spannung von zwei Volt und kann seinerseits Strom liefern.

Bei dem geladenen Akkumulator spielt die Bleiplatte die Rolle des Zinks und die Bleisuperoxydplatte die Rolle des Kupfers. Die leitende Flüssigkeit besteht jetzt, nachdem das $PbSO_4$ durch das Laden des Akkumulators zersetzt ist, aus verdünnter H_2SO_4. An der PbO_2-Platte wird beim Stromdurchgang H_2 abgeschieden, und es entsteht $PbSO_4$ und H_2O, an der Pb-Platte wird SO_4 abgeschieden, und es entsteht $PbSO_4$. Ist die weitere Bildung von $PbSO_4$ nicht mehr möglich, so ist der Akkumulator ausgebraucht. Er muß dann wieder neu geladen werden.

Positiver Pol für den äußeren Stromkreis ist die braun gefärbte PbO_2-Platte. Mit diesem Pol muß auch der positive Pol der Stromquelle verbunden werden, die den Akkumulator lädt.]

5. Die sonstigen Stromwirkungen. Außer diesen beiden Wirkungen zeigt der elektrische Strom genau so wie die elektrische Entladung mechanische, magnetische, optische, physiologische und andere Wirkungen. Auf einige von ihnen werden wir in besonderen Abschnitten zu sprechen kommen.

§ 55. Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes

1. Die Einwirkung auf die Magnetnadel. *Halten wir einen stromdurchflossenen Draht dicht so über eine Magnetnadel, daß der Strom in der Richtung der Nadel*

fließt, dann wird die Nadel abgelenkt. Die Richtung der Ablenkung ist durch folgende Regel bestimmt:

Ampèresche Schwimmerregel: Schwimmt man mit dem Strome und sieht nach der Nadel hin, so wird der Nordpol nach links abgelenkt.

Rechte Handregel: Hält man die rechte Hand so, daß die Finger in der Richtung des Stromes zeigen und die Handfläche der Nadel zugewandt ist, dann wird die Nadel in der Richtung des Daumens abgelenkt (Fig. 154).

Fig. 154.

2. Die magnetischen Kraftlinien des Stromes. *Führen wir einen geradlinigen stromdurchflossenen Draht senkrecht durch ein waagrecht liegendes Stück Pappe und streuen Eisenfeilspäne auf die Pappe, so ordnen sich die Späne in Kraftlinien, wie sie* Fig. 155 *darstellt. Lassen wir den Draht die Pappe zum zweitenmal in entgegengesetzter Richtung durchsetzen, so ergibt sich ein Kraftlinienbild nach* Fig. 156, *das die durch einen kreisförmigen Stromleiter hervorgerufenen Kraftlinien wiedergibt.*

Halten wir einen stromdurchflossenen Kupferdraht in Eisenfeilicht, so bildet sich um den Draht ein Wulst von Eisenfeilspänen.

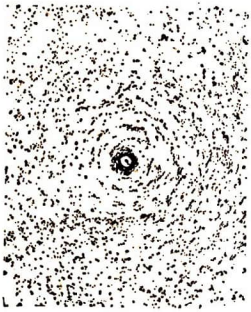


Fig. 155.

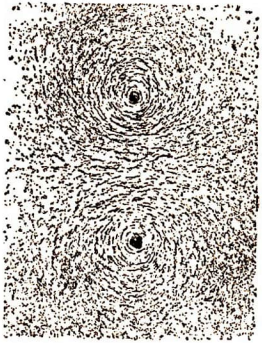


Fig. 156.

Untersuchen wir die Richtung der um einen geradlinig fließenden Strom laufenden Kraftlinien mit einer kleinen Magnetnadel, so ergibt sich für den Kraftlinienverlauf die Regel:

Hält man die rechte Faust so, daß vier Finger den Draht umfassen und der Daumen die Richtung des Stromes zeigt, so geben die Finger die Richtung der Kraftlinien an.

Aus dem Kraftlinienbild eines kreisförmigen Leiters ergibt sich:

Die magnetischen Kraftlinien stehen überall senkrecht auf der Ebene des Stromkreises.

3. Der Elektromagnet. Läßt man den elektrischen Strom durch einen Leiter fließen, der derart gewickelt ist, wie dies Fig. 157 angibt, so verlaufen die Kraftlinien des Stromes so, wie es die Figur andeutet. Man nennt einen Leiter dieser Form ein Solenoid. Den Verlauf der Kraftlinien kann man an Eisenfeilspänen erkennen. Das Solenoid gleicht einem Magneten. Durch Nähern einer Magnetnadel kann man feststellen:

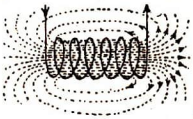


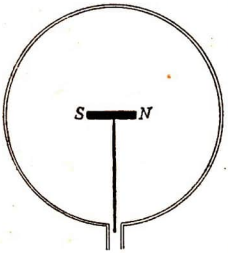
Fig. 157.

Blickt man auf die Stirnfläche des Solenoids, so ist das Ende des Solenoids, das im Sinne des Uhrzeigers vom Strome umflossen wird, ein magnetischer Südpol, das Ende, das entgegen dem Sinne des Uhrzeigers vom Strome umflossen wird, ein magnetischer Nordpol.

Bringt man in das Innere eines Solenoids einen Stab aus Eisen, so wird dadurch die Wirkung außerordentlich verstärkt. Man erhält einen Elektromagneten, der solange, wie der Strom den Leiter durchfließt, starke magnetische Eigenschaften besitzt und nach Unterbrechung des Stromes nahezu unmagnetisch ist. Solche Magnete können erheblich mehr leisten als die permanenten Magnete aus Stahl. Man benutzt sie daher überall da, wo ein starkes magnetisches Feld erzeugt werden soll. Dies ist vor allem bei den elektrischen Maschinen der Fall. Der Elektromagnet kann aber auch dazu benutzt werden, durch seine anziehende Kraft als Kran, besonders für die Hebung von Eisenschrott, zu dienen.

Fig. 158.

Fig. 158 stellt einen Elektromagneten mit Anker dar.



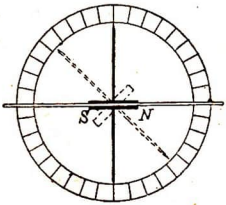


Fig. 159.

4. Nadelgalvanometer. *Eine Magnetnadel stellt sich in der Nordsüdrichtung ein. Sie wird von einem in derselben Richtung fließenden starken Strom aus ihrer Richtung mehr abgelenkt als von einem schwachen. Die Wirkung auf die Nadel ist größer, wenn der Strom dicht an der Nadel vorbeifließt, noch größer, wenn er die Nadel in ihrer Längsrichtung in einer Schleife umfließt.*

Man kann die Stärke des Stromes durch die magnetische Wirkung messen, indem man z. B. die Nadel im Inneren eines kreisförmigen Stromes anbringt (Fig. 159 oben) und aus der Ablenkung der Nadel (Fig. 159 unten) auf die Stärke des Stromes schließt. Man hat heute aber Strommeßinstrumente, die

bequemer als diese Einrichtung zu handhaben sind, deshalb sei das nur erwähnt. Der Strom muß verhältnismäßig stark sein, damit die Nadel kräftig abgelenkt wird. Ein Meßinstrument, das die Stromstärke aus der magnetischen Ablenkung erkennen läßt, heißt Galvanometer.

Läßt man den Strom nicht einmal, sondern in vielen Kreisen um die Magnetnadel herumfließen, so wird die ablenkende Kraft des Stromes im Verhältnis der Windungszahl des Stromes verstärkt.

Benutzt man eine Magnetnadel, die um eine horizontale Achse drehbar und durch einen vertikal stehenden Zeiger wie ein Waagebalken ausbalanciert ist, und legt man den Leiter in horizontalen Wicklungen um die Magnetnadel, so wird die Nadel beim Durchgang des Stromes wie ein Waagebalken abgelenkt (Fig. 160). Mit einem so gebauten Instrument kann man sehr schwache Ströme messen. Es besitzt vor dem zuerst genannten Galvanometer den Vorzug, daß es nicht in der magnetischen Nord-Südrichtung aufgestellt zu sein braucht.

5. Drehspulengalvanometer. Die Wirkung des zuletzt beschriebenen Instrumentes beruht darauf, daß sich ein Magnet in der Richtung der Kraftlinien einzustellen bestrebt ist, die von einer stromdurchflossenen festliegenden Drahtspule erzeugt werden (Fig. 161, links).

Stellt man eine stromdurchflossene bewegliche Spule schräg in ein festliegendes Magnetfeld (Fig. 161, rechts), so beobachtet man, daß sie sich so lange dreht, bis sie quer zu den Kraftlinien des Magnetfeldes steht, d. h. bis ihr eigenes Kraftfeld mit dem Kraftfeld des festliegenden Magneten in dieselbe Richtung sich eingestellt hat.

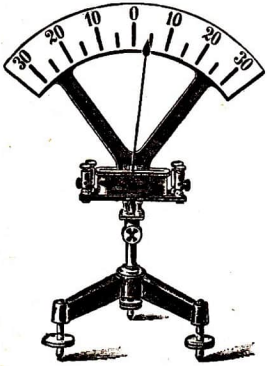


Fig. 160.

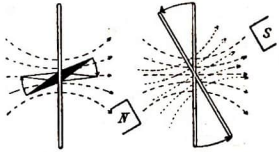


Fig. 161.

Man kann also auch mit einem feststehenden Magneten und einer beweglichen stromdurchflossenen Spule die elektrische Stromstärke messen. Eine solche Einrichtung hat viele Vorteile gegenüber der früher beschriebenen. Man kann den Magneten sehr stark machen (kräftiger Hufeisenmagnet) und dadurch eine große Empfindlichkeit erreichen. Außerdem ist auf die bewegliche Spule die Kraft des Erdmagnetismus kaum von Einfluß, weil das Feld zwischen den Polen des Magneten sehr viel stärker als das Erdfeld ist. Man kann also auch dieses Instrument in jeder Stellung verwenden.

Die gebräuchlichen Strommeßinstrumente sind meist nach diesem Gesichtspunkt gebaut. Die bewegliche Spule wird durch eine dünne Spiralfeder in einer bestimmten Gleichgewichtslage gehalten. Beim Messen wird sie abgelenkt. Sie spannt dabei die Feder. Je stärker diese gespannt wird, desto größer ist die Stromstärke. Im Innern der drehbaren Spule ist meist noch ein feststehender Eisenkern angebracht, der die Kraftlinien des Feldmagneten sammelt und so das Feld verstärkt, das auf die stromdurchflossene Spule wirkt. Instrumente dieser Art heißen Drehspulengalvanometer (Fig. 162).

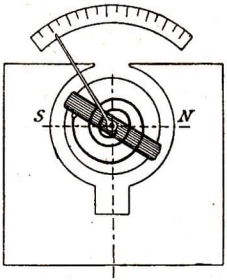


Fig. 162.

Eicht man die Skala in der Weise, daß man mit Hilfe der elektrolytisch ausgeschiedenen Stoffmenge die Stromstärke bei einem bestimmten Ausschlag mißt, so hat man dann ein Instrument, das rasch und sicher den Strom in Ampere mißt.

§ 56. Die Gesetze des Stromkreises

1. Der Widerstand. *Wir bilden aus einem Akkumulator, einem geeichten Drehspulenamperemeter, das den Strom anzeigt, und Leitungsdrähten einen Stromkreis. Wir ersetzen die Leitungsdrähte durch andere von anderem Querschnitt und anderer Länge, aber demselben Material in der Weise, daß immer derselbe Strom durch die Leitung fließt* (Fig. 163). *Es ergibt sich:*

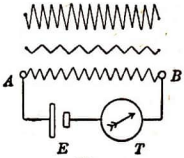


Fig. 163.

Je länger der Draht ist, den ein Strom durchfließen muß, desto geringer ist die Stromstärke bei sonst unveränderten Bedingungen. Das gleiche gilt für die Abnahme des Querschnittes eines Leitungsdrahtes. Wir schließen daraus:

Der Strom findet beim Durchfließen eines leitenden Körpers einen Widerstand.

Dieser Widerstand ist proportional der Länge und indirekt proportional dem Querschnitt des Drahtes.

Schalten wir nun Drähte von gleichem Querschnitt aber verschiedenem Material in den Stromkreis ein, und bemessen die Länge in jedem Fall so, daß derselbe Strom fließt, dann ergibt sich:

Die verschiedenen Metalle und Leiter bieten dem elektrischen Strome einen verschiedenen Widerstand.

Den Widerstand, den ein Draht von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt besitzt, nennen wir den spezifischen Widerstand des betreffenden Leiters.

Diesen spezifischen Widerstand können wir durch den angegebenen Versuch bestimmen, wenn wir ein Vergleichsmaß zugrunde legen.

Als Maßeinheit für den Widerstand ist der Widerstand gewählt worden, den ein Quecksilberfaden von 1,063 m Länge bei 1 mm² Querschnitt besitzt.

Diese Widerstandseinheit führt die Bezeichnung 1 Ohm (Ohm = Ω)

Sie ist nach dem deutschen Physiker Ohm genannt.

Die spezifischen Widerstände der wichtigsten Leiter ergeben sich aus der nachfolgenden Tabelle:

Silber	0,016 Ω	Neusilber	0,3 Ω	Schwefelsäure	5% 42000 Ω
Kupfer	0,017 „	Nickelin	0,42 „	„	15% 18000 „
Aluminium	0,032 „	Quecksilber	0,95 „	„	30% 13000 „
Eisen	0,09—0,15 „	Kohle	50—1000 „	„	80% 90000 „
Messing	0,08 „			Kochsalzlösung	20% 50000 „

Bezeichnen wir allgemein den spezifischen Widerstand eines Leiters mit dem Buchstaben ϱ, dessen Wert aus der Tabelle ablesbar ist, so läßt sich der Widerstand eines Drahtes von l m Länge und q mm² Querschnitt nach der Formel berechnen:

$$\boxed{W = \frac{\varrho \cdot l}{q}\,\Omega}.$$

Bilden wir einen Stromkreis aus einem Element, dessen Polplatten gegeneinander verschiebbar sind, und einem Strommeßinstrument, so läßt sich zeigen, daß die Stärke des Stromes auch von dem Widerstand abhängig ist, den die Flüssigkeit dem Durchgang des Stromes entgegensetzt.

Auch der Widerstand einer Flüssigkeit ist proportional der Länge und indirekt proportional dem Querschnitt der Flüssigkeit, durch die der Strom fließt.

Demnach macht sich im Innern eines Elementes und eines Akkumulators, der Strom liefert, ein Widerstand bemerkbar. Wir nennen ihn den inneren Widerstand. Er ist meist nicht sehr groß, weil der Abstand der Platten gering und der Querschnitt der Flüssigkeit groß ist.

2. Das Ohmsche Gesetz. *Bilden wir nun einen Stromkreis aus Akkumulatoren, deren elektrische Spannung, in Volt gemessen, wir kennen, und Widerständen, wie sie uns, in Ohm gemessen, in einem Widerstandskasten zur Verfügung stehen, und benutzen wir zur Messung des Stromes ein Drehspuleninstrument, das nach Ampere geeicht ist, so ergibt sich das Gesetz:*

> Der in Ampere gemessene Strom eines Stromkreises ist gleich dem Quotienten aus der in Volt gemessenen Spannung der Stromquelle und dem in Ohm gemessenen Widerstand der gesamten Stromleitung.

Dieses Gesetz heißt das Ohmsche Gesetz.

Bezeichnen wir die Spannung der Stromquelle mit E, den gesamten inneren und äußeren Widerstand der Leitung mit W und den Strom mit i, so ist

$$E = i \cdot W \text{ Volt}$$
$$i = \frac{E}{W} \quad \text{Ampere}$$
$$W = \frac{E}{i} \quad \text{Ohm}$$

Der Gesamtwiderstand setzt sich zusammen aus den zu berechnenden oder zu messenden Widerständen der einzelnen Leitungen.

Der Strom ist überall im Stromkreis gleichstark. Sind z. B. die Widerstände in einem Stromkreis w_1, w_2 und w_3, so muß sein

$$E = i \cdot (w_1 + w_2 + w_3)$$
$$E = i \cdot w_1 + i \cdot w_2 + i \cdot w_3$$

oder auch

$$E = E_1 + E_2 + E_3.$$

Die Spannung verteilt sich so im Stromkreis, daß $E_1 = i \cdot w_1$, $E_2 = i \cdot w_2$, $E_3 = i \cdot w_3$ ist, d. h. daß da der größere Spannungsabfall ist, wo der größere Widerstand zu überwinden ist.

Das Gesetz von Ohm gibt uns nun auch Aufschluß darüber, was für Vorteile erreicht werden, wenn man Elemente parallel zueinander schaltet. Da auf diese Weise bei n parallel geschalteten Elementen der Querschnitt des Flüssigkeitsleiters n mal so groß wird, wird der innere Widerstand nur den n^{ten} Teil vom Widerstand eines Elementes betragen.

Hintereinanderschaltung von Elementen dient also zur Erhöhung der Spannung, Parallelschaltung zur Verminderung des inneren Widerstandes.

3. Die Gesetze der Stromverzweigung. Verzweigt sich in dem Punkte A ein Leiter in zwei oder mehr Leiter, die an einer Stelle B wieder zusammentreffen, so wird der Strom, der in dem Stromkreis fließt, von diesen Leitern gleichzeitig weitergeführt (Fig. 164). Sind die Stromstärken in drei Zweigen z. B. i_1, i_2 und i_3, so muß das Gesetz gelten:

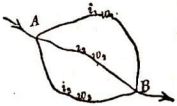


Fig. 164.

Der Gesamtstrom I des Stromkreises ist gleich der Summe der Einzelströme

$$I = i_1 + i_2 + i_3.$$

Betragen die Widerstände der einzelnen Zweige w_1, w_2 und w_3, so zeigt ein Versuch, daß in allen Fällen beträgt:

$$i_1 = \frac{E}{w_1}, \quad i_2 = \frac{E}{w_2}, \quad i_3 = \frac{E}{w_3},$$

wobei E die elektrische Spannung zwischen den Punkten A und B ist, die für alle Zweige gleich sein muß, weil in einem Punkt keine verschiedene elektrische Spannung herrschen kann.

Die Stromstärken in den Leiterzweigen verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände.

Diese Gesetze heißen die Stromverzweigungsgesetze von Kirchhoff.

4. Das Voltmeter. Wird ein Strommeßinstrument so zwischen zwei Punkten A und B einer Stromleitung angeschlossen, daß der Strom durch den Leiter und das Galvanometer gleichzeitig fließen kann, dann wird dadurch eine Stromverzweigung zwischen A und B herbeigeführt. Man sagt, das Strommeßinstrument ist als Nebenschluß eingeschaltet. Fließt der Strom i_1 durch das Galvanometer, und besitzt es den Widerstand w_1, so bedeutet zwischen diesen Größen und der Spannung E, die zwischen den Punkten A und B herrscht, nach dem Kirchhoffschen Gesetz die Beziehung

$$i_1 = \frac{E}{w_1} \quad \text{oder} \quad E = i_1 w_1.$$

Der Widerstand w_1 des Galvanometers kann als bekannt vorausgesetzt werden. Der Strom i_1 wird durch den Ausschlag an der Skala meßbar sein. Es ist dann bei jedem bestimmten Ausschlag des Instrumentes gleichzeitig auch die Spannung E bekannt; denn zu jedem bestimmten i_1 und w_1 gehört ein bestimmtes E.

Für den Stromleiter selbst, der zwischen A und B den Widerstand w_2 haben möge und durch den der Strom i_2 fließen soll, besteht die Beziehung $E = i_2 \cdot w_2$.

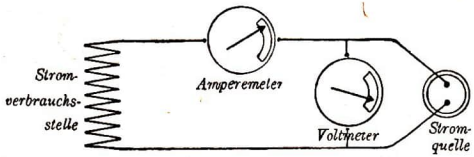


Fig. 165.

Diese Spannung E muß genau so groß wie oben sein. Sie kann also sowohl in dem einen als auch in dem anderen Stromzweig durch Strommessung bestimmt werden, ohne Rücksichtnahme auf die im anderen Stromzweig herrschenden Umstände. Würde man demnach bei dem Strommeßinstrument an jedem Teilstrich der Skala auch angeben, wie groß E in Volt gemessen dann ist, wenn der Zeiger einen Strom anzeigt, der diesen Ausschlag bewirkt, so könnte man damit direkt die Spannung zwischen A und B messen. Wir hätten ein Instrument, das die Spannung in Volt mißt und Voltmeter genannt wird, im Gegensatz zu Strommeßinstrumenten, die Amperemeter heißen.

Wir unterscheiden (Fig. 165):

Voltmeter sind nach Volt geeichte Galvanometer, die immer im Nebenschluß zu dem Hauptstrom liegen und einen großen Widerstand besitzen, damit sie nur wenig Strom verbrauchen.

Amperemeter sind nach Ampere geeichte Instrumente, die immer im Hauptstrom selbst eingeschaltet sein müssen, damit der gesamte Strom durch sie fließt, und die sehr kleinen Widerstand besitzen müssen, damit der Hauptstrom nur wenig durch sie geschwächt wird.

§ 57. Strom, Magnetfeld und Bewegung

1. Die dynamische Wirkung des Stromes. *Führen wir durch ein starkes magnetisches Feld einen geradlinig ausgespannten Draht* (Fig. 166) *derart, daß er senkrecht zu den Kraftlinien des Feldes verläuft, und lassen dann einen Strom durch den Draht fließen, so zeigt sich folgendes:*

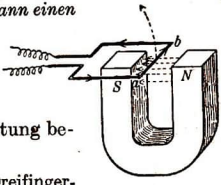


Fig. 166.

Ein von einem Strom durchflossener Draht wird von einem Magnetfeld, dessen Kraftlinien senkrecht zu ihm verlaufen, senkrecht zu der aus Kraftlinienrichtung und Stromrichtung bestimmten Ebene bewegt:

Die Richtung der Ablenkung ergibt sich nach der Dreifingerregel der linken Hand: Hält man die Finger der linken Hand in der in Fig. 167 angedeuteten Weise, und wird der Mittelfinger in die Richtung des Stromes, der Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien gehalten, so gibt der Daumen die Richtung der Bewegung des Stromleiters an.

Dieser Versuch erläutert, auf welche Weise eine Bewegung aus dem Zusammenwirken von Strom und magnetischem Feld erzielt werden kann. Er veranschaulicht die Wirkungsweise des Elektromotors.

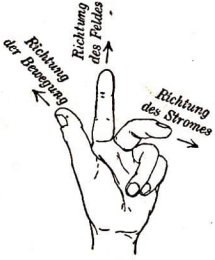


Fig. 167.

2. Die elektrische Induktion. *Bilden wir aus einem Galvanometer und dem in dem vorigen Versuch benutzten Leitungsdraht einen Stromkreis, ohne daß wir eine Elektrizitätsquelle einfügen, und führen dann den Leitungsdraht schnell so durch ein starkes Magnetfeld, daß er die Kraftlinien senkrecht schneidet, dann fließt in dem Draht ein Strom, den das Galvanometer anzeigt.*

Fig. 168.

Schneidet ein Leiter senkrecht die Kraftlinien eines magnetischen Feldes, so entsteht in dem Leiter ein elektrischer Strom.

Die Richtung des Stromes ergibt sich aus der Dreifingerregel der rechten Hand: Hält man die Finger der rechten Hand in der in Fig. 168 angedeuteten Weise, und wird der Daumen in die Richtung der Bewegung, der Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien gehalten, dann gibt der Mittelfinger die Richtung des Stromes an.

Dieser Verusch erläutert, in welcher Weise ein Strom durch das Zusammenwirken einer Bewegung und eines magnetischen Feldes erzeugt werden kann.

Man nennt die Erzeugung eines elektrischen Stromes durch Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Feld Induktion[1]).

Man sagt, in dem Leiter wird durch die Bewegung ein Strom induziert.

Weitere Versuche zeigen:

Die Induktionswirkung wird verstärkt, wenn man nicht einen geradlinigen Draht, sondern mehrere Windungen senkrecht durch die Kraftlinien führt.

Steckt man einen permanenten Stabmagnet in eine mit einem Galvanometer verbundene Drahtspule, so entsteht ein Induktionsstrom beim Einführen und ein entgegengesetzt gerichteter Strom beim Herausziehen des Magneten. Steckt man zwei Drahtspulen ineinander und schickt durch die innere einen Strom, so entsteht beim Schließen des Stromes in der äußeren Spule ein Stromstoß und ein diesem entgegengesetzter Stromstoß beim Unterbrechen des Stromes. Auch durch Wechsel der Stromrichtung in der ersten Spule kann man wechselnde Stromstöße in der zweiten Spule hervorrufen. Ebenso beim Verstärken und Schwächen des ersten Stromes.

Aus diesen Versuchen ergibt sich:

Ändert sich die Stärke des magnetischen Feldes, das einen Leiter durchsetzt oder umschließt, so entsteht in dem Leiter ein elektrischer Strom, der nur so lange in gleicher Richtung fließt, wie die Änderung im gleichen Sinne vor sich geht.

Entgegengesetzte Änderungen rufen in dem Leiter einen Strom von wechselnder Richtung oder einen Wechselstrom hervor.

Auf dieser Erscheinung beruht die Erzeugung von Elektrizität durch mechanische Arbeit in der Dynamomaschine.

Über die Richtung des Induktionsstromes belehrt uns folgender Versuch: Zwei gleichgewickelte Spulen stecken ineinander. Durch die innere Spule wird ein Strom geschickt, der so fließt, daß z. B. rechts ein Nordpol und links ein Südpol erzeugt wird. Dann fließt beim Einschalten in der äußeren Spule ein Induktionsstrom, der links einen Nordpol und rechts einen Südpol hervorruft. Beide Kraftfelder wirken gegeneinander. Beim Ausschalten des Stromes, wenn also das Feld des inneren Stromes verschwindet, fließt ein Induktionsstrom, der rechts einen Nordpol und links einen Südpol erzeugt. Wieder wirkt der Induktionsstrom der „Änderung" des Feldes des induzierenden Stromes entgegen. Dieselben Erfahrungen macht man bei allen anderen Arten der Erzeugung von Induktionsströmen. Es gilt also die Regel:

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß sein magnetisches Feld der Änderung des induzierenden magnetischen Feldes entgegenwirkt.

§ 58. Geschichtliche Entwicklung

Um das Jahr 1790 hatte der Professor der Anatomie in Bologna, Galvani, gefunden, daß Froschschenkel zusammenzuckten, wenn bei einer Elektrisiermaschine Funken übersprangen. Bei der Untersuchung, ob der Froschschenkel auch auf die atmosphärische Elektrizität anspräche, entdeckte er zufällig, daß der

1) inducere = einführen, auftreten.

kupferne Haken, an dem der Froschschenkel aufgehängt war, und das eiserne Geländer, gegen das Froschschenkel und Haken im Winde geweht wurden, mit dem Muskel einen elektrischen Stromkreis bildeten. Er nahm an, daß die Quelle der Elektrizität der Muskel sei, und glaubte den Sitz tierischer Elektrizität entdeckt zu haben. Die richtige Erklärung dieses Versuches gab erst einige Jahre später der italienische Physiker Volta, indem er darauf hinwies, daß stets bei der Berührung von Metallen mit leitenden Flüssigkeiten Elektrizität erzeugt wird.

Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes wurde 1819 von dem Dänen Oerstedt entdeckt. Diese Entdeckung machte großes Aufsehen. Der Franzose Ampère erforschte schon im Jahre darauf eingehend die Wirkung, die von zwei Stromkreisen aufeinander ausgeübt wurde. Auch die Gesetze, die er fand, wurden rasch überall bekannt. Lange Jahre unbeachtet blieben aber die wichtigen Forschungsergebnisse des deutschen Physikers Georg Simon Ohm, der im Jahre 1826 das heute nach ihm benante Gesetz des Stromkreises gefunden hatte.

Die Induktionserscheinungen und die Wirkung des Stromes auf die leitende Flüssigkeit sind von dem englischen Physiker Michael Faraday um 1840 eingehend experimentell untersucht und theoretisch erklärt worden.

XI. Stromerzeugende Maschinen

§ 59. Die Gleichstromdynamomaschine

1. Erklärung der Wirkungsweise der Dynamomaschine. Bringen wir zwischen die Pole eines starken Magneten ein Rechteck aus Kupferdraht, das auf einer Achse so befestigt ist, wie Fig. 169 andeutet, dann wird bei der Drehung des Rechtecks in den senkrecht zu den Kraftlinien verlaufenden Stücken AB und CD des Drahtrechtecks ein Strom induziert. Die Richtung des induzierten Stromes ergibt sich nach der Dreifingerregel der rechten Hand. In Fig. 169 verlaufen die Kraftlinien vom Nordpol zum Südpol, die Bewegung möge dem Drehungssinn des Uhrzeigers entgegen erfolgen. Dann fließt in AB ein Strom von hinten nach vorn und in CD ein Strom von vorn nach hinten. Würde man die beiden Enden des Drahtrechtecks durch eine äußere Leitung miteinander verbinden, so würde in diese links der Strom eintreten und rechts austreten. Der positive Pol der Stromerzeugungsmaschine läge in diesem Falle links, der negative rechts.

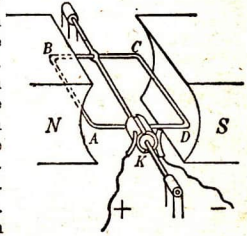


Fig. 169.

Der Strom würde aber in der hier beschriebenen Richtung nur so lange fließen können, wie sich das Drahtstück AB nach unten und CD nach oben bewegt. Sind die beiden Drahtstücke unten bzw. oben bei der Drehung angekommen, so hört die induzierende Wirkung auf. Wird das Rechteck weiter gedreht, so fließen in den beiden Drahtstücken Ströme in entgegengesetzter Richtung. Bei jeder vollen Umdrehung

fließen also zwei Ströme, einer in der Richtung $DCBA$ und nach einer halben Drehung ein zweiter in der Richtung $ABCD$. Wird das Rechteck dauernd weitergedreht, so fließen im Rechteck Ströme wechselnder Richtung. Wir nennen einen solchen Strom einen Wechselstrom. Durch die äußere Leitung würde dann auch ein Wechselstrom fließen.

Soll aber in der äußeren Leitung an Stelle des Wechselstromes der Strom stets in gleicher Richtung fließen, so muß durch einen Umschalter dafür gesorgt werden, daß die äußere Leitung in dem Augenblick umgeschaltet wird, in dem der Strom im Inneren der Maschine (Drahtrechteck) seine Richtung wechselt. Eine solche Umschaltvorrichtung besteht in diesem einfachen Falle aus zwei metallenen Halbzylindern, die auf der Rotationsachse isoliert voneinander befestigt sind. Zu ihnen führen die Enden des Drahtrechtsecks. Zwei mit den Klemmschrauben für die äußere Leitung versehene metallene Federn sind so angebracht, daß sie auf je einem der Halbzylinder bei der Drehung schleifen und dadurch die leitende Verbindung zwischen den Enden des Drahtrechtsecks und den äußeren Klemmschrauben herstellen. Sind Schleiffedern und Halbzylinder so angebracht, wie es Fig. 169 andeutet, dann tritt jedesmal, wenn das Rechteck durch die vertikale Lage hindurcheilt, ein Wechsel zwischen den Schleiffedern und den zugehörigen Halbzylindern ein. In der Lage, bei der im Inneren der Stromwechsel eintritt, wird der äußere Stromkreis in dieser Weise jedesmal umgeschaltet. Infolgedessen fließt der im Inneren nun entgegengesetzt gerichtete Strom außen in derselben Richtung.

Bei fortdauernder Drehung des Drahtrechtecks fließt also im Inneren ein Strom wechselnder, außen ein Strom gleicher Richtung. Doch ist die Stärke des Stromes nicht unveränderlich. Denn die Induktionswirkung ist dann am stärksten, wenn die meisten Kraftlinien von den Leiterstücken AB und CD geschnitten werden. Das ist in horizontaler Lage des Rechtecks der Fall. In dieser Lage wird durch die Drehung der stärkste Strom, in anderer Lage ein schwächerer erzeugt. In dem äußeren Stromkreis fließen danach zweimal bei jeder Umdrehung der Maschine Stromstöße, die an- und abschwellen, in gleicher Richtung.

Die hier beschriebene Einrichtung ermöglicht, Strom durch Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Feld zu erzeugen. Man nennt eine solche Maschine eine Dynamomaschine. Da sie Strom erzeugen soll, der in gleicher Richtung außerhalb der Maschine fließt, heißt sie Gleichstromdynamomaschine. Sie besteht aus drei wesentlichen Teilen:

dem Drahtrechteck, das den Namen Anker führt,

der Umschaltevorrichtung, die Stromwender oder Kommutator genannt wird, und dem felderregenden Magneten, der aus einem kräftigen Elektromagneten besteht.

2. Der Doppel-T-Anker. An Stelle eines einfachen Rechteckes aus Kupferdraht kann auch eine größere Anzahl rechteckiger Drahtwindungen als Anker benutzt werden. Die Enden der gesamten Windung führen dann zu den Halbzylindern K_1 und K_2 des Stromwenders. Die Induktionswirkung wird entsprechend der Zahl der Windungen dadurch erhöht.

Ferner kann man das Innere der Drahtwicklung mit Eisen ausfüllen. Da

durch wird die magnetische Kraft des Feldes außerordentlich verstärkt. Der Eisenkern, auf den die Drahtwindungen aufgewickelt sind, besitzt im Querschnitt die Form zweier gegeneinander gestellten **T**. Daher kommt der Name des Ankers (Fig. 170).

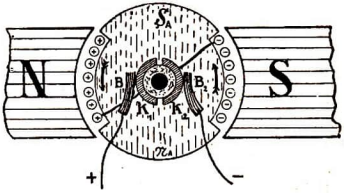


Fig. 170.

Trotz der Vorzüge, die der Doppel-**T**-Anker gegenüber dem einfachen Drahtrechteck besitzt, ist der erzeugte Strom doch noch kein brauchbarer Gleichstrom, denn die Schwankungen der Stärke der einzelnen Stöße bestehen auch bei ihm unvermindert fort. Eine bedeutende Verbesserung in dieser Hinsicht bringt der Trommelanker.

3. Der Trommelanker. Auf einem zylindrischen Eisenkern ist nicht eine Drahtwicklung wie bei dem Doppel-**T**-Anker, sondern eine größere Zahl von Wicklungen angebracht (Fig. 171 gibt dies schematisch wieder). Die Enden der einzelnen Wicklungen führen zu zwei Metallstreifen, die einander gegenüber auf der Achse als Stromwenderstreifen befestigt sind. Auf ihnen schleifen die Federn wie auf den Halbzylindern des früher beschriebenen Stromwenders. Sind z. B. 30 Wicklungen vorhanden, so muß der Stromwender aus 60 schmalen parallel zueinander auf der Rotationsachse isoliert eingelassenen Metallstreifen bestehen. Die Schleiffedern werden so eingestellt, daß der Strom aus der Wicklung entnommen wird, in der gerade die stärkste Induktion erfolgt. Nach einer Drehung von 6° in dem genannten Beispiel wird die nächste Windung an Stelle der vorhergehenden mit den Schleiffedern in Verbindung treten. In dem äußeren Stromkreis erfolgen also nicht zwei, sondern 60 gleichgerichtete Stromstöße während einer Umdrehung. So rasch aufeinanderfolgende Stromstöße, die alle im Augenblick ihrer stärksten Wirkung abgenommen sind, werden fast als unveränderlicher Gleichstrom wahrgenommen.

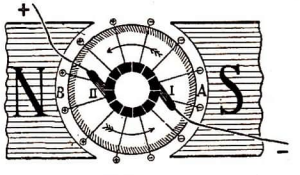


Fig. 171.

Damit nicht nur die Spulen, in denen gerade die stärkste Induktion stattfindet, sondern alle Spulen in jedem Augenblick den in ihnen hervorgerufenen Induktionsstrom nach außen fließen lassen können, sind alle Spulen auch untereinander leitend verbunden, so daß die Wicklung des Ankers eigentlich eine einzige Wicklung darstellt. Sollen in diesem Falle die Drähte ebenfalls so angebracht sein, daß alle auf der linken Seite befindlichen Drähte in jedem Augenblick von hinten nach vorn und alle auf der rechten Seite befindlichen Drähte von vorn nach hinten durchflossen werden, dann ist dies nur mit einem komplizierten Wickelver-

Fig. 172.

fahren möglich. Es ist aber durchführbar. Der so gewickelte Anker besitzt ein Äußeres, wie es Fig. 172 wiedergibt.

4. Das Prinzip der Selbsterregung. In den Eisenteilen der Elektromagneten der Dynamomaschine ist stets soviel Magnetismus vorhanden, daß die Maschine bei der Rotation einen schwachen Strom erzeugt. Wird dieser Strom durch die Wickelungen des Elektromagneten geleitet, so wird dadurch die Kraft des Magneten verstärkt. Infolgedessen ist der induzierte Strom wieder stärker. Dadurch wird der Magnet stärker erregt. Kurz, die Maschine regt sich selbst zu der stärksten Wirkung an. Man nennt diese Wirkungsweise das Prinzip der Selbsterregung der Dynamomaschine.

Bei allen Maschinen muß ein Teil des Stromes oder der gesamte Strom seinen Weg durch die Wicklungen des Elektromagneten nehmen (Hauptschluß- oder Nebenschlußmaschine), da andernfalls das Prinzip der Selbsterregung nicht wirksam werden könnte.

§ 60. Die Wechselstromdynamomaschine

Sorgt man dafür, daß die Enden des Drahtrechteckes dauernd mit denselben Klemmschrauben des äußeren Stromkreises verbunden bleiben, dann fließt in dem äußeren Stromkreis ein Wechselstrom. Eine derartige dauernde Verbindung zwischen äußerem und innerem Stromzweig kann man mit einer dem Kommutator ähnlichen Vorrichtung erreichen, die man Kollektor nennt.

Der Kollektor[1]) besteht aus zwei Messingringen, die nebeneinander auf die Rotationsachse geschoben und voneinander isoliert sind. Auf jedem dieser Ringe schleift dauernd eine Feder, die mit einer Klemmschraube für die Außenleitung verbunden ist. Zu den Ringen führen die Enden der induzierten Drahtwindung. In Fig. 173 ist neben dem Gleichstromkollektor ein Wechselstromkollektor dargestellt. Der eine Ring ist aus Gründen der Darstellung größer als der andere gezeichnet. Während der Gleichstromkommutator oder Gleichstromkollektor aus einem Zylinderring besteht, der in viele parallele Streifen geschnitten ist, wird der Wechselstromkollektor auch für Maschinen mit vielen Wicklungen immer aus zwei nicht zerschnittenen Zylindern gebildet.

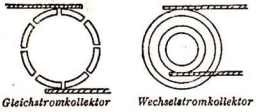


Fig. 173

Eine Maschine dieser Art heißt Wechselstromdynamomaschine.

Während einer Umdrehung des Ankers fließt der Strom allmählich anschwellend in der einen Richtung, erreicht seinen höchsten Wert, nimmt dann ab, fließt schließlich zunehmend in entgegengesetzter Richtung, erreicht den höchsten Wert in dieser Richtung, der ebenso groß ist wie der Wert in entgegengesetzter Richtung, und nimmt dann wieder ab, um in der ersten Richtung anzuschwellen. Zeichnet man die Stromstärken in ihrer Abhängigkeit von der Umdrehung graphisch auf, indem man die Stromstärken als Strecken vertikal und die Winkelgrade der Umdrehung horizontal als Strecken abträgt, dann erkennt man, daß die Stromstärke wie eine Sinuskurve ansteigt und abnimmt.

1) colligere = sammeln.

Bei Wechselstrommaschinen wendet man gewöhnlich solche Umdrehungsgeschwindigkeiten an, daß in einer Sekunde der Strom 50mal hin- und hergeht. Will man dies bei einer geringeren Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine ebenfalls erreichen, so kann man mehrere Feldmagnete an Stelle des einen verwenden. Diese Feldmagnete sitzen dann auf einem eisernen Kranz nach innen, abwechselnd Nord- und Südpole. Der Anker trägt ebensoviel Wicklungen wie Magnetpole vorhanden sind.

Gleichstrom- und Wechselstromdynamomaschine bedürfen zum Antrieb eines kräftigen Motors. In den meisten Fällen werden zum Antrieb Turbinen benutzt, die entweder mit Dampf oder mit Wasserkraft betrieben werden. Turbine und Dynamomaschine werden auf dieselbe Achse gebaut. Dadurch ist die beste Übertragung der Kraft der Turbine auf die Dynamomaschine gewährleistet. Man nennt Maschinen, die auf dieselbe Achse gebaut sind, direkt gekoppelte Maschinen. Die Dynamomaschine, die mit einer Turbine direkt gekoppelt ist, führt in der Technik den Namen Turbodynamo.

§ 61. Der Funkeninduktor

Man kann Induktionsströme nicht nur dadurch erzeugen, daß man einen Leiter in einem magnetischen Felde bewegt, sondern auch dadurch, daß man das magnetische Feld verändert, das einen ruhenden Leiter umgibt. Eine rasche Veränderung des Feldes kann man mit einem Elektromagneten hervorrufen, indem man den Strom, der den Magnetismus erzeugt, schließt und unterbricht.

Ein Apparat, der in dieser Weise durch Induktion einen Strom erzeugt, ist der Funkeninduktor oder der Ruhmkorffsche Induktor, wie er nach dem Mechaniker genannt ist, der ihn zuerst gebaut hat. Der Induktor besteht aus drei Teilen:

der Primärspule, einer Wicklung aus einer Anzahl Windungen von dickem Kupferdraht, die um ein Bündel Eisenstäbe gelegt ist,

der Sekundärspule, einer Wicklung von sehr vielen Windungen aus dünnem Kupferdraht, die über die Primärspule geschoben ist, und

dem Unterbrecher, durch welchen der Strom, der das magnetische Feld erzeugt, geschlossen und unterbrochen wird.

Fig. 174 gibt die Skizze eines Induktors. Durch eine Batterie aus mehreren Akkumulatoren wird ein Strom geliefert, der zunächst zu einer Schraube S fließt, die mit ihrer Spitze gegen eine metallische Feder drückt. Diese Feder trägt am Ende ein kleines Eisenstückchen A, das in der Höhe des Eisenkerns der Primärspule dicht vor dem Ende des Eisenkerns steht. Der Strom fließt durch die Metallfeder in die Primärspule und von dort nach der Batterie zurück. Sobald der Strom in dieser Weise fließt, wird das kleine Eisenstückchen A von dem magnetisch gewordenen Eisenkern der Primärspule angezogen. Dadurch wird die Feder von der Spitze der Schraube abgezogen und der Strom unterbrochen. Die Unterbrechung des Stromes bewirkt

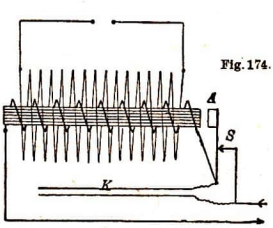


Fig. 174.

nun, daß die anziehende Kraft des Eisenkerns der Primärspule verschwindet und daher die Feder zurückgleitet. Dadurch wird der Strom wieder geschlossen, und der Vorgang beginnt von neuem. Meist ist die Schraube S mit dem einen Beleg und die Feder A mit dem anderen Beleg eines Kondensators K leitend verbunden. Dadurch soll verhindert werden, daß an der Unterbrechungsstelle ein Lichtbogen entsteht.

Durch die Primärspule fließt also kurze Zeit ein Strom, dann ist sie stromlos, dann fließt wieder ein Strom in der gleichen Richtung, dann ist sie stromlos usw. Die magnetischen Kraftlinien, die beide Spulen umschlingen, entstehen und verschwinden im gleichen Takte, wie der Strom der Primärspule geschlossen und unterbrochen wird. Ein Unterbrecher der geschilderten Art schließt und öffnet den Strom etwa 30 bis 50 mal in der Sekunde. In der Sekundärspule wird beim Entstehen des magnetischen Feldes ein Strom in der einen, beim Verschwinden des magnetischen Feldes ein Strom in der entgegengesetzten Richtung erzeugt. Es fließt also, während in der Primärspule Gleichstromstöße erfolgen, in der Sekundärspule ein Wechselstrom.

Der Versuch zeigt aber, daß noch eine weitere wesentliche Änderung eintritt. In der Primärspule fließt ein Strom, der nur eine geringe Spannung, aber eine große Stromstärke hat. Der in der Sekundärspule erzeugte Strom besitzt eine so hohe Spannung, daß diese sich schon unter Funkenbildung entlädt, wenn die Enden der Sekundärspule noch einige Zentimeter auseinanderstehen. Allerdings ist die Stromstärke der Sekundärspule entsprechend geringer geworden. Je mehr Windungen die Sekundärspule im Vergleich zur Primärspule besitzt, desto höher ist die Spannung. Sie hängt außerdem davon ab, wie rasch der Primärstrom jedesmal anschwillt oder abnimmt.

Bei der Unterbrechung ist die Induktionswirkung viel stärker als bei dem Schließen des Stromes. Infolgedessen fließt in der Sekundärspule kein gleichmäßiger Wechselstrom, sondern es folgen auf schwache Stromstöße in der einen Richtung starke Stromstöße in der anderen Richtung. Nach außen macht sich das so bemerkbar, daß die Enden der Sekundärspule wohl veränderliche Spannungen zeigen, daß aber das eine Ende trotzdem stets positive Spannung, das andere negative Spannung besitzt, wie es wäre, wenn nur der Unterbrechungs-Induktionsstoß wirkte. Der schwächere entgegengesetzt gerichtete Stoß kommt nicht zur Geltung.

Der Zweck des Induktors ist, Ströme hoher Spannung aus Strömen niedriger Spannung zu erzeugen. Der entstehende hochgespannte Strom ist zwar kein wirklicher Gleichstrom, praktisch ist er aber häufig als Gleichstrom verwendbar. Mit einem Funkeninduktor kann man alle Versuche wiederholen, die mit der hohen Spannung der Influenzmaschine vorgenommen wurden.

Der Funkeninduktor wandelt also Gleichstrom niedriger Spannung in (praktisch genommen) Gleichstrom höherer Spannung um.

§ 62. Der Transformator (Umspanner)

In dem Funkeninduktor wird der Induktionsstrom durch das entstehende und verschwindende magnetische Feld der Primärspule erzeugt. Schickt man durch eine Spule mit einem Eisenkern einen Wechselstrom, so wird ein magnetisches

Feld hervorgerufen, das mit jedem Wechsel der Stromrichtung seine Richtung verändert. Ist über diese Spule eine andere Spule geschoben, so wird in ihr durch das wechselnde Magnetfeld ein Wechselstrom erzeugt. Dieser Wechselstrom fließt aber im Gegensatz zum Sekundärstrom beim Induktor in gleicher Stärke nach beiden Richtungen, und zwar in demselben Takte wie der Wechselstrom, der durch die Primärspule fließt. Man kann also mit zwei Spulen, die sich gegenseitig induzieren, einen Wechselstrom, den man in die eine Spule schickt, in einen anderen Wechselstrom verwandeln, der aus der zweiten Spule kommt. Stromstärke und Spannung dieses induzierten Stromes sind von Stromstärke und Spannung des induzierenden Stromes im allgemeinen verschieden. Man wandelt also so einen Wechselstrom um oder transformiert ihn, wie der fachtechnische Ausdruck heißt.

Eine Primärspule aus dickem Draht und wenigen Wicklungen und eine Sekundärspule aus dünnem Draht und vielen Wicklungen, die beide um ein Bündel Eisenstäbe gelegt sind, stellen damit einen Apparat dar, durch den man einen Wechselstrom transformieren kann. Man nennt diesen Apparat Transformator oder Umspanner. Die Spannung, die der induzierte Wechselstrom besitzt, ist davon abhängig, ob die Spule, in der er erzeugt wird, mehr Wicklungen besitzt als die Spule, durch die der induzierende Strom fließt. Geht der Wechselstrom durch die Spule mit vielen Windungen, so erzeugt er einen Wechselstrom von geringerer Spannung (aber entsprechend größerer Stromstärke) in der Spule mit wenigen Windungen; fließt er durch die Spule mit wenigen Windungen, so ist der in der anderen Spule induzierte Strom von höherer Spannung (aber entsprechend geringerer Stromstärke). Man kann also mit einem Transformator Wechselströme beliebig umspannen, sowohl in Ströme höherer als auch niedrigerer Spannung.

Fig. 175 stellt einen Transformator einfachster Art dar. Das Feld, das von der einen Spule erzeugt wird, geht, da die magnetischen Kraftlinien ganz im Eisen verlaufen, durch die zweite Spule fast unverändert hindurch. Man kann also jede Spule als Primärspule benutzen und daher mit diesem Transformator sowohl die Spannung des Wechselstromes erhöhen als auch erniedrigen. Zu beachten ist aber, daß sich die Stromstärke im gleichen Maße ändert.

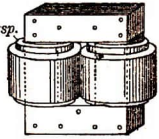


Fig. 175.

Wird durch einen Transformator die Spannung eines Wechselstromes erhöht, so nimmt die Stromstärke entsprechend ab; wird die Spannung vermindert, so nimmt die Stromstärke entsprechend zu.

§ 63. Geschichtliche Entwicklung

Faraday hat um das Jahr 1835 Maschinen erbaut, die elektrischen Strom durch Induktion geliefert haben. Diese Maschinen enthielten als Magnete, die das Feld erzeugten, große Hufeisenmagnete. Die Wirkung war daher nicht besonders groß. Im Jahre 1857 konstruierte Werner Siemens den Doppel-T-Anker und erfand einige Jahre später das Prinzip der Selbsterregung der Dynamomaschine.

Damit war für die Erzeugung der Elektrizität im großen der Weg frei gemacht. Der erste Trommelanker ging aus der Fabrik von Siemens im Jahre 1873 hervor.

Seit der Mitte des 19. Jahrhunderts hat sich ein reger Aufschwung der elektrischen Industrie bemerkbar gemacht. Anfangs überwog die Verwendung der Gleichstromdynamomaschinen, später aber, insbesondere durch die Erfindung des Transformators, die Verwendung der Wechselstromdynamomaschinen.

Die Funkeninduktoren fanden in den 70er Jahren aus der Werkstätte des Mechanikers Ruhmkorff in Paris weite Verbreitung.

XII. Elektrische Energie

§ 64. Das Maß der elektrischen Arbeit

Die Beobachtung zeigt, daß ein elektrischer Strom imstande ist, sowohl mechanische Arbeit zu leisten (Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters im magnetischen Feld) als auch Wärme zu erzeugen. Mechanische Arbeit und Wärme haben wir als zwei Formen der Energie kennengelernt, die in einem gewissen Verhältnis zueinander umwandelbar sind. Die Erfahrung, nach der aus dem elektrischen Strom Wärme und mechanische Arbeit gewonnen und andererseits durch mechanische Arbeit Strom erzeugt werden kann, veranlaßt uns, den elektrischen Strom auch als Energieform aufzufassen. Wir versuchen experimentell zu bestimmen, ob auch bei der Erzeugung von Wärme oder mechanischer Arbeit durch den elektrischen Strom ein unveränderliches Umsetzungsverhältnis in allen Fällen eintritt.

Viele Versuche haben gezeigt, daß dies tatsächlich der Fall ist. Wir haben also anzunehmen:

Im elektrischen Strom offenbart sich eine Form der elektrischen Energie, die mit einer Wärmemenge oder einer mechanischen Energiemenge vergleichbar ist.

Die Größe des Umsetzungsverhältnisses können wir durch folgenden Versuch ermitteln.

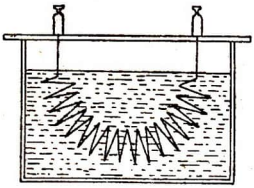


Fig. 176.

Wir lassen den elektrischen Strom durch eine Spirale aus Nickelindraht fließen, die in ein Blechgefäß mit Öl taucht (Fig. 176). *Haben wir die Ölmenge gemessen und bestimmen wir die Temperatur zu Anfang und Ende des Stromdurchganges, so können wir die Wärmemenge berechnen, die von dem durch den Strom erwärmten Draht an das Öl abgegeben worden ist. Wir lassen den Strom bestimmte Zeit durch den Draht fließen und wiederholen den Versuch bei anderer Spannung und anderer Stromstärke.*

Aus einer Anzahl solcher Versuche ergibt sich:

Die in einer gewissen Zeit von einem Strom in dem stromdurchflossenen Leiter erzeugte Wärmemenge ist proportional dem Produkt

aus der in Volt gemessenen Spannung an den Enden des Leiters und der in Ampere gemessenen Stromstärke.

Weiter läßt sich daraus berechnen:

Ein Strom von 1 Ampere erzeugt bei 1 Volt Spannung eine Wärmemenge von 0,24 cal in der Sekunde[1]).

Die sekundlich von einem Strom von 1 Ampere bei 1 Volt Spannung geleistete Arbeit, oder besser die Leistung eines Stromes von 1 Ampere bei 1 Volt Spannung wählen wir zum Grundmaß der elektrischen Arbeit (Leistung) oder der elektrischen Energie.

Wir setzen fest:

Die Leistung eines Stromes von 1 Ampere bei 1 Volt Spannung heißt 1 Watt.

Da die Leistung dieses Stromes äquivalent 0,24 cal ist und da 1 cal äquivalent 0,427 mkg gesetzt werden kann (denn 1 kcal entspricht 427 mkg), so ergibt sich für das Umsetzungsverhältnis von elektrischer in andere Formen der Energie:

Es sind gleichwertig oder äquivalent:

1 Watt und 0,24 cal/sec
1 Watt und 0,1 mkg/sec (annähernd).

Mit diesem Maß für die elektrische Leistung können wir nun die in einem bestimmten Leiter geleistete elektrische Arbeit während einer bestimmten Zeit messen. Wir müssen dazu die Stromstärke und die Spannung an den Enden des Leiters kennen. Es gilt dann:

Ein Strom von i Ampere Stromstärke erzeugt in einem Leiter, in dem die Spannung E Volt herrscht, eine Leistung von:

$$\boxed{\begin{aligned} L &= E \cdot i \text{ Watt} \\ L &= E \cdot i \cdot 0{,}24 \text{ cal/sec} \\ L &= E \cdot i \cdot 0{,}1 \text{ mkg/sec} \end{aligned}}\,.$$

Nach dem Gesetz von Ohm besteht zwischen der Spannung E, dem Widerstand w und der Stromstärke i eines Stromkreises die Beziehung

$$E = i \cdot w.$$

Sind in einem bestimmten Falle nur der Widerstand und die Stromstärke des Leiters bekannt, in dem die entwickelte Stromleistung gemessen werden soll, so können wir E ersetzen durch $i \cdot w$ und die obige Formel nimmt die Gestalt an:

$$\boxed{\begin{aligned} L &= i^2 \cdot w \text{ Watt} \\ L &= i^2 \cdot w \cdot 0{,}24 \text{ cal/sec} \\ L &= i^2 \cdot w \cdot 0{,}1 \text{ mkg/sec} \end{aligned}}\,.$$

1) 1 kcal = 1000 cal.

§ 65. Das elektrische Leitungsnetz

Die elektrische Energie besitzt gegenüber der Wärmeenergie oder der mechanischen Energie den großen Vorzug, daß sie sich ohne große Verluste einfach durch einen Leitungsdraht überall hinleiten läßt.

Man erzeugt die elektrische Energie in Zentralen. Die Zentralen sind entweder dazu vorgesehen, ganze Provinzen oder Landbezirke und Eisenbahnstrecken mit Strom zu versehen oder dem Bedürfnis einer Stadt oder einer Fabrik zu entsprechen. Erstere nennt man gewöhnlich Überlandzentralen, letztere Elektrizitätswerke.

In der elektrischen Zentrale sind Dynamomaschinen aufgestellt, die durch Dampf- oder Wasserturbinen in Drehung versetzt werden. Es kann sowohl Gleichstrom als auch Wechselstrom erzeugt werden. Gleichstrom kommt meist im Haushalt und Kleinbetrieb zur Verwendung, Wechselstrom zum Betrieb größerer Motore.

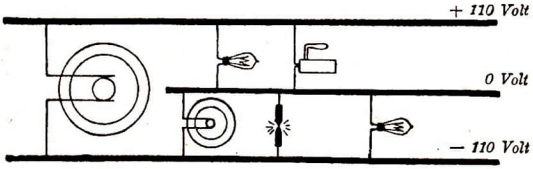


Fig. 177.

Die Gleichstromdynamomaschine des Elektrizitätswerkes erzeugt eine elektrische Spannung von 110 Volt positiver Elektrizität am einen Pol und 110 Volt negativer Elektrizität am anderen Pol. Es besteht dann eine Spannungsdifferenz von 220 Volt zwischen den beiden Polen der Maschine.

Von den Polen der Maschine führen dicke Kabelleitungen nach außen. Sie werden im Boden durch die Straßen gelegt. Von den Straßen führen dünnere Kabelleitungen in die Häuser und münden schließlich, nachdem sie durch einen Elektrizitätszähler gegangen sind, entweder in den aufgehängten elektrischen Lampen oder in Steckkontakten. Steckt man die beiden Stifte des Steckers einer Doppelleitungsschnur in die Löcher des Steckkontaktes, so ist dadurch die Verbindung mit den beiden Polen der stromerzeugenden Dynamomaschine hergestellt. Die zu den Lampen führenden Leitungsdrähte gehen durch einen Schalter, durch den der Strom ein- und ausgeschaltet werden kann.

Gewöhnlich werden nicht nur zwei Leitungsdrähte, einer vom positiven und einer vom negativen Pol ausgehend, verlegt, sondern noch ein dritter, der sogenannte Nulleiter, der die Spannung Null besitzt (Fig. 177). Zwischen dem Nulleiter und den beiden anderen besteht stets eine Spannungsdifferenz von

110 Volt. Man gewinnt so die Möglichkeit, Lampen oder andere stromverbrauchende elektrische Apparate sowohl in den zwischen +110 und 0 als auch zwischen 0 und —110 und zwischen +110 und —110 Volt zu schalten.

Schaltet man einen stromverbrauchenden Apparat ein, so muß derselbe Strom, der in ihm fließt, durch die Zuleitung bis zum Elektrizitätswerk und durch die stromerzeugende Dynamomaschine fließen.

Neben dem Leitungsnetz von 110 oder 220 Volt, dem Niederspannungsnetz, bestehen oft noch andere Leitungsnetze, die von anderen Maschinen abzweigen und meist Wechselstrom führen. Sie besitzen eine Spannung von 440 oder mehr Volt. Sie dienen zum Betrieb von elektrischen Motoren und Anlagen, die genügend gegen unbefugte Berührung gesichert sind und dabei soviel Strom verbrauchen, daß ein Betrieb mit höherer Spannung wirtschaftlicher ist.

Das Niederspannungsnetz ist gegen Berührung nicht gesichert. Man kann sich jedoch empfindliche elektrische Schläge zuziehen, wenn man die Leitung mit feuchten Händen berührt. Bei allen Leitungen mit höherer Spannung als 220 Volt wird durch Warnungstafeln auf die Gefahr hingewiesen, welche die Berührung der Leitung für Leben oder Gesundheit mit sich bringt.

Den elektrischen Straßenbahnen wird der Strom in einer Spannung von etwa 500 Volt durch den Fahrdraht zugeführt. Von diesem wird er durch einen Bügel oder eine Stange, die mit einem Laufrad versehen ist, abgenommen. Den Rückweg nimmt der Strom durch die eisernen Schienen, auf denen die Bahn fährt.

§ 66. Übertragung elektrischer Energie

Der Strom, der eine Glühlampe zum Leuchten bringt, fließt auch durch den Zuleitungsdraht und die Dynamomaschine, die im Elektrizitätswerk die Spannung erzeugt. Jede Verbrauchsstelle von elektrischem Strom bildet so mit der Zuleitung und dem Draht der Wicklung der Dynamomaschinen einen geschlossenen Stromkreis. Die in einem Drahte verbrauchte elektrische Energie ist gleich dem Produkt $i_2 \cdot w$. Der Strom muß an allen Stellen derselbe sein. Es läßt sich mit dieser Formel daher berechnen, wieviel Energie an der Verbrauchsstelle und wieviel auf dem Zuleitungswege verbraucht wird. Der Widerstand der Zuleitung und der Widerstand der Verbrauchsstelle sind dafür maßgebend.

Eine sparsame Wirtschaft muß natürlich darauf bedacht sein, daß der Verbrauch an elektrischer Energie in den Zuleitungsdrähten gering ist. Dies ist nicht nur eine Forderung der Sparsamkeit, sondern auch eine Forderung, die aus Rücksicht auf Feuersgefahr erhoben werden muß. Wird nämlich der Strom in der Zuleitung so stark, daß er den Draht zur Rotglut erhitzt, dann kann dadurch ein Brand hervorgerufen werden. Beiden Forderungen wird man gerecht, wenn man dicken Kupferdraht als Leitungsmaterial wählt. Dann ist der Widerstand so klein, daß der Verbrauch an Energie in der Zuleitung und entsprechend auch die Erwärmung des Kupferdrahtes sehr gering ist.

Soll aber der Strom auf viele Kilometer Entfernung übertragen werden, dann bieten selbst dicke Kupferkabel noch einen so erheblichen Widerstand,

daß die Übertragung unwirtschaftlich ist. Folgendes theoretische Beispiel diene zur Erläuterung:

Von einem Kraftwerk werde der Strom durch ein Kupferkabel auf eine Entfernung von 10 km geleitet. Die Zuleitung bietet einen Widerstand von etwa 12 Ohm. Besitzt die Verbrauchsstelle einen Widerstand von 100 Ohm und liefert das Werk eine Spannung von 224 Volt, so fließt nach dem Ohmschen Gesetz in dem aus der Verbrauchsstelle, der Zuleitung und der Dynamomaschine gebildeten Stromkreis ein Strom von etwa 2 Ampere. Es würde dann verbraucht:

in der Zuleitung die Leistung 2 Amp. · 2 Amp. · 12 Ohm = 48 Watt,
in der Verbrauchsstelle 2 Amp. · 2 Amp. · 100 Ohm = 400 Watt.

Auf 400 Watt Nutzleistung kämen 48 Watt Verlust, also etwa 12%. Das ist sehr viel. Würde das Werk aber eine Spannung von 2002,4 Volt liefern, und der Widerstand der Verbrauchsstelle 10000 Ω betragen, so würde beim gleichen Zuleitungswiderstand von 12 Ω nur ein Strom von 0,2 Ampere fließen. Es würde in diesem Falle betragen:

in der Zuleitung die Leistung 0,2 Amp. · 0,2 Amp. · 12 Ohm = 0,48 Watt,
in der Verbrauchsstelle 0,2 Amp. · 0,2 Amp. · 10000 Ohm = 400 Watt.

Es würde also in diesem Falle bei der gleichen Leistung an der Verbrauchsstelle der Verlust in der Zuleitung nur 0,12% betragen.

Aus diesem Beispiel ergibt sich:

Die Übertragung elektrischer Energie auf weite Entfernungen ist um so wirtschaftlicher, je höher die Spannung ist.

Man hat Übertragungen auf weite Entfernungen mit einer Spannung von 100000 Volt und mehr schon praktisch durchgeführt. Die Verluste, die dabei in den Leitungen eintreten, sind gering.

Allerdings ist es unmöglich, so hochgespannte Ströme in einem gewöhnlichen Leitungsnetz zu verteilen. Ströme so hoher Spannung sind nicht nur äußerst gefährlich für Menschen, die damit in Berührung kommen, sondern erfordern auch die größten Vorsichtsmaßregeln hinsichtlich der Isolation. Die Leitungen werden an Porzellanisolatoren hängend geführt. Man kann aber trotzdem Ströme mit hohen Spannungen gut verwenden, weil man in dem Transformator einen Apparat besitzt, durch den man die Spannung beliebig erniedrigen und erhöhen kann.

In einer Überlandzentrale wird beispielsweise mit einer Dynamomaschine ein Strom von 300 Ampere bei 2400 Volt Spannung erzeugt. Dieser Strom kann durch einen Transformator auf 72000 Volt bei 10 Ampere Stromstärke umgewandelt werden. Bei dieser Umwandlung tritt natürlich ein gewisser Verlust ein. Der Leitungsverlust bei der Übertragung von 72000 Volt Spannung ist auch für große Entfernungen sehr gering. An der Verbrauchsstelle müßte der Strom wieder in niedrig gespannten Strom umgewandelt werden, und zwar soll dies beispielsweise in zwei Stufen geschehen, zunächst auf 3000 Volt und dann auf 220 Volt. Mit dieser Umwandlung sind wieder Verluste verknüpft. Nehmen wir im ganzen einen Verlust von 10% an, so würden an der Verbrauchsstelle etwa 3000 Ampere bei 220 Volt Spannung zur Verfügung stehen. An elektrischer

Leistung würde das ausmachen 660000 Watt oder 660 Kilowatt oder etwa 900 PS.

Da der Transformator nur zur Umwandlung von Wechselströmen geeignet ist, ist diese Art der Fernübertragung nur mit Wechselstrom möglich. Es gibt aber auch Maschinen und Einrichtungen, die die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom gestatten. Es ist also auch möglich, den übertragenen Wechselstrom direkt in Gleichstrom umzuformen. Die Vorzüge der Umwandlungsfähigkeit haben dem Wechselstrom in der Technik die überragende Bedeutung gegeben, die er zur Zeit besitzt.

§ 67. Geschichtliche Entwicklung

Das elektrische Wärmeäquivalent ist von dem englischen Physiker Joule in dem Jahre 1843 festgestellt worden, in demselben Jahre, in dem er auch das mechanische Wärmeäquivalent als erster richtig angab. Damit war die elektrische Energie unter die Formen der Energie eingereiht.

In den 50 Jahren, die der Entdeckung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie folgten, sind die gewaltigen krafterzeugenden Maschinen geschaffen worden, die die Werkmaschinen der sich rasch entfaltenden Industrie trieben. Es wurde bald nach der allgemeinen Einführung der Dynamomaschine das Problem erörtert, wie man elektrische Energie am zweckmäßigsten über weite Strecken übertragen könnte. Auf der elektrischen Ausstellung zu Frankfurt a. M. wurde 1891 die erste elektrische Fernübertragung gezeigt. Von Lauffen am Neckar, wo der elektrische Strom in Dynamomaschinen erzeugt wurde, wurde er als hochgespannter Strom nach dem 180 km entfernten Frankfurt geleitet und dort durch Transformatoren in gebrauchsfähigen Strom umgeformt. Dabei trat nur ein Verlust von 28% an Energie auf.

XIII. Energieumformende elektrische Maschinen

§ 68. Der Elektromotor

1. Der Gleichstrommotor. Der Gleichstrommotor ist genau so gebaut wie eine Gleichstromdynamomaschine. Seine Wirkungsweise kann am besten an dem Verhalten eines stromdurchflossenen Drahtrechtecks im magnetischen Feld besprochen werden (Fig. 169). Fließt ein Strom an der mit dem Pluszeichen versehenen Schleiffeder in das Rechteck, so erfährt nach der Dreifingerregel der linken Hand das Drahtstück AB eine Ablenkung nach unten, das Drahtstück CD nach oben. Sobald das Rechteck in vertikaler Lage angekommen ist, tritt der Stromwechsel an den Federn ein. Infolgedessen wird die Bewegung der Drahtstücke im gleichen Drehsinne weitergehen. Wichtig ist nur, daß der tote Punkt, die vertikale Lage des Rechtecks, überwunden wird. Dies geschieht bei dem Doppel-T-Anker infolge der Trägheit des schweren Ankers. Beim Anlassen darf der Anker nicht auf dem toten Punkt stehen.

Ein Gleichstrommotor mit Trommelanker besitzt keinen toten Punkt. Er

läuft in jeder Lage an. Er besitzt alle Vorzüge, die wir bei der Dynamomaschine mit Trommelanker bereits aufgezählt haben.

Die Gleichstromelektromotoren werden in den verschiedensten Größen hergestellt. Sie sind so eingerichtet, daß sie an die Spannung von 110 oder 220 Volt, die das Leitungsnetz bietet, angeschaltet werden können. Motore, die nicht mehr Strom als eine elektrische Glühlampe etwa verbrauchen, können ohne weiteres durch einen Schalter in Betrieb gesetzt werden. Stärkere Motoren bedürfen dazu einer Einschaltvorrichtung, welche aus einigen Widerständen besteht, die durch einen Hebel nacheinander ein- und ausgeschaltet werden. Stellt man den Hebel auf den ersten Kontakt, so fließt der Strom zunächst durch einen großen Widerstand und dann durch den Motor, es fließt also ein schwacher Strom. Rückt man den Hebel auf den nächsten Knopf, so wird der große Widerstand durch einen kleineren ersetzt. Beim Weiterrücken des Hebels wiederholt sich dies, bis der vorgeschaltete Widerstand ganz ausgeschaltet ist, wenn der Hebel auf der Endstellung angekommen ist. Dieser Vorschaltwiderstand soll verhindern, daß beim Anlassen des Motors ein allzu starker Strom fließt. Diese Gefahr liegt vor, wenn der Anker stillsteht; denn der rasch rotierende Anker verhält sich wie der Anker einer Dynamomaschine und erzeugt, weil die Drähte magnetische Kraftlinien schneiden, einen Strom, der dem Betriebsstrom entgegenläuft. Dadurch wird der Betriebsstrom geschwächt. Der Motor verbraucht demnach um so mehr Strom, je langsamer er läuft.

2. Der Wechselstrommotor. Mit Wechselstrom betriebene Elektromotoren werden in verschiedenen Systemen gebaut. Eine Wechselstromdynamomaschine ist ohne weiteres nicht geeignet auch als Motor zu dienen, denn sie setzt sich nicht in Bewegung, wenn Wechselstrom in ihre Wicklungen geschickt wird. Die einfachste Form des Wechselstrommotors ist ein Motor, der dem Gleichstrommotor gleicht, in dessen Anker und Feldmagnet derselbe Wechselstrom nacheinander geschickt wird. In demselben Takte, in dem sich dann das Magnetfeld ändert, ändert sich die Stromrichtung in dem Anker, und so vermag der Anker sich auch dann immer in demselben Sinne zu drehen, wenn der Strom dauernd wechselt.

3. Die Leistung des Motors. Die Leistung eines Motors wird nach Pferdestärken bemessen. Auch bei Elektromotoren ist dies üblich. Da aber ein Elektromotor stets für eine ganz bestimmte Stromart (Gleichstrom oder Wechselstrom), für eine bestimmte Spannung (110, 220 oder mehr Volt) und für eine bestimmte Stromstärke gebaut ist, ist die Aufgabe der elektrischen Größen des Motors unentbehrlich. Aus der Spanung, mit der der Motor arbeitet, und aus der Stromstärke, die er dabei verbraucht, läßt sich die mechanische Leistung einfach berechnen.

Die elektrische Leistung wird in Watt angegeben, die mechanische Leistung in mkg/sec. Zwischen beiden besteht die Beziehung 1 Watt = 0,1 mkg/sec. Die Technik verwendet aber als Maß für die Leistung eines Motors die Pferdestärke (1 PS = 75 mkg/sec). Aus der erstgenannten Beziehung würde sich ergeben, daß etwa 750 Watt einer Pferdestärke entsprechen. Genauer (denn der Bruch 0,1 ist abgekürzt) sind:

$$736 \text{ Watt} = 1 \text{ PS}.$$

Ein Motor würde bei 220 Volt und $3\frac{1}{2}$ Ampere also ungefähr die Leistung 1 PS besitzen.

Der Strom, der in einem Motor zur Leistung von Arbeit verbraucht wird, wird von einem Elektrizitätswerk geliefert. Dafür ist dem Werk ein Preis zu bezahlen, der sich nach der Arbeitsleistung richtet. Die Rechnung wird nicht nach Pferdestärken und der Zeit der Arbeitsleistung ausgestellt, sondern nach Kilowattstunden. 1 Kilowatt sind 1000 Watt. Arbeitet ein Motor mit 200 Volt Spannung und 5 Ampere Stromverbrauch während einer Stunde, so beträgt die elektrische Energie, die er in dieser Zeit aus dem Leitungsnetz entnimmt: 1 Kilowattstunde. Die elektrischen Zähler sind nach Kilowattstunden geeicht.

Das Maß für die elektrische Leistung ist das Kilowatt, das etwa $1\frac{1}{3}$ PS entspricht.

Das Maß für die elektrische Arbeit ist die Kilowattstunde.

§ 69. Das elektrische Licht

1. Die Bogenlampe. Bringen wir die Pole einer starken Elektrizitätsquelle von etwa 40 bis 50 Volt Spannung mit zwei Kohlestäben in Verbindung und schließen den Strom dadurch, daß wir die Kohlestäbchen miteinander zur Berührung bringen, und entfernen dann die Stäbchen wieder einige Millimeter voneinander, so fließt in dem Leitungskreis trotzdem ein Strom weiter, und zwischen den beiden Kohlestäbchen entsteht ein Lichtbogen.

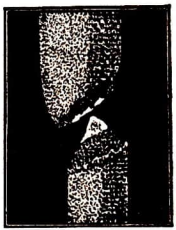


Fig. 178.

Auch mit anderen Leitern kann dieser Versuch ausgeführt werden. Das Licht des Lichtbogens zwischen zwei Kohlestäben ist zur Lichterzeugung deshalb so geeignet, weil es rein weiß ist und eine außerordentliche Leuchtkraft besitzt. Es leuchtet der Zwischenraum zwar, aber in sehr viel stärkerem Maße leuchtet die Spitze der positiven Kohle, die dabei langsam abbrennt (Fig. 178). Weil die starke Leuchtkraft des Lichtbogens nahezu auf einen Punkt konzentriert ist, wird der Lichtbogen vorwiegend in großen Bildwerfern verwendet.

Früher benutzte man die Bogenlampe auch zur Straßen- und Raumbeleuchtung. Der Umstand, daß täglich die verbrannten Kohlen ausgewechselt werden mußten, erwies sich als unwirtschaftlich, nachdem ebenso stark leuchtende Glühlampen, die keiner Wartung bedürfen, erfunden waren.

2. Die elektrische Glühlampe. Läßt man den Strom einer starken Elektrizitätsquelle durch einen dünnen Draht gehen, so gerät der Draht in helle Glut. Bemißt man die Stärke des Stromes so, daß das Leuchten kräftig wird, ohne daß der Draht durchschmilzt, dann kann man dadurch Licht erzeugen. Die meisten Leiter sind zu diesen Versuchen nicht geeignet, weil sie schmelzen, bevor sie zum kräftigen Leuchten kommen. Als geeignet erweisen sich Platin, die schwer schmelzenden Metalle Wolfram, Tantal, Osmium usw. und die Kohle.

Die erste brauchbare Glühlampe bestand aus einem Faden aus verkohlter Bambusfaser oder Retortenkohle, der in einer evakuierten Glasbirne eingeschlossen war. Wurde der Strom durch den Faden gesandt, so geriet er in gelbrote bis weißgelbe Glut. Er verbrannte nicht, weil die dazu notwendige Luft fehlte. Später gelang es, Fäden aus schwer schmelzenden Metallen herzustellen. Man spannte sie auf ein Drahtgestell in einer Glasbirne auf, evakuierte die Birne ebenfalls und schuf so Lampen, die bei gleichem Stromverbrauch viel heller leuchteten als die Kohlefadenlampen. Diese Lampen haben die Kohlefadenlampen fast völlig verdrängt, weil sie nur etwa ein Drittel der Energie für die gleiche Leuchtkraft beanspruchen (Fig. 179).

Fig. 179.

In neuester Zeit hat man die Drähte, anstatt sie geradlinig zu führen, in sehr engen Spiralen gewickelt (dadurch wird die Abkühlung des Fadens verringert, seine Temperatur und Leuchtkraft gesteigert) und außerdem die Lampen mit einem indifferenten Gas, z. B. Stickstoff, gefüllt, das die bei sehr hoher Temperatur auftretende Zerstäubung des Fadens vermindern soll.

Zu allen Lampen führt dieselbe einfache Anschlußvorrichtung. Die Leuchtfäden der Lampe sind zunächst an feine Platindrähte gelötet, die in das Glas eingeschmolzen sind (Glas hat denselben Ausdehnungskoeffizienten wie Platin), außen führt ein Kupferdraht zu dem sogenannten Lampenfuß. Dieser besteht aus einem Zylindermantel aus Messing, in den ein Schraubengewinde eingepreßt ist. Zu ihm führt das eine Ende des Leuchtfadens. Das andere Ende ist mit einem im Inneren des Mantels isoliert angebrachten Stifte verbunden, der an seinem unteren Ende in einer kleinen Scheibe mündet. Die Lampenfassung besteht aus einem ebenso geformten Stift und einem isoliert davor angebrachten Zylindermantel, der das Mutterschraubengewinde trägt. In diesen beiden Teilen der Lampenfassung münden die Pole des Leitungsnetzes. Wird der Lampenfuß in die Lampenfassung geschraubt, so kann Strom dann fließen, wenn die Schraube soweit eingeschraubt wird, bis die beiden Tellerstifte sich berühren.

3. Lichtstärke und Stromverbrauch. Die Lichtstärke einer Lampe wird in Watt ausgedrückt. Die Lampen, die zur Zimmerbeleuchtung benutzt werden, haben eine Leistung zwischen 15 und 150 Watt.

Gasgefüllte Glühlampen werden für tausend und mehr Watt hergestellt. Auch bei ihnen beträgt der Energieverbrauch etwa ½ Watt pro Kerze. (Halbwattlampen.)

Bei den Bogenlampen ist der Stromverbrauch bei gleicher Leuchtstärke noch geringer, doch sind die Bogenlampen aus den oben angeführten Gründen unwirtschaftlich.

§ 70. Die elektrische Heizung

1. Der elektrische Schmelzofen. Die im elektrischen Lichtbogen erzeugte Temperatur beträgt 3000° bis 4000° C. Durch Verbrennung von Gasen oder von Kohle können wir nicht annähernd so hohe Temperaturen wie im Lichtbogen erzeugen. Der Lichtbogen wird daher dazu benutzt, schwer schmelzbare Metalle

zum Schmelzen zu bringen. Er wird ferner überall da verwendet, wo man auf einem kleinen Raum eine recht hohe Temperatur entwickeln will.

Dies spielt besonders beim Schweißen von Metallen eine Rolle. Man kann Metalle durch Erhitzen mit dem Sauerstoffgebläse schweißen, man kann aber auch die im Lichtbogen auftretende Wärmeentwicklung benutzen, um Metalle dauerhaft und fest miteinander zu verbinden. Zwischen den Fugen der aneinander zu schweißenden Metallstücke bildet sich der Lichtbogen. Durch Aneinanderpressen werden die Metallstücke dann zusammengefügt.

2. Die elektrische Heizung. Die in einem Leitungsdraht entwickelte Wärme kann direkt zur Heizung benutzt werden. Im Boden eines Kochtopfes, im Inneren eines Bügeleisens oder einer Heizplatte, auf die ein gewöhnlicher Topf gestellt werden kann, sind Drähte angebracht, die beim Durchgang des Stromes sehr stark erhitzt werden und ihre Wärme nach außen abgeben.

Ärzte besitzen zum Schneiden von Wucherungen Instrumente aus Platin, die vom Strom durchflossen, glühend werden und in diesem Zustand zur Beseitigung von Geweben geeignet sind.

Fernzündungen können gefahrlos mit einem Zünddraht vorgenommen werden, der sich beim Einschalten des Stromes erhitzt.

Auch zur Heizung von Räumen, zur Erwärmung der Luft in elektrischen Trockenapparaten kann die in einem Leitungsdraht entwickelte Wärme ausgenutzt werden.

3. Die Kurzschlußsicherung. Im allgemeinen beträgt der Gesamtstromverbrauch in den Leitungen einer Wohnung, selbst wenn mehrere Lampen gleichzeitig brennen, nicht mehr als 6 Ampere. Die Zuleitungsdrähte besitzen einen solchen Querschnitt, daß sie bei diesem Strom nicht sonderlich erwärmt werden. Werden aber durch einen besonderen Umstand die Pole der Leitung kurz geschlossen, d. h. durch einen Leitungsdraht von geringem Widerstand überbrückt, so fließt in der Zuleitung ein Strom von solcher Stärke, daß die Drähte ins Glühen geraten können. Um dies zu verhindern, ist an allen Verbrauchsstellen Vorsorge getroffen, daß kein Strom aus der Leitung genommen werden kann, der stärker ist als der Strom, für den die Anlage berechnet ist. Die Vorrichtung, die dies verhindert, heißt Sicherung. Sie besteht aus einem kurzen Stück Silberdraht, der in einer Porzellanbüchse mit Kontakten eingesetzt ist, oder einem sehr dünnem Metallstreifen, der bei einer gewissen Stromstärke durchschmilzt. Diese Sicherungen sind in allen Steckkontakten und am Elektrizitätszähler angebracht.

Es gibt Sicherungen für 3, für 6, für 20 Ampere usw. Alle elektrischen Anlagen werden in dieser oder anderer Weise gesichert (Fig. 180).

Fig. 180.

4. Das Hitzdrahtamperemeter. Die von einem Strom in einem Leiter hervorgerufene Erwärmung ist unabhängig davon, ob Gleichstrom oder Wechselstrom durch ihn fließt. Der Grad der Erwärmung hängt von der entwickelten Wärmemenge und diese wieder von der Stromstärke und dem Widerstand ab. Mit wachsender Temperatur ändert sich die Länge des Drahtes.

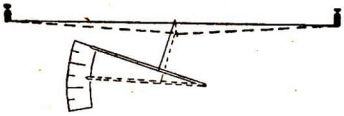


Fig. 181.

Man hat also in der Längenänderung eines Leitungsdrahtes ein Merkmal, das auf die Stromstärke zu schließen gestattet. Auf diesem Gedanken beruht das Hitzdrahtamperemeter (Fig. 181).

Es besteht aus einem dünnen Draht, der bei der Längenänderung einen Zeiger bewegt. Die Skala, auf die der Zeiger deutet, wird durch Versuche geeicht. Ein solches Instrument ist geeignet, sowohl Gleichstrom als auch Wechselstrom zu messen.

§ 71. Die technische Verwendung der Elektrolyse

Die Eigenschaft des elektrischen Stromes, aus der Lösung eines Metallsalzes das Metall beim Durchgang des Stromes am negativen Pol auszuscheiden, wird in der Technik viel benutzt.

Zunächst dient die Elektrolyse zum Überziehen metallener Gegenstände mit Edelmetallen. Bringt man einen Gegenstand, der vergoldet, versilbert oder vernickelt werden soll, in eine Lösung des betreffenden Metallsalzes als Kathode und schickt dann einen elektrischen Strom durch die Lösung, so überzieht sich der Gegenstand mit einer sehr feinen Schicht aus reinem Edelmetall. Diese Gegenstände zeigen reinen Metallglanz des Edelmetalls. Die Schicht haftet sehr fest. Massiv silberne oder goldene Gegenstände werden im Handel dadurch kenntlich gemacht, daß man sie mit einem Stempel versieht, der angibt, in welchem Maße dem Edelmetall unedle Metalle beigemischt sind. Sie sind, trotzdem sie legiert sind, wertvoller als die galvanisch überzogenen Gegenstände.

Mit Hilfe der Elektrolyse ist es möglich, plastische Kunstwerke oder erhaben gearbeitete Gegenstände irgendwelcher Art genau wiederzugeben. Von dem Gegenstand wird zunächst ein Abdruck in Wachs oder Gips genommen. Dieser wird mit feinem Graphitpulver gleichmäßig überzogen und dadurch mit einer Oberfläche versehen, die elektrisch leitend ist. Wird dieser Abdruck des Originals, der alle Erhöhungen als Vertiefungen und Vertiefungen als erhabene Stellen enthält, als Kathode in eine Kupfersulfatlösung gebracht und elektrischer Strom durch die Lösung geschickt, so schlagen sich die ausgeschiedenen Kupferteilchen auf dem Graphitpulver nieder und überziehen den ganzen Abdruck mit einer zusammenhängenden Schicht aus Kupfer. Diese läßt sich ablösen und gibt dann das Original richtig wieder.

In der Technik dient ferner die Elektrolyse zur Erzeugung von Metallen aus den chemischen Verbindungen, in denen sie sich finden. Z. B. wird Aluminium durch Elektrolyse der Tonerde gewonnen. Ferner wird sie zur Herstellung reiner Metalle aus Metallen benutzt, die mit anderen legiert sind. So geschieht z. B. die Herstellung von reinem Kupfer durch Elektrolyse. Die Herstellung des reinen Kupfers ist wichtig, weil es einen viel kleineren elektrischen Widerstand als nur wenig verunreinigtes Kupfer hat.

§ 72. Geschichtliche Entwicklung

Die Wärme- und Lichtwirkung des elektrischen Stromes ist schon sehr bald gefunden worden, nachdem mit der Entdeckung Galvanis die Möglichkeit gegeben war, stärkere elektrische Ströme zu erzeugen. Dem englischen Chemiker Davy wird die Entdeckung des Lichtbogens zugeschrieben (1820). Praktisch verwertbar war die Entdeckung damals nicht, weil noch keine Maschinen zur Erzeugung starker Ströme vorhanden waren.

Die ersten Glühlampen stammen aus der Zeit um 1840. Sie sind aber erst 30 Jahre später zu einer brauchbaren Lampe geworden, nachdem es dem amerikanischen Techniker Edison gelungen war, einen haltbaren Kohlefaden herzustellen. Von Edison stammt auch die noch heute gebräuchliche Lampenfassung.

Auch die Tatsache, daß der elektrische Strom zum Überziehen von metallenen Gegenständen mit Edelmetallen sich eignet, ist etwa um 1840 neben anderen Forschern z. B. von Werner Siemens entdeckt worden.

Die Verwendung des elektrischen Stromes zur Licht- und Wärmeerzeugung kam erst in Blüte, nachdem in den Jahren nach 1870 durch die Erfindung und Ausgestaltung der Dynamomaschinen die Technik das Mittel erlangt hatte, beliebig starke Ströme zu erzeugen. Die erste elektrische Bahn in Deutschland fuhr auf der Gewerbeausstellung in Berlin 1879. Seitdem hat sich die elektrische Industrie sehr rasch entwickelt. Besonders vorteilhaft ist die Verwendung der Elektrizität in Gebirgsgegenden, in denen Wasserfälle zum Betrieb von Turbinen ausgebaut sind, die ihrerseits wieder Dynamomaschinen betreiben. Der elektrische Strom ist dort so billig, daß er überall zur Heizung, Beleuchtung und zum Betreiben von Motoren dient.

XIV. Elektrische Zeichenübermittelung

§ 73. Die elektrische Klingel

Der elektrische Strom ist außerordentlich geeignet, von einer Stelle nach einer anderen irgendein Zeichen zu übermitteln. Denn es ist leicht möglich, zwei Orte, die räumlich weit auseinander liegen, mit Leitungsdrähten zu verbinden, in denen ein elektrischer Strom fließt. Wird an dem einen Ort ein Schalter angebracht, durch welchen der Strom ein- und ausgeschaltet werden kann, und befindet sich an dem anderen Ort eine Vorrichtung, an welcher man erkennen kann, ob Strom in der Leitung fließt, so ist durch diese Einrichtung die Möglichkeit gegeben, Zeichen über weite Entfernungen zu geben.

Bei der elektrischen Klingel befindet sich an der Stelle, von der das Zeichen ausgeht, ein Drücker und an dem Orte, wo das Zeichen ankommt, eine elektrisch betriebene Glocke.

Der Drücker oder Druckknopf besteht aus einer Feder, die durch einen Knopf aus Knochen oder Hartgummi gegen eine zweite Feder gedrückt wird. In den beiden Metallfedern münden die Enden der Leitungsdrähte. In gewöhn-

licher Lage berühren sich die Federn nicht. Es kann also kein Strom in der Leitung fließen, weil er im Drücker T unterbrochen ist.

Der Strom wird gewöhnlich von einem galvanischen Element B geliefert. Die Leitung wird so geführt, wie es Fig. 182 angibt.

Die elektrisch betriebene Klingel besteht aus einem Elektromagneten S, dem ein kleines Stück Eisen E gegenübersteht, das an einer Feder F befestigt ist. In der Ruhelage berührt die Feder leicht die Stellschraube r. Wird der Taster T niedergedrückt, dann wird der Strom dadurch eingeschaltet. Er fließt von einem Pol des Elementes zum Elektromagneten S der Klingel, von da zur Feder F, durch die Feder zur Stellschraube r und schließlich durch die Leitung und den niedergedrückten Taster zum anderen Pol des Elementes. Sobald der Strom fließt, wird der Elektromagnet S magnetisch und zieht das Eisenstück mit der Feder an. Dadurch wird der Strom zwischen Stellschraube r und der Feder unterbrochen. Die Folge davon ist, daß der Elektromagnet wieder unmagnetisch wird, und die Feder in ihre frühere Lage zurückschnellt. Der Stromkreis wird wieder geschlossen, und das Spiel beginnt von neuem. Die Einrichtung der elektrischen Klingel gleicht demnach dem Unterbrecher des Ruhmkorffschen Induktors. Wird am Ende der Feder F ein Klöppel K angebracht, der gegen eine Glocke G schlägt, so kann die Bewegung der Feder zur Erzeugung von Klingelzeichen benutzt werden.

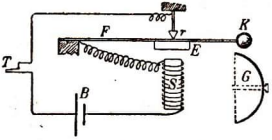


Fig. 182.

§ 74. Der Telegraph

Der Telegraph ist eine elektrische Einrichtung, mit der Zeichen von einem Ort nach einem anderen geschickt werden, die so beschaffen sind, daß man aus ihrer Zusammensetzung oder ihrer Art Worte, Ziffern und Satzzeichen erkennen kann. Er dient also zur augenblicklichen Übertragung einer schriftlichen Mitteilung nach einem entfernten Ort. Von den verschiedenen Arten der Telegraphen seien hier folgende besprochen:

1. Der Morsetelegraph. Auf der Sendestation, d. h. dem Ort, von dem die Zeichen ausgesendet werden, befindet sich ein Taster T, durch den der Strom eingeschaltet wird, und eine Batterie B_1 aus galvanischen Elementen, die den Strom liefert (Fig. 183).

Zur Empfangsstation führen die Leitungsdrähte, die dort in einem Elektromagneten E_1 münden. Wird der Taster T niedergedrückt, so ist der Stromkreis geschlossen, und der Elektromagnet E_1 zieht dann einen ihm gegenüberstehenden Eisenkern an. Dieser Eisenkern ist mit einem einarmigen Hebel ver-

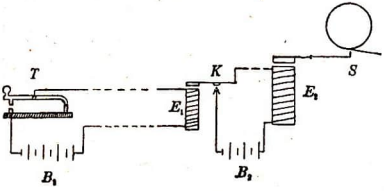


Fig. 183.

bunden, durch den ein Kontakt K geschlossen wird, wenn der Hebel von dem Elektromagnet E_1 angezogen ist. Der Kontakt K gehört zu einem Stromkreis, der aus einer Batterie B_2, dem Elektromagneten E_2 und den Drähten gebildet wird, die zu dem Kontakt K führen. In diesem Stromkreis fließt so lange Strom, wie der Taster T auf der Sendestation den Strom einschaltet, der von der Sendestation zur Empfangsstation geschickt wird. Da der zweite Stromkreis nur kurze Leitungen und dementsprechend einen geringen Widerstand hat, kann in ihm ein starker Strom fließen, während der erste Stromkreis wegen der langen Leitungen, die beide Stationen verbinden, meist nur einen geringen Strom führen kann. Der zweite Stromkreis hat keinen anderen Zweck als den, den ankommenden schwachen Strom durch einen stärkeren Strom zu ersetzen. Man bezeichnet daher den zweiten, lokalen Stromkreis als ein Relais, mit einem Wort, das aus dem Sprachgebrauch der Pferdepost stammt.

Dem Elektromagneten E_2 steht ein Eisenkern gegenüber, der an einem zweiseitigen Hebel befestigt ist. Dieser trägt an seinem anderen Ende einen Schreibstift, der gegen einen vorbeibewegten Papierstreifen gedrückt wird, wenn der Strom geschlossen ist. Auf diesem Streifen entstehen Striche und Punkte, je nachdem der Taster T den Strom auf längere oder kürzere Zeit schließt. Der Schreibstift muß mit einer gewissen Kraft gegen den Papierstreifen gedrückt werden. Würde der Elektromagnet E_1 durch den ankommenden Strom schon stark genug erregt werden, so wäre der zweite Stromkreis, das Relais, ganz entbehrlich, denn E_1 könnte unmittelbar den Hebel, der den Schreibstift trägt, bewegen.

Die Leitung, die von der Sende- zur Empfangsstation führt, wird entweder als Doppelleitung angelegt, d. h. aus einem Draht für den Hinweg und einem Draht für den Rückweg des Stromes oder als Einfachleitung. In diesem Falle wird der Strom nur einmal durch einen Draht und auf dem zweiten Weg durch die Erde geführt. Auf der Empfangs- und Sendestation wird dann der Strom zu metallenen Platten geleitet, die in der Erde eingegraben sind. Die Erde ist ein Leiter, in dem der Strom, ohne erheblich geschwächt zu werden, von der einen Bodenplatte zur anderen fließen kann.

Aus Punkten und Strichen, den beiden einzigen Zeichen, die der Telegraph übermitteln kann, hat man ein System von zusammengesetzten Zeichen aufgestellt, das nach dem Erfinder dieses Telegraphen Morsealphabet heißt. Es bedeutet darin z. B. a ·—, b —···, c —·—·, d —··, e ·, f ··—· usw. Buchstaben, Ziffern und Satzzeichen werden durch diese Zeichen ausgedrückt. Das Morsealphabet findet überall Verwendung, wo Signale übermittelt werden sollen, für die nur zwei verschiedene Grundzeichen verwendbar sind.

2. Der Buchstabendrucktelegraph. Ein Telegraph, mit dem das Telegramm so übermittelt werden kann, daß es auf dem vor dem Schreibstift vorübergleitenden Papierstreifen unmittelbar in Druckschrift erscheint, ist z. B. der Hughesapparat. Auf beiden Stationen befinden sich Räder, auf deren Radkranz die Buchstaben des Alphabets und sonstige Zeichen und Ziffern erhaben als Drucktypen angebracht sind. Beide Räder werden durch Uhrwerke so bewegt, daß sie genau gleich schnell rotieren, und daß stets bei beiden Rädern derselbe Buchstabe in der gleichen Stellung, z. B. genau oben ist. Jedes Rad dreht sich

mehrmals in einer Sekunde. Der Papierstreifen rollt über eine Vorrichtung, durch die er gegen das Rad mit den Buchstaben gedrückt werden kann. Jedesmal, wenn der Streifen gegen das Rad gedrückt wird, wird auf ihm der Buchstabe abgedruckt, der dem Streifen gegenübersteht. Auf der Sendestation ist eine Tastatur angebracht, die äußerlich an die Tasten des Klaviers erinnert, aber dem Wesen nach mehr mit den Tasten der Schreibmaschine zu tun hat. Wird eine Taste niedergedrückt, so schnellt der Papierstreifen in dem Augenblick gegen das Rad, in dem sich das Zeichen, das dieser Taste entspricht, dem Papierstreifen gegenüber befindet.

Die Wirkung des Stromes wird von einer Station zur anderen so schnell übertragen, daß auf beiden Stationen gleichzeitig das Telegramm auf diese Weise auf die Papierstreifen gedruckt werden kann. Es entsteht auf der Sendestation die Kopie und auf der Empfangsstation das Telegramm, das in der Gestalt, wie es aus dem Apparat kommt, ausgegeben wird. Die Streifen werden zur Ausgabe vorher auf ein Telegrammformular aufgeklebt.

Die Vorzüge des Hughesapparat sind offensichtlich. Die Geschwindigkeit, mit der telegraphiert werden kann, ist größer als beim Morseapparat, weil das einfache Zeichen schon einen Buchstaben darstellt.

§ 75. Das Telephon

1. Versuch. *Wir legen um das eine Ende eines permanenten Magneten eine Spule aus vielen Windungen dünnen Kupferdrahtes und verbinden die Enden dieser Spule mit einem empfindlichen Strommeßinstrument. Nähert man den Magneten ein Stück unmagnetisches Eisen, so entsteht ein Strom in der Spule, entfernt man das Eisenstück, so entsteht ein Strom in der entgegengesetzten Richtung. Es werden also durch das Nähern und Entfernen einer Eisenplatte in der Spule Induktionsstöße erregt* (Fig. 184).

Bringen wir vor dem Magneten eine federnd bewegliche Eisenplatte an, die mit einem Zeiger verbunden ist, und schicken in die Spule, die auf dem Ende des Magneten sitzt, einen Strom, so wird die Eisenplatte angezogen, wenn der Strom in der einen, sie gleitet zurück, wenn der Strom in der anderen Richtung fließt. Die Eisenplatte bewegt sich also im Takte, in dem sich der Strom ändert (Fig. 185).

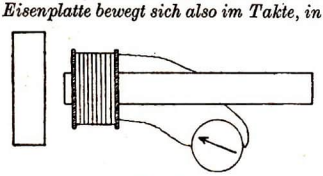


Fig. 184.

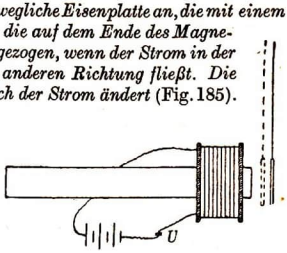


Fig. 185.

Diese Versuche erläutern die Wirkungsweise des Telephons. Induktionsströme können in einer Spule, die auf dem Ende eines permanenten Magneten sitzt, schon hervorgerufen werden, wenn die Eisenplatte so dünn ist, daß sie von den Schallstößen eines gesprochenen Wortes z. B. bewegt wird. Eine Platte, die von

Schallstößen hin- und herbewegt wird, schwingt in dem Takte des gesprochenen Lautes. Im gleichen Takte müssen dann die erregten Ströme fließen, beim Nähern in der einen, beim Entfernen der Platte in der anderen Richtung.

Leitet man diese Ströme in die Spule eines ähnlich gebauten Apparates, so veranlassen die Induktionsströme, daß die Eisenplatte, die sich diesem Magneten gegenüber befindet, ebenfalls im Takte der ersten Platte hin- und herschwingt. Die Platte wirkt bei ihrer Bewegung auf die Luft und erregt dadurch Schallstöße. Man kann also hören, was an dem anderen Orte gesprochen wird.

2. Das Mikrophon. Die in dem hier beschriebenen Apparat erzeugten Ströme sind zu schwach, um eine Bewegung der zweiten Platte zu verursachen, die stark genug wäre, die Laute hörbar zu machen. Man kann sehr starke Ströme mit folgender Einrichtung hervorrufen.

Wir bilden einen Stromkreis aus einem Element, einem Strommeßinstrument und einer Dose, die mit Kohlekörnern gefüllt ist. Der Strom wird so geleitet, daß er in der Dose durch die Kohlekörner, die sich lose berühren, übertragen wird. Der Deckel der Metalldose ist leicht beweglich. Wird er bewegt, so werden die Kohlekörner erschüttert. Sie werden bald zusammengedrückt, bald aufgeschüttelt. Dadurch ändert sich der Widerstand der Leitung auf dem Wege durch die Kohlekörner erheblich. Die Folge ist, daß der Strom in demselben Maß schwankt, wie die Körner erschüttert werden. Der Versuch zeigt die Abhängigkeit des Stromes von der Erschütterung.

Auch für die schnell wechselnden Erschütterungen des Schalles ist diese Einrichtung empfindlich genug. Die Stärke des Stromes hängt hier nur von der Stärke der Stromquelle ab. Die Einrichtung ist geeignet, genügend starke Ströme zu liefern, die sich im Takte des gesprochenen Wortes ändern. Sie führt die Bezeichnung Mikrophon (Fig. 186 links).

Das Mikrophon, d. h. der Apparat des Fernsprechers, in den hineingesprochen wird, besteht demnach aus der Mikrophondose mA, die mit Kohlekörnern C gefüllt ist, aus der Mikrophonbatterie B und einer Spule I, die zusammen zu einem Stromkreis vereinigt sind. Wird gegen die Platte m gesprochen, so ändert sich der Widerstand auf dem Wege mA, und in I fließen Ströme, die sich dauernd ändern. Dadurch wird in der Spule II, die wie beim Induktor über I geschoben ist, ein Wechselstrom von hoher Spannung erzeugt, der geeignet ist, weit fortgeleitet zu werden.

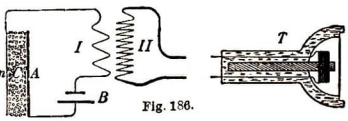


Fig. 186.

3. Der Hörer. Dieser Wechselstrom gibt die Schwingungen der Laute wieder, die gegen die Platte m des Mikrophons gesprochen worden sind. Wird er in die Spule des Hörers T geleitet, die auf dem Ende eines permanenten Magneten sitzt, so bewegt er die vor dem Magneten befindliche Eisenplatte in demselben Rhythmus (Fig. 186 rechts). Das Ohr, das an die Platte des Hörers gelegt wird, vernimmt die gleichen Laute. Obwohl theoretisch dieser Hörapparat des Telephons auch als Sprechapparat geeignet sein müßte, benutzt man ihn in der Praxis als Hörer und als Sprechapparat das Mikrophon.

4. Die Fernsprechzentrale. Zu jeder Telephonanlage gehört noch eine Läutevorrichtung, mit der die Aufmerksamkeit des Teilnehmers des Fernsprechnetzes erregt wird, mit dem man zu sprechen wünscht. — In den meisten Fernsprechämtern wird heute die Verbindung durch einen „Wähler", d. h. eine im Fernsprechamt befindliche Schaltvorrichtung hergestellt, die durch eine am anrufenden Apparat befindliche Kurbel elektrisch gesteuert wird und selbsttätig die gewünschte Verbindung schafft. Früher — an manchen Stellen noch heute — münden die Enden der Leitungen aller an das Fernsprechnetz angeschlossenen Telephonapparate in Steckkontakten, die auf einem Schaltbrett des Amtes nebeneinander angebracht sind. Diese Kontakte tragen dieselben Nummern wie die Apparate der Teilnehmer. Nimmt man das Telephon von der Gabel des Apparates, so schnellt die Gabel nach oben und schließt damit einen Stromkreis, der auf dem Fernsprechamt eine kleine Glühlampe zum Aufleuchten bringt. Eine Beamtin schaltet ihr Telephon dann in den Stromkreis und fragt nach der gewünschten Verbindung. Diese wird dadurch hergestellt, daß die Beamtin zwischen dem Steckkontakt des anrufenden und dem Steckkontakt des gewünschten Teilnehmers eine Verbindungsschnur einschaltet. Gleichzeitig wird in die Leitung des gewünschten Teilnehmers ein Strom gesandt, der eine Klingel dort zum Läuten bringt. Nimmt der angerufene Teilnehmer den Hörer auf, so ist die Verbindung hergestellt.

§ 76. Die drahtlose Telegraphie und Telephonie

1. Die Funkentelegraphie. Ein Induktionsstrom kann auch dann in einem Leiter hervorgerufen werden, wenn in einem zweiten, räumlich weit entfernten Leiter Stromänderungen vorkommen. Es muß also auch auf diese Weise möglich sein, Zeichen von einer Stelle zu einer anderen ohne jede leitende Verbindung zu geben. Versuche zeigen aber, daß die Wirkung sehr schnell mit größer werdender Entfernung zwischen den beiden Leitern abnimmt.

In § 35 haben wir einen Versuch kennengelernt, bei dem die Schwingungen einer Stimmgabel auf eine andere Stimmgabel durch die Luft übertragen wurden. Bedingung dafür war, daß die beiden Stimmgabeln genau gleiche Eigenschwingungsdauer besaßen. Wir haben uns diese Erscheinung so erklärt, daß die sehr schwachen Stöße der Luft die zweite Stimmgabel stets in dem Augenblick treffen, wo ihre Richtung mit der Richtung, in der die Zinken der Gabel sich bewegen, übereinstimmt. Aus ganz geringen Anstößen entsteht so schließlich eine deutlich wahrnehmbare Bewegung der Zinken der Stimmgabel. Dieses Beispiel zeigt, wie man durch sehr schwache Kräfte, die taktmäßig auf einen in gleichem Rhythmus schwingungsfähigen Körper wirken, große Wirkungen erzielen kann.

Die Wirkung des ersten Stromkreises auf den zweiten dauert nur so lange, wie sich im ersten Stromkreis der Strom ändert. Will man also die Wirkung verstärken, so muß man viele Wirkungen kurz hintereinander erfolgen lassen. Die Erfahrung hat aber gezeigt, daß man nur dann eine beträchtlich gesteigerte Wirkung erhält, wenn die Änderungen des ersten Stromes etwa 100000 bis 1000000 mal taktmäßig in der Sekunde erfolgen. Man müßte also den Strom ebensooft unterbrechen, um die gewünschte Wirkung zu erzielen.

Mit mechanisch wirkenden Unterbrechern kann man das nicht erreichen. Wohl aber zeigt folgender Versuch, daß die elektrische Entladung in einem einzigen Funken aus einer Reihe von sehr kurz aufeinanderfolgenden Stromstößen besteht, und daher für diese Zwecke geeignet ist:

Wir befestigen auf dem Umfang eines großen Rades, das etwa 20 bis 30 mal in der Sekunde rotiert, eine kleine Funkenstrecke, d. h. zwei dicht gegenüberstehende Drahtenden, zu denen von dem inneren und äußeren Beleg einer Leidener Flasche Verbindungen gelegt sind. Durch eine an dem Rad befestigte Schaltvorrichtung bewirken wir, daß in einer ganz bestimmten Stellung des Rades ein Funke in der Funkenstrecke überspringt. Betrachten wir diesen Funken, so sehen wir, daß er aus (z. B. 10) regelmäßig hin- und hergehenden Entladungen besteht. Die Zeitdauer, in der die einzelnen Entladungen aufeinanderfolgen, beträgt etwa eine hunderttausendstel Sekunde oder noch weniger.

Bildet man aus einer Leidener Flasche oder einem Plattenkondensator C_1 (Fig. 187), einer Spule aus Kupferdraht und einer Funkenstrecke F einen Stromkreis, der nur an der Funkenstrecke F unterbrochen ist, und lädt man die Leidener Flasche C_1 dauernd so auf, daß in 1 sec etwa 1000 Funken in F überspringen, so laufen 1000 mal in 1 sec Gruppen von ca. 10 Stromstößen durch den Stromkreis. Bringt man über der Spule eine zweite Induktionsspule an, so wird in ihr ein 1000 mal erneuter Wechselstrom erzeugt, der alle hunderttausendstel Sekunde seine Richtung ändert. Führt man von beiden Enden dieser zweiten Spule noch einen Draht A_1 in die Luft (eine Antenne), so verlaufen auch in ihm die Wechselströme.

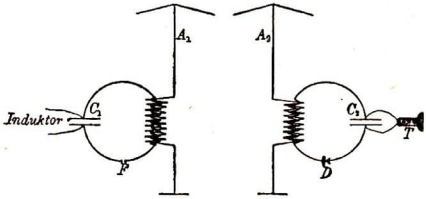


Fig. 187.

Stellt man an einem entfernten Ort einen gleich großen Draht A_2 (eine Antenne) in gleicher Weise auf, schließt man ihn an eine gleiche Spule wie die der ersten Station an, so wird diese (wie die eine Stimmgabel durch die andere) durch die schnell wechselnden Stromstöße und die daraus sich ergebenden Induktionswirkungen beeinflußt. Es entstehen in der Antenne A_2 und der mit ihr verbundenen Spule schwache Induktionsströme, die ebenso rasch wechseln wie in der Antenne A_1. Diese wirken induzierend auf eine zweite Spule und erzeugen in dem Leiter, der zu dem Kondensator C_2 führt, schließlich die raschen Stromstöße wechselnder Richtung. Schaltet man in den Leiterkreis ein Telephon, so müßte seine Membrane, wie man vermuten sollte, durch die Wechselströme in Schwingungen versetzt werden.

Die elektrischen Ströme schwingen aber viel zu rasch hin und her, als daß ihnen die Membrane folgen könnte. 100000 Schwingungen je sec vermag die Membrane weder auszuführen, noch das Ohr aufzunehmen. Ein einfaches, aus einem Kristall und einer gegen den Kristall gedrückten Nadel bestehendes Instrument, ein sogenannter Detektor, ändert die Erscheinung wesentlich, wenn er in den Leiterkreis bei D eingeschaltet wird. Durch die Berührungsstelle

von Nadel und Kristall kann der Wechselstrom nur in einer Richtung fließen. Die Folge des Einschaltens des Detektors ist also, daß von 10 hin- und hergehenden Schwingungen des Wechselstromes nur 10 gleichgerichtete Stromstöße übrigbleiben, die so rasch aufeinanderfolgen, daß sie auf die Membrane wie ein einziger Stoß von etwa 1/10000 sec Dauer wirken. Springt in der Sendestation nach 1/1000 sec ein neuer Funke über, so erfolgt im Telephon ein neuer (zehnfacher) Stoß auf die Membrane. Diese wird also in 1 sec 1000mal angestoßen. Man vernimmt dann im Telephon denselben Ton, den das Überspringen der Funken in der Sendestation erzeugt, denn die Platte wird ebensooft (1000mal) angestoßen in der Sekunde, wie Funken in *F* überspringen.

Wird durch einen Taster auf der Sendestation der Funkenübertritt für längere oder kürzere Zeit ausgelöst, so werden dadurch länger und kürzer dauernde Töne übermittelt. Aus lang und kurz lassen sich Morsezeichen zusammensetzen, und so kann nach dem Gehör durch Morsezeichen drahtlos telegraphiert werden.

Als Detektoren werden heute meist Glühkathodenröhren verwendet, von denen in der Oberstufe gesprochen werden wird. Das Wesentliche an der vorliegenden Erscheinung ist, daß die Übertragung von Zeichen durch drahtlose Telegraphie nur durch äußerst schnelle Wechselströme (elektrische Schwingungen) und durch Apparate möglich ist, die so gleich abgestimmt sind, daß sie für die darin fließenden Wechselströme die gleiche Schwingungsdauer besitzen.

2. Drahtlose Telephonie und Rundfunk. Mit Hilfe von Maschinen und Glühkathodenröhren kann man heute in einer Antenne Wechselstromschwingungen von etwa 1000000 je sec herstellen, die ununterbrochen in gleicher Stärke fortdauern. Wenn man in der Sendestation, dem „Sender", nun in den die Schwingung erzeugenden elektrischen Stromkreis ein Mikrophon einschaltet, so kann man den Widerstand des Mikrophons verändern, wenn man gegen seine Membrane spricht. Der Wechselstrom findet dann im Mikrophon bald einen größeren, bald einen kleineren Widerstand und nimmt entsprechend in seiner Stärke zu oder ab, ohne daß sich aber dabei eine Schwingungsdauer ändert. Die Stärke der Schwingungen des Senders wechselt also im Rhythmus des gesprochenen Klanges.

Die Wechselströme der Antenne des Senders induzieren in weitem Umkreis alle metallischen Leiter und insbesondere Auffangedrähte (Antennen), die man ausgespannt hat. Man leitet die im Auffangedraht erregten Schwingungen durch einen Kondensator und eine Spule zur Erde, stimmt ab, d. h. verändert die Wirkung von Kondensator oder Spule so, daß Resonanz zwischen den Schwingungen in der Antenne des Senders und des Empfangsgerätes herrscht, schaltet einen Detektor ein, der die Schwingungen gleichrichtet, und leitet die Ströme schließlich in ein Telephon. Auf die Telephonmembrane werden dann in 1 sec 1000000 gleichgerichtete Stöße ausgeführt, deren Stärke aber so ab- und zunimmt, wie im Mikrophon des Senders der Strom durch das

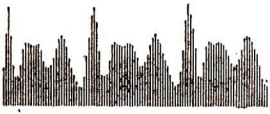


Fig. 188.

Sprechen verändert wird. Die Membrane wird also im Rhythmus des Klanges bald stärker bald schwächer angestoßen, sie schwingt daher genau so wie die Membrane des Mikrophons und gibt die Töne, die im Sender gegen das Mikrophon dringen, genau wieder. Fig. 188 deutet das schematisch an. Eine Rundfunkempfangsanlage ist nach Fig. 187 oder auch anders zu schalten.

Auf demselben Grundgedanken der Übertragung beruht die drahtlose Telephonie.

§ 77. Geschichtliche Entwicklung

Der erste Telegraph ist von Sömmering im Jahre 1809 konstruiert worden. Er benutzte 27 Drähte. Für jeden Buchstaben diente ein besonderer Leiter, der zu einem Wasserzersetzungsapparat auf der Empfangsstation führte. Die Buchstaben wurden dadurch angezeigt, daß in dem betreffenden Zersetzungsapparat Gasblasen aufstiegen.

Die erste Verbindung, bei der nur eine Leitung für alle Zeichen benutzt wurde, war von den deutschen Professoren Gauß und Weber 1831 in Göttingen zwischen der Sternwarte und dem physikalischen Institut angelegt worden. Die Zeichen wurden an der Empfangsstation in ein Galvanometer geleitet, das durch seinen Ausschlag nach links und rechts Zeichen wiedergab.

Der amerikanische Maler Morse erfand den von uns oben beschriebenen Morseapparat im Jahre 1837. In Deutschland wurden die ersten Telegraphenlinien um 1846 von Werner Siemens gebaut. Es wurden Zeigertelegraphen verwendet, die sich dem Schreibtelegraph von Morse unterlegen erwiesen. Der Bau von Telegraphenlinien (die erste Linie von Frankfurt a. M. nach Berlin wurde 1848 erbaut) war dadurch sehr erschwert, daß man bis dahin keine Drähte besaß, die ausreichend isoliert waren, um in die Erde verlegt zu werden. Man schritt dazu, die Leitungen an Telegraphenpfählen isoliert durch Porzellanrollen zu führen. Siemens stellte die ersten Drähte her, die mit Guttapercha isoliert waren.

Besondere Schwierigkeiten machte das Verlegen von Telegraphenlinien durch Flüsse und Meere. Hier mußten starke Kabel erst angefertigt und erprobt werden. Rasche Fortschritte wurden aber erzielt, denn schon 1858 verband das erste Kabel Nordmerika mit Europa.

Der Typendrucktelegraph ist von dem Amerikaner Hughes im Jahre 1855 erfunden worden. Er wird heute sehr viel verwendet. Es gibt neben ihm ähnliche Systeme, die gestatten, das Telegramm in Druckschrift zu senden.

Auf sehr stark benutzten Leitungen werden heute ferner sogenannte Maschinentelegraphen verwandt. Bei ihnen wird das Telegramm, bevor es in den Sendeapparat gelangt, durch Maschinen in besonderen Zeichen in einen Papier- oder Metallstreifen gestanzt. Man kann mit ihnen 20000 Worte in der Stunde telegraphieren.

Das Telephon ist von dem Homburger Lehrer Philipp Reis im Jahre 1860 erfunden worden. Es war nur zum Übertragen von Tönen geeignet und fand deshalb keinen rechten Eingang in die Praxis. Erst auf der Weltausstellung in Philadelphia 1876 wurde ein von dem Amerikaner Graham Bell konstruiertes Telephon gezeigt, das brauchbar war. Es entsprach dem Teil, den wir Hörer

nennen. Zwei Jahre darauf wurde von Hughes und dem Deutschen Lüdtge gleichzeitig das Mikrophon erfunden. Die erste Fernsprechleitung der Post wurde 1877 eingerichtet.

Um das Jahr 1890 wurde von Branly ein Detektor erfunden, mit dem man die schnellen elektrischen Schwingungen in einer Antenne nachweisen konnte. Von da ab datiert der Ausbau des drahtlosen Telegraphenverkehrs. 1897 begannen der Italiener Marconi in England, 1898 Braun und Slaby in Deutschland mit der Errichtung von Stationen. Seitdem ist es gelungen, drahtlos über die ganze Erde zu telegraphieren. Seit der Erfindung der Glühkathodenröhre (1906, Röhrensender 1913) ist auch die drahtlose Telephonie und der Rundfunk möglich geworden.

XV. Die Ausbreitung des Lichtes im Raum

§ 78. Lichtquellen und Lichtausbreitung

Jeden Reiz des Sehnervs unseres Auges empfinden wir als Licht. Eine Lichtempfindung kann im Auge schon dann hervorgerufen werden, wenn ein mechanischer Druck oder Stoß auf das geschlossene Auge ausgeübt wird. Licht nennen wir aber nur die von außen in das Auge gelangende Einwirkung, bei der keine Berührung des Auges in Betracht kommt.

1. Lichtquellen. Das Auge nimmt die uns umgebende Körperwelt wahr, wenn von ihr Licht ausgeht. Wir unterscheiden

a) selbstleuchtende Körper oder Lichtquellen, d. h. Körper, die unter allen Umständen den Sehnerv des Auges reizen. Zu ihnen gehören die Sonne, die Sterne, glühende Körper und brennende Gase.

b) beleuchtete Körper, d. h. Körper, die das Auge nicht reizen, wenn wir verhindern, daß diese Körper von selbstleuchtenden Körpern Licht empfangen. In einem Zimmer, von dem das Licht der Sonne oder das Licht eines anderen selbstleuchtenden Körpers ferngehalten wird, kann unser Auge keinen Gegenstand wahrnehmen. Wir sagen, das Zimmer ist dunkel. Die Gegenstände im Zimmer senden von selbst kein Licht aus.

2. Licht und Schatten. *Stellen wir in einem dunklen Zimmer eine einzige Lichtquelle auf, die sehr wenig ausgedehnt ist, so daß das Licht nahezu nur von einem Punkte ausgeht, so nehmen wir zunächst wahr, daß das Licht nach allen Seiten ausgebreitet wird.*

Auf der Seite eines Körpers, die der Lichtquelle abgewandt ist, nehmen wir ferner einen dunklen Raum wahr. Wir bezeichnen ihn als Schatten. Der Schatten ist scharf begrenzt. Er besitzt die Gestalt eines Kegels, dessen Spitze in der Lichtquelle liegt und dessen Querschnitt dem Umriß des Körpers entspricht, der vom Lichte getroffen wird.

Stellen wir zwei punktförmige Lichtquellen nebeneinader auf, so entsteht ebenfalls auf der dem Lichte abgewandten Seite des Körpers ein Schatten. Wir nennen

den Raum, in den weder Licht von der einen noch der anderen Lichtquelle dringt, den Kernschatten und den Raum, in den nur von einer Lichtquelle Licht dringen kann, den Halbschatten (Fig. 189).

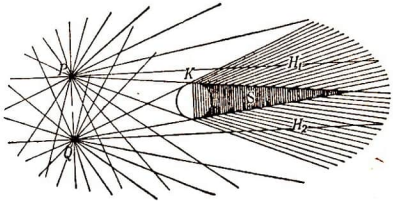


Fig. 189.

Benutzen wir eine räumlich ausgedehnte Lichtquelle, so bemerken wir, daß der Halbschatten in der Nähe des Kernschattens stark ist und nach dem Rande zu allmählich abnimmt.

Aus diesen Versuchen können wir schließen:

Das Licht breitet sich geradlinig nach allen Seiten aus.

3. Der Lichtstrahl. *Zu demselben Ergebnis gelangen wir, wenn wir das Licht einer punktförmigen Lichtquelle nur durch ein enges Loch eines Schirmes in den hinter dem Schirm liegenden Raum treten lassen. Wir erkennen, daß sich das Licht in einem schmalen geradlinigen Kegel, dessen Spitze in der Lichtquelle liegt, ausbreitet.*

Dieser schmale Lichtkegel gibt anschaulich den Weg an, den das Licht nimmt. Wir bezeichnen ihn als Lichtstrahl.

Ein Lichtstrahl gibt den Weg an, den das Licht nimmt.

Gehen mehrere Lichtstrahlen von einem leuchtenden Punkte aus, so entsteht ein Strahlenbündel. Experimentell stellen wir einen Lichtstrahl durch einen schmalen Lichtkegel, ein Strahlenbündel durch mehrere Lichtkegel mit gemeinsamer Spitze dar. Doch müssen wir daran festhalten:

4. Lichtempfänger. In geringerem oder stärkerem Maße ist jeder Körper, der von einem Lichtstrahl getroffen wird, ein Lichtempfänger.

Geht das Licht durch den Körper hindurch, ohne daß der Körper einen Schatten wirft, so ist der Körper durchsichtig. In hohem Grade durchsichtig sind die meisten Gase. Auch Glas und Wasser sind durchsichtig, doch in geringerem Maße, denn sie bilden schon einen schwachen Schatten. Undurchsichtig sind die Körper, die einen kräftigen Schatten werfen.

Befindet sich das Auge seitwärts eines Lichtstrahles, so kann es von diesem nichts bemerken, weil das Licht nur auf geradlinigem Wege ins Auge gelangen kann. Wir erkennen den Weg des Lichtstrahles daran, daß er auf Körper trifft, die er zum Aussenden von Licht nach allen Seiten veranlaßt. Diese Körper empfangen Licht und werfen es zurück.

Das Licht, das nicht selbstleuchtende Körper aussenden, ist zurückgeworfenes oder reflektiertes Licht.

Besitzt der Körper eine helle Oberfläche, so wirft er viel Licht zurück, ist sie rauh, so wirft er das Licht nach allen Seiten zurück. Gase bleiben unsichtbar, weil sie fast kein Licht aufnehmen und zurückwerfen.

Besonders geeignet dazu, einen Lichtstrahl sichtbar zu machen, sind Rauch und Staub. Zwischen den Teilchen des Rauches kann der Lichtstrahl seinen Weg weiternehmen, und andererseits leuchten die getroffenen Teilchen hell auf.

Ähnlich wirkt eine Glasscheibe mit gerauhter Oberfläche oder ölgetränktes Papier. Trifft der Lichtstrahl auf einen solchen Körper, den wir durchscheinend nennen, so kann auf ihm von allen Seiten die Erscheinung wahrgenommen werden. Für die experimentelle Untersuchung des Strahlenverlaufs wird eine solche Mattscheibe aus Glas oder Papier als Lichtempfänger benutzt.

5. Die Lochkamera. Einen weiteren Beweis für die geradlinige Ausbreitung des Lichtes liefert die Lochkamera. Diese besteht aus einem Kasten, der an der Rückseite eine Mattscheibe trägt und auf der Vorderseite in der Mitte ein kleines Loch besitzt, durch das Licht in den Kasten dringen kann. Es zeigt sich auf der Mattscheibe ein Bild der Gegenstände in verkehrter Stellung, die vor der Öffnung des Kastens stehen. Das Bild entsteht dadurch, daß von allen Punkten der Gegenstände je ein Lichtstrahl geradlinig durch das Loch auf die Mattscheibe dringt und dort sichtbar wird (Fig. 190).

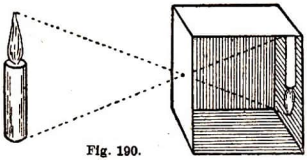


Fig. 190.

§ 79. Die Reflexion des Lichtes an ebenen Flächen

Körper mit glatter Oberfläche, die einen auf sie treffenden Lichtstrahl in ganz bestimmter Richtung zurückwerfen, nennen wir Spiegel. Ist die spiegelnde Fläche eine Ebene, so heißt der Spiegel ebener Spiegel, ist sie eine Kugel, so heißt er Kugelspiegel.

1. Das Reflexionsgesetz am ebenen Spiegel. *Auf einen ebenen Spiegel, der um eine Achse drehbar ist, lassen wir einen Lichtstrahl so auffallen, daß er in der Mitte des Spiegels auftrifft und reflektiert wird. Wir messen den Winkel, den der einfallende Strahl mit dem Lot auf der Ebene des Spiegels bildet, und den Winkel, den der reflektierte Strahl mit demselben Lote bildet.*

Es ergibt sich das Gesetz:

Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene.

Der Einfallswinkel ist stets gleich dem Reflexionswinkel.

Das Einfallslot ist das im Auftreffpunkte errichtete Lot auf der spiegelnden Ebene.

Der Einfallswinkel ist der Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und dem Einfallslot.

Der Reflexionswinkel ist der Winkel zwischen dem reflektierten Strahl und dem Einfallslot.

2. Das optische Bild. Blicken wir in einen Spiegel, so nehmen wir nicht nur wahr, daß von dem Spiegel Licht zurückgeworfen wird, sondern wir sehen hinter dem Spiegel ein Bild der Gegenstände, die sich vor dem Spiegel befinden.

Bei der Lochkamera ging von jedem Punkte des Gegenstandes ein Lichtstrahl aus, der durch die Öffnung der Kamera auf die Mattscheibe traf. Dieses Bild war wirklich an der Stelle vorhanden, wo der Schirm stand.

Ein optisches Bild, das auf einer Mattscheibe aufgefangen werden kann, nennen wir ein reelles Bild.

Das Bild, das der ebene Spiegel entwirft, kann nicht auf einer Mattscheibe aufgefangen werden.

Ein optisches Bild, das nicht auf einer Mattscheibe aufgefangen werden kann, bezeichnen wir als virtuelles Bild.

Betrachten wir, um Näheres über die Lage des Bildes zu erfahren, einen Gegenstand vor dem Spiegel, der nur aus einem leuchtenden Punkte L (Fig. 191) besteht. Würde ein einziger Strahl von L ausgehen, an dem Spiegel reflektiert werden und in das Auge gelangen, so würde das Auge nur wahrnehmen, daß in einer bestimmten Richtung (auf den Spiegel zu) ein leuchtender Punkt zu sein schiene. Den Ort des leuchtenden Punktes würde es nicht feststellen können, denn ein Lichtstrahl ist eine gerade Linie. Ist sie genau in das Auge gerichtet, so kann man nicht erkennen, wie lang sie ist. Man kann also auch nicht sehen, wo der Punkt liegt, von dem der Strahl ausgeht. In das Auge dringt aber nicht nur ein einziger Strahl, sondern ein Bündel von Strahlen, das so breit ist, daß es gerade noch durch die Pupille ins Auge gelangen kann. Ist dieses Bündel auch noch so schmal, so besitzt es doch Strahlen, die etwas in ihrer Richtung verschieden sind. Sucht das Auge nun in der Richtung der verschiedenen Strahlen des Bündels den leuchtenden Punkt, so wird es ihn dort sehen, wo sich die Richtungen der Strahlen schneiden.

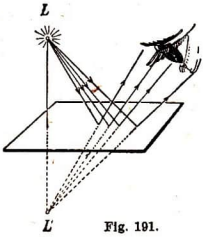


Fig. 191.

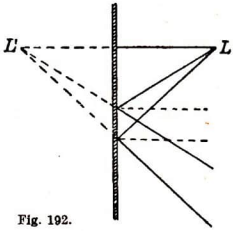


Fig. 192.

Konstruieren wir (Fig. 192) nach dem Reflexionsgesetz den Strahlenverlauf, den zwei von dem leuchtenden Punkt ausgehende Strahlen nehmen, so erkennen wir, daß die reflektierten Strahlen auseinanderstreben, je weiter sie sich von dem Spiegel entfernen. Dies gilt für alle, auch für dicht benachbarte Strahlen. Reflektierte Strahlen können sich also gar nicht vor dem Spiegel sondern nur in ihren rückwärtigen Verlängerungen schneiden. Das Auge, das den leuchtenden Punkt in den Richtungen zweier dicht benachbarten Strahlen sucht, sieht ihn hinter dem Spiegel aber nur scheinbar, weil dort ja gar keine Strahlen hingelangen können. Daraus ergibt sich:

Das virtuelle Bild eines Punktes erscheint da, wo die rückwärtigen Verlängerungen der von dem Punkte ausgehenden reflektierten Lichtstrahlen sich schneiden.

Nach dem Reflexionsgesetz werden alle Strahlen, die von dem leuchtenden Punkte ausgehen, vom ebenen Spiegel so reflektiert, daß alle ihre Verlängerungen sich in einem Punkte, dem virtuellen Bildpunkt L', schneiden.

3. Das Spiegelbild. Was sich hier für einen einzigen leuchtenden Punkt ergeben hat, gilt auch für einen ausgedehnten Gegenstand. Denn jeder Gegen-

stand kann aus einer Reihe von leuchtenden Punkten zusammengesetzt gedacht werden.

Die Bilder im ebenen Spiegel sind demnach virtuelle Bilder.

Aus der Konstruktion in Fig. 192 ergibt sich, daß der Bildpunkt L' ebenso weit hinter dem Spiegel liegt, wie der leuchtende Punkt L davor liegt. Angewandt auf einen ausgedehnten Gegenstand folgt daraus, daß Gegenstand und Bild symmetrisch zur Spiegelebene liegen. Denken wir uns den Gegenstand hinter den Spiegel verbracht, und versuchen wir ihn mit dem Bilde zur Deckung zu bringen, so erkennen wir, daß dies nicht möglich ist, obwohl beide in gleicher Größe erscheinen. Bild und Gegenstand sind nicht kongruent.

Bild und Gegenstand sind symmetrisch zueinander.

Stellt man zwei Spiegel unter einem Winkel gegeneinander geneigt gegenüber, so entsteht von jedem Gegenstand zwischen beiden Spiegeln in jedem Spiegel ein Bild. Diese Spiegelbilder erzeugen neue Bilder in dem gegenüberliegenden Spiegel. Je geringer die Neigung der beiden Spiegel gegeneinander ist, desto zahlreicher sind die Bilder.

§ 80. Der Kugelspiegel

Ein Kugelspiegel ist eine spiegelnde Kugelschale. Spiegelt diese auf der Innenseite, so nennen wir den Spiegel Hohlspiegel. Spiegelt sie außen, so heißt der Spiegel erhabener Spiegel. Der Mittelpunkt der Kugel M, zu der die Fläche gehört, heißt Krümmungsmittelpunkt. Der Mittelpunkt S der spiegelnden Fläche heißt optischer Mittelpunkt. Die gerade Linie, die diese beiden Punkte S und M miteinander verbindet, heißt die optische Achse (Fig. 193).

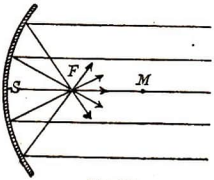


Fig. 193.

1. Der Brennpunkt. *Lassen wir parallel zur optischen Achse eines Hohlspiegels Strahlen der Sonne oder einer sehr entfernten Lichtquelle fallen, so ist in Rauch oder auf einem kleinen Schirm ein stark leuchtender Punkt vor dem Spiegel zu erkennen. Wiederholen wir den Versuch mit einzelnen parallelen Lichtstrahlen, dann erkennen wir, daß die Strahlen von dem Spiegel so reflektiert werden, daß sie durch den leuchtenden Punkt F gehen. Bringen wir einen leicht entzündbaren Körper, z. B. Zunder, in den leuchtenden Punkt, dann beginnt er zu glimmen. Weitere Versuche ergeben:*

Alle[1]) parallel zur optischen Achse auf den Hohlspiegel fallenden Lichtstrahlen werden so reflektiert, daß sie in einem Punkt vor dem Spiegel vereinigt werden.

Der Vereinigungspunkt achsenparalleler Strahlen heißt der Brennpunkt des Spiegels.

1) Dies gilt nur annähernd. Die am Rande des Spiegels auftreffenden Strahlen befolgen das Gesetz nicht genau.

Der Brennpunkt liegt in der Mitte zwischen Krümmungsmittelpunkt und optischem Mittelpunkt.

Alle vom Brennpunkt ausgehenden Strahlen werden parallel zur optischen Achse des Hohlspiegels reflektiert.

Dieses Gesetz findet beim Scheinwerfer Anwendung.

Die Entfernung des Brennpunktes vom Spiegel heißt Brennweite.

Die Brennweite ist gleich dem halben Krümmungsradius.

2. Experimentelle Untersuchung. *Wir benutzen eine Kerze oder einen glühenden Platindraht als Gegenstand, den wir an verschiedenen Punkten der optischen Achse eines Hohlspiegels aufstellen. Mit einem kleinen durchscheinenden Schirm suchen wir den Ort zu ermitteln, an dem das Bild entsteht. Wir messen die Entfernung des Gegenstandes vom Spiegel, die Gegenstandsweite, und die Entfernung des Bildes vom Spiegel, die Bildweite. Die Brennweite des Hohlspiegels bestimmen wir durch achsenparallele Strahlen. Der Krümmungsmittelpunkt liegt dann doppelt so weit von dem Spiegel entfernt* (Fig. 194).

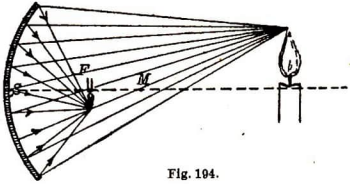


Fig. 194.

Befindet sich der Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite, dann entsteht ein umgekehrtes, verkleinertes, reelles Bild zwischen Brennpunkt und Krümmungsmittelpunkt.

Befindet sich der Gegenstand im Krümmungsmittelpunkt, dann entsteht ein umgekehrtes, gleich großes, reelles Bild im Krümmungsmittelpunkt.

Befindet sich der Gegenstand zwischen Brennpunkt und Krümmungsmittelpunkt, dann entsteht ein umgekehrtes, vergrößertes, reelles Bild außerhalb der doppelten Brennweite.

Befindet sich der Gegenstand zwischen Brennpunkt und Spiegel, dann entsteht kein reelles Bild, sondern ein virtuelles, vergrößertes, aufrechtes Bild hinter dem Spiegel.

3. Der Ort des Bildes. *Stellen wir die aus der Untersuchung gewonnenen Werte für die Gegenstandsweite a und die Bildweite b tabellarisch zusammen, bilden jedesmal für zwei zusammengehörige Messungen das Produkt $a \cdot b$ und dividieren dieses Produkt durch die Summe $a + b$, so erhalten wir stets die gleiche Größe, und zwar die Brennweite f. Es besteht also zwischen a, b und f die mathematische Beziehung*

$$\frac{a \cdot b}{a + b} = f \quad \text{oder} \quad a \cdot b = a \cdot f + b \cdot f$$

oder, wenn wir alle Glieder durch $a \cdot b \cdot f$ dividieren,

$$\boxed{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}}.$$

Der Kehrwert der Brennweite des Hohlspiegels ist gleich der Summe der Kehrwerte von Gegenstandsweite und Bildweite.

Mit Hilfe dieses Gesetzes läßt sich jederzeit durch Rechnung finden, an welcher Stelle das Bild eines Gegenstandes entstehen muß, wenn die Entfernung des Gegenstandes vom Spiegel und die Brennweite des Spiegels bekannt sind.

4. Die Bildkonstruktion. An jeder Stelle des Hohlspiegels steht der Radius der Kugel senkrecht auf der Spiegelfläche. Fällt ein Lichtstrahl auf einen Punkt des Spiegels, so ist der Radius, der von diesem Punkt aus nach dem Krümmungsmittelpunkt gezogen wird, das Einfallslot für den Strahl. Die Überlegung ergibt und der Versuch bestätigt:

Ein Strahl, der vom Krümmungsmittelpunkt her auf irgendeine Stelle des Hohlspiegels fällt, wird in sich selbst zurückgeworfen, denn er trifft senkrecht auf den Spiegel auf.

Ferner wissen wir:

Ein Strahl, der achsenparallel auf irgendeine Stelle des Hohlspiegels trifft, wird durch den Brennpunkt reflektiert.

Ein Strahl, der durch den Brennpunkt auf den Spiegel trifft, wird achsenparallel reflektiert.

Schließlich zeigt ein weiterer Versuch das nur beschränkt geltende Gesetz:

Alle Lichtstrahlen, die von einem Punkte ausgehen, werden von dem Hohlspiegel in einen Punkt zurückgeworfen.

Benutzen wir eine punktförmige Lichtquelle und suchen das zugehörige Bild auf, so finden wir das bestätigt. Wäre dies nicht der Fall, so könnte kein scharfes Bild von irgendeinem Gegenstand durch den Hohlspiegel entworfen werden. In dieser Hinsicht verhält sich der Hohlspiegel wie der ebene Spiegel.

Wie dort die Lage des Bildes konstruktiv durch den Schnitt zweier Strahlen gefunden werden konnte, so ist es auch hier möglich, weil wir den Verlauf zweier, und zwar der obengenannten Strahlen beim Hohlspiegel jederzeit kennen.

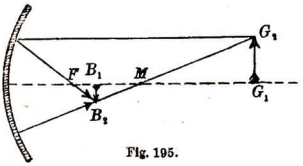


Fig. 195.

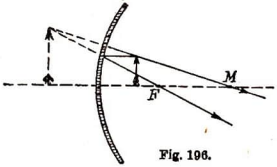


Fig. 196.

Ziehen wir von dem leuchtenden Punkt G_2 des Gegenstandes in Fig. 195 einen achsenparallelen Strahl, so wird dieser durch den Brennpunkt reflektiert. Ziehen wir einen zweiten Strahl durch den Krümmungsmittelpunkt M, so wird dieser in sich selbst reflektiert. Beide Strahlen schneiden sich im Punkte B_2. B_2 ist dann der Bildpunkt von G_2. In diesen Punkt müssen alle anderen von G_2 ausgehenden Strahlen ebenfalls reflektiert werden. Die Konstruktion läßt sich für andere Punkte ebenfalls durchführen und ergibt in diesem Falle, daß das Bild um-

gekehrt und verkleinert ist und zwischen dem Brennpunkt F und dem Krümmungsmittelpunkt M liegt.

Durch Konstruktion des Verlaufes des achsenparallelen und des Mittelpunktstrahles kann man geometrisch Lage, Größe und Stellung des Bildes ermitteln.

Ob das Bild reell oder virtuell ist, ergibt sich daraus, ob die Strahlen selbst oder nur ihre rückwärtigen Verlängerungen sich schneiden.

Von besonderem Interesse ist die Konstruktion für einen Gegenstand, der zwischen Brennpunkt und Spiegel (Fig. 196) liegt.

Es ergibt sich, daß das Bild virtuell sein muß, weil die Strahlen durch den Spiegel so reflektiert werden, daß sie sich nicht schneiden. Sie laufen auseinander. Nur ihre rückwärtigen Verlängerungen schneiden sich. Das entstehende Bild ist aufrecht, vergrößert und hinter dem Spiegel gelegen.

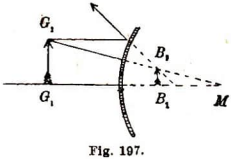


Fig. 197.

5. Der erhabene Spiegel. Beim erhabenen Spiegel entstehen, wie Fig. 197 andeutet, stets nur virtuelle Bilder eines vor dem Spiegel befindlichen Gegenstandes.

§ 81. Die Brechung des Lichtes

An der Grenzfläche zweier verschiedenen durchsichtigen Stoffe wird ein Lichtstrahl beim Übergang von dem einen Stoff in den anderen meist von seiner Richtung abgelenkt oder gebrochen.

Der Brechungsvorgang erfolgt an der Grenzfläche der beiden verschiedenen Stoffe. Nach der Brechung an der Grenzfläche verläuft der Lichtstrahl geradlinig weiter.

1. Experimentelle Untersuchung. Wir führen zunächst folgende Bezeichnungen ein (Fig. 198):

Der Lichtstrahl, der auf die brechende Grenzfläche fällt, heißt der einfallende Strahl.

Das Lot, das im Auftreffepunkt des Einfallsstrahles auf der Grenzfläche errichtet wird, ist das Einfallslot.

Der Winkel zwischen dem Einfallslot und dem Einfallsstrahl ist der Einfallswinkel.

Der im zweiten Körper weitergehende Strahl heißt gebrochener Strahl.

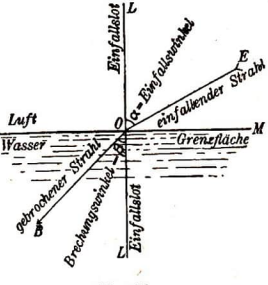


Fig. 198.

Der Winkel zwischen gebrochenem Strahl und Einfallslot heißt der Brechungswinkel.

Wir beobachten den Brechungsvorgang an einer ebenen Grenzfläche zwischen Luft und einem durchsichtigen Körper, zunächst Wasser und dann Glas. Wir messen die Größe des Einfallswinkels und des zugehörigen Brechungswinkels für einen Lichtstrahl, den wir nach und nach mit immer stärkerer Neigung gegen die Grenzfläche fallen lassen.

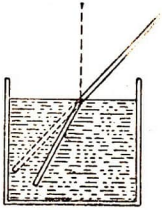


Fig. 199.

Im Schülerpraktikum läßt sich der Versuch an einem Drahtmodell, wie es Fig. 199 *zeigt, an Wasser, oder mit Stecknadeln, durch die die Richtung des Lichtstrahles festgelegt wird, an Glas ausführen.*

In allen Fällen ergibt sich:

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

Treten die Lichtstrahlen aus der Luft in den durchsichtigen Körper, dann werden sie so gebrochen, daß der Brechungswinkel kleiner ist als der Einfallswinkel.

An Glas ist der Brechungsvorgang stärker als an Wasser.

2. Die Brechzahl. In Fig. 200 stelle GG' die Grenzfläche beider Stoffe dar. AO ist der einfallende, OB der gebrochene Strahl. Um O ist ein Kreis mit beliebigem Radius r gezogen. AC und BD sind die Lote vom Schnittpunkt des Strahls mit dem Kreis auf das Einfallslot LL'. Zeichnen wir nacheinander alle gemessenen Werte von α und β in die Figur ein, messen dann jedesmal aus, wie groß die Strecken AC und BD sind und ordnen die Werte in einer Tabelle, so ergibt sich, daß in allen Fällen AC/BD eine unveränderliche Zahl ist.

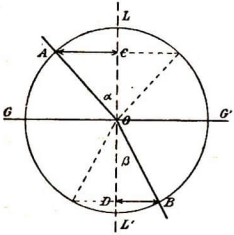


Fig. 200.

α	β	AC	BD	AC/BD

Da diese Strecken die halben Sehnen sind, welche die doppelten Einfallswinkel und Brechungswinkel aus demselben Kreis ausschneiden, können wir die darin erkennbare gesetzmäßige Beziehung in folgender Form aussprechen:

An der Grenzfläche zweier durchsichtiger Körper wird der Lichtstrahl so gebrochen, daß das Verhältnis der Sehnen, die von dem doppelten Einfalls- und dem doppelten Brechungswinkel aus demselben Kreis ausgeschnitten werden, eine unveränderliche Zahl ist.

Diese Zahl ist für den Übergang von Luft in Wasser $^4/_3$, von Luft in Glas $^3/_2$. Bei anderen Körpern findet man andere Werte, die jedesmal für den betreffenden Stoff charakteristisch sind.

Wir nennen das unveränderliche Verhältnis der so ausgeschnittenen Sehnen die Brechzahl des betreffenden Stoffes. Sie wird meist mit n bezeichnet.

Es beträgt die Brechzahl beim Übergang aus dem luftleeren Raum in

Wasser	$n = 1{,}33$	Kronglas	$n = 1{,}5$	Flintglas	$n = 1{,}7$
Alkohol	$n = 1{,}36$	Quarz	$n = 1{,}54$	Diamant	$n = 2{,}4$.

Beim Übergang aus dem luftleeren Raum in Luft von Atmosphärendruck wird ein Lichtstrahl ebenfalls gebrochen. Die Brechzahl $n = 1{,}0003$ ist aber so klein, daß diese Brechung meist nicht berücksichtigt wird.

[Anstatt die Sehnen auszumessen, kann man auch in der Tabelle die Sinus-

funktionen der Einfalls- und Brechungswinkel eintragen und deren Quotienten bilden. $\sin\alpha = AC/r$ und $\sin\beta = BD/r$. Es ergibt sich dann

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

In dieser Form wird das Brechungsgesetz in der Regel ausgesprochen. Es lautet:

Das Verhältnis der Sinus von Einfallswinkel und zugehörigem Brechungswinkel nennt man die Brechzahl des betreffenden Stoffes.

An der Grenzfläche zweier durchsichtiger Körper wird der Lichtstrahl so gebrochen, daß das Verhältnis der Sinus von Einfallswinkel und Brechungswinkel für alle Winkel eine unveränderliche Zahl ist

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

Diese Formel gestattet, den Brechungswinkel β bei einem bestimmten Stoff zu berechnen, wenn man den Einfallswinkel α kennt. Den Wert, den die Brechzahl für einen bestimmten Stoff besitzt, kann man aus der Tabelle entnehmen.]

3. Die Totalreflexion. Die experimentelle Unterlage zeigt, daß der Brechungsvorgang nach demselben Gesetz erfolgt, wenn der Lichtstrahl aus dem durchsichtigen Stoff in die Luft tritt. In diesem Falle ist der Einfallswinkel stets kleiner als der Brechungswinkel (Fig. 201).

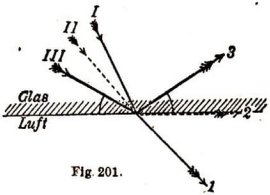


Fig. 201.

Stoffe, die sich bei der Brechung wie Wasser oder Glas gegen die Luft verhalten, nennt man optisch dichtere Stoffe als Luft.

Tritt der Lichtstrahl (I....1) aus dem optisch dichteren Stoff in den optisch dünneren Stoff, so ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel. Es kann also der Brechungswinkel gleich 90° werden (II....2). Vergrößert man den Einfallswinkel über den Betrag hinaus, den er in diesem Falle besitzt, so tritt der Strahl (III....3) nicht mehr in den optisch dünneren Stoff über, sondern wird an der Grenzfläche wie an einem vorzüglichen Spiegel reflektiert. Der Lichtstrahl wird überhaupt nicht gebrochen, sondern nach dem Reflexionsgesetz an der Grenzfläche vollständig in den optisch dichteren Stoff reflektiert. Diese Reflexion heißt Totalreflexion.

Für Glas gegen Luft beträgt der Winkel, bei dem die Totalreflexion beginnt, etwa 42°, bei Wasser gegen Luft etwa 50°.

Fällt Licht auf ein rechtwinkliges Glasprisma so auf, daß es senkrecht auf die Hypotenusenfläche oder eine der beiden Kathetenflächen auftrifft, dann wird es total reflektiert (Fig. 202).

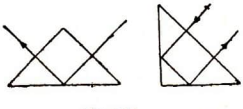


Fig. 202.

Der Winkel, bei dem die Brechung in

die Totalreflexion übergeht, heißt der Grenzwinkel der Totalreflexion.

Totalreflexion kann nur beim Übergang aus dem optisch dichteren in den optisch dünneren Stoff stattfinden.

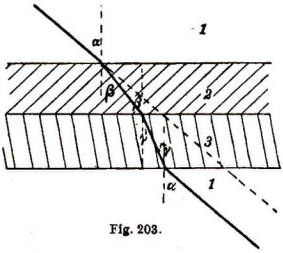


Fig. 203.

4. Brechung an mehreren parallelen Grenzflächen. Der Versuch zeigt:

Auch beim Übergang des Lichtes von Wasser zu Glas findet eine Brechung statt. Wasser ist der optisch dünnere, Glas der optisch dichtere Stoff.

Geht der Lichtstrahl durch eine oder mehrere Glasplatten, die von Ebenen begrenzt sind, die zueinander parallel laufen, so wird der Strahl an der ersten Grenzfläche nach dem Einfallslote hin gebrochen, in der zweiten Grenzfläche von dem Lote weg gebrochen. Im ganzen wird er in seiner Richtung nicht abgelenkt, wohl aber ist er etwas zur Seite verschoben, wie dies Fig. 203 für zwei Platten mit verschiedener optischen Dichte andeutet.

§ 82. Das optische Prisma

Wir betrachten nun den Fall, bei dem die Grenzflächen eines durchsichtigen Körpers, in die der Lichtstrahl eintritt, und aus denen er austritt, nicht parallel zueinander sind.

Einen durchsichtigen Körper, der von zwei Ebenen so begrenzt wird, daß er die Gestalt eines Keiles hat, nennen wir ein optisches Prisma.

Den Winkel, den die beiden Ebenen des Prismas miteinander bilden, nennen wir den brechenden Winkel, die Kante, in der sich die beiden Ebenen schneiden, die brechende Kante.

1. Die Ablenkung. *Ein Lichtstrahl, der so, wie dies* Fig. 204 *andeutet, auf die vordere Grenzfläche des Prismas auffällt, wird an dieser gebrochen und an der zweiten Grenzfläche beim Übergang in die Luft wieder gebrochen. Er wird also aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Versuche bei verschiedenen Einfallswinkeln ergeben:*

Fig. 204.

Der Lichtstrahl wird stets nach dem dicken Teile des Prismas abgelenkt.

Die geringste Ablenkung tritt dann ein, wenn der Strahl im Inneren so verläuft, daß er mit den beiden Begrenzungsebenen des Prismas den gleichen Winkel bildet.

Dann ist der Winkel α_1 so groß wie der Winkel α_2 und Winkel β_1 so groß wie Winkel β_2. Der Strahlengang ist dann symmetrisch zu der Ebene, die den brechenden Winkel ε des Prismas halbiert.

Das Minimum der Ablenkung tritt im Prisma bei symmetrischem Strahlengange ein.

2. Die Farbenzerlegung. *Bei allen Ablenkungsversuchen zeigt sich, daß der aus weißem Lichte bestehende Lichtstrahl nach dem Durchgang durch das Prisma nicht mehr weiß ist, sondern aus einem Lichtstrahlenbündel von verschiedenen Farben besteht.*

In diesem Bündel ist ein roter Strahl vorhanden, der stets am wenigsten abgelenkt ist, und ein violetter Strahl, der stets die stärkste Ablenkung zeigt. Dazwischen liegen Strahlen von der Farbe gelb, grün und blau.

An Prismen von Kron- und Flintglas kann man zeigen, daß der Unterschied in der Ablenkung der einzelnen gefärbten Strahlen bei verschiedenen Glassorten verschieden ist. Ein Kronglasprisma, dessen brechender Winkel 35° groß ist, zeigt ungefähr denselben Unterschied in der Ablenkung der verschiedenen Strahlen wie ein Flintglasprisma mit einem brechenden Winkel von 16°.

Stellt man ein Prisma aus Kronglas und ein Prisma aus Flintglas (Fig. 205), die gleiche Farbenzerstreuung bewirken, so auf, daß der Lichtstrahl nacheinander durch beide Prismen geht, daß aber das eine ihn nach dieser, das andere nach der entgegengesetzten Seite ablenken würde, so ist der Strahl nach dem Durchgang noch immer aus seiner Richtung abgelenkt, aber nicht mehr in ein Farbenbündel zerlegt, sondern weiß wie der einfallende Strahl.

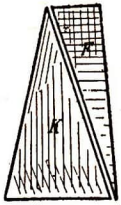


Fig. 205.

Ein Kron- und ein Flintglasprisma, die so beschaffen und zusammengestellt sind, daß ein Lichtstrahl durch sie hindurchtritt, ohne in Farben zerlegt zu werden, nennt man ein achromatisches Prisma.

Mit einem achromatischen Prisma kann man einen weißen Lichtstrahl aus seiner Richtung ablenken, ohne ihn in Farben zu zerlegen.

§ 83. Die Linsen

Unter einer optischen Linse versteht man einen durchsichtigen Körper, der von zwei Kugelflächen begrenzt wird. Eine Linse, die in der Mitte dicker ist als am Rande, heißt Konvexlinse oder Sammellinse. Eine Linse, die in der Mitte dünner ist als am Rande, heißt Konkavlinse oder Zerstreuungslinse.

Unter der Linsenachse oder optischen Achse versteht man die Gerade, die durch die Mitte der Linse geht und auf den Kugelflächen senkrecht steht.

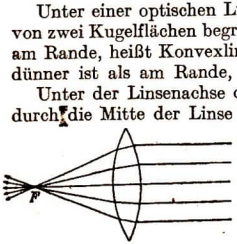


Fig. 206 a.

1. Der Brennpunkt der Sammellinse. *Lassen wir die Strahlen der Sonne oder einer sehr entfernten Lichtquelle in der Linsenachse auf die Linse fallen, so nehmen wir wahr, daß die Strahlen ganz ähnlich wie beim Hohlspiegel in einem Punkte nach dem Durchgang durch die Linie vereinigt werden* (Fig. 206a).

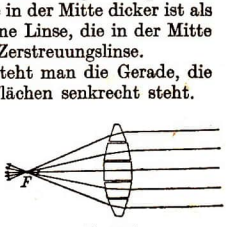


Fig. 206 b.

Alle[1]) z. optischen Achse parallel auf die Linse fallenden Strahlen werden so gebrochen, daß sie durch einen Punkt der Achse gehen.

1) Siehe Bemerkung § 80, 1, die auch hier gilt.

Der Punkt, in dem die achsenparallelen Strahlen nach dem Durchgang durch die Linse vereinigt werden, heißt der Brennpunkt der Linse.

Jede Sammellinse hat zwei Brennpunkte, die zu beiden Seiten gleichweit von der Linse entfernt liegen.

Die Entfernung des Brennpunktes von der Mitte der Linse heißt die Brennweite der Linse.

Alle vom Brennpunkt ausgehenden Strahlen gehen nach dem Durchgang durch die Linse achsenparallel weiter.

Diese Wirkung der Linse erklärt sich daraus, daß man sie aus vielen optischen Prismen zusammengesetzt denken kann, wie dies Fig. 206b andeutet. Mit entsprechend geformten prismatischen Gefäßen, die mit Wasser gefüllt werden, kann man zeigen, daß parallele Strahlen, die durch sie abgelenkt werden, in einem Punkte vereinigt werden.

2. Experimentelle Untersuchung an Sammellinsen. *Wir benutzen wie bei der Untersuchung am Hohlspiegel einen glühenden Platindraht oder eine Kerze als Gegenstand, der Lichtstrahlen aussendet, und stellen ihn an verschiedenen Punkten der Achse der Linse auf* (Fig. 207). *Auf der anderen Seite der Linse verschieben wir einen Schirm solange, bis wir das Bild, das die Linse von dem Gegenstand entwirft, scharf erkennen. Wir messen dann die Entfernung des Gegenstandes von der Linse, die Gegenstandsweite a, und die Entfernung des Bildes von der Linse, die Bildweite b, und bestimmen die Brennweite der Linse durch achsenparallele Strahlen. Dann ergibt die Untersuchung für verschiedene Gegenstandsweiten:*

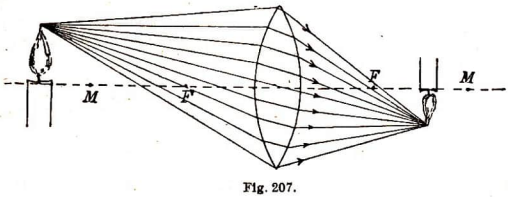


Fig. 207.

Gegenstand:	Bild:
außerhalb der doppelten Brennweite,	zwischen einfacher und doppelter Brennweite, umgekehrt, verkleinert, reell;
in doppelter Brennweite,	in doppelter Brennweite, umgekehrt, gleichgroß, reell;
zwischen einfacher und doppelter Brennweite,	außerhalb der doppelten Brennweite, umgekehrt, vergrößert, reell;
im Brennpunkt,	Bild im Unendlichen;
innerhalb der Brennweite,	Bild auf derselben Seite wie der Gegenstand, virtuell, aufrecht, vergrößert.

3. Der Ort des Bildes der Sammellinse. *Stellen wir die aus der Untersuchung gewonnenen Werte der Gegenstandsweite a und der Bildweite b tabellarisch zusammen, bilden dann das Produkt aus den zusammengehörigen Werten $a \cdot b$ und dividieren dieses Produkt durch die Summe $a + b$, so erhalten wir in allen Fällen für die*

gleiche Linse dieselbe Zahl, und zwar der Größe nach die Brennweite f der Linse. Es besteht also auch bei der Sammellinse das Gesetz

$$\frac{a \cdot b}{a + b} = f \quad \text{oder} \quad a \cdot b = a \cdot f + b \cdot f$$

oder, wenn wir alle Glieder der Gleichung durch $a \cdot b \cdot f$ dividieren,

$$\boxed{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}}.$$

Die reziproke Brennweite der Sammellinse ist gleich der Summe der reziproken Werte der Gegenstandsweite und der Bildweite.

Auch für die Sammellinse können wir demnach die Lage des Bildes, das durch eine bestimmte Linse entworfen wird, berechnen, wenn wir deren Brennweite und die Entfernung des Gegenstandes von der Linse kennen.

4. Die Bildkonstruktion für die Sammellinse. Aus der Tatsache, daß durch die Linse ein scharfes Bild entworfen wird, müssen wir schließen, daß alle Strahlen, die von einem leuchtenden Punkt des Gegenstandes ausgehen, wieder in einem einzigen Punkt vereinigt werden (nur annähernd richtig). Es müssen also zwei Strahlen, deren Verlauf wir kennen, genügen, wenn wir auf konstruktivem Wege die Lage, Größe und Art des Bildes bestimmen wollen. Das Bild muß da liegen, wo sich die Strahlen schneiden. Wir wissen:

Ein achsenparalleler Strahl wird so abgelenkt, daß er durch den Brennpunkt auf der anderen Seite der Linse geht.

Ein Strahl durch den Brennpunkt wird so abgelenkt, daß er auf der anderen Seite der Linse als achsenparalleler Strahl weitergeht.

Ferner können wir durch den Versuch feststellen:

Ein Strahl, der durch den Mittelpunkt der Linse geht, geht nach seinem Austritt ungebrochen in der alten Richtung weiter.

Es genügt, zwei von diesen Strahlen zu konstruieren, um die Lage des Bildes zu bestimmen.

Fig. 208.

Fig. 209.

Ob das Bild reell oder virtuell ist, ergibt sich auch hier daraus, ob die Strahlen selbst oder ihre rückwärtigen Verlängerungen sich schneiden, Fig. 208 bis 210 geben Beispiele dafür.

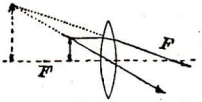


Fig. 210.

5. Die Bildgröße bei der Sammellinse. Aus den Fig. 208 bis 210 ergibt sich nach dem Proportionallehrsatz, daß für die Bildgröße der Sammellinse die einfache Beziehung besteht

$$\boxed{\text{Gegenstandsgröße} : \text{Bildgröße} = a : b}.$$

6. Die Konkavlinse oder Zerstreuungslinse. *Lassen wir achsenparallele Strahlen auf eine Konkavlinse fallen, so bemerken wir, daß die Strahlen nach dem Durchgang durch die Linse zerstreut werden. Noch stärker tritt dies ein, wenn wir von einem leuchtenden Punkt der Achse Lichtstrahlen auf die Linse fallen lassen. Daraus ergibt sich:*

Die Zerstreuungslinse kann kein reelles Bild von einem leuchtenden Gegenstand entwerfen.

Blicken wir aber durch eine Zerstreuungslinse, so erkennen wir, daß sie scharfe Bilder der Gegenstände entwirft. Dieser Versuch legt dar:

Auch bei der Zerstreuungslinse werden alle Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, so abgelenkt, daß sie alle zusammenwirken, um ein Bild des Punktes zu liefern. Dieses Bild ist aber virtuell, denn es können sich nur die rückwärtigen Verlängerungen der Strahlen schneiden.

Lage, Größe und Art des Bildes können auch hier mit dem achsenparallelen Strahl und mit dem Strahl, der durch den Mittelpunkt der Linse geht, gefunden werden. Das virtuelle Bild liegt auf derselben Seite der Linse wie der Gegenstand (Fig. 211).

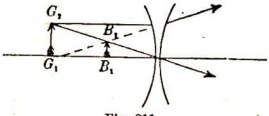


Fig. 211.

Unter dem Brennpunkt der Zerstreuungslinse versteht man den Punkt, aus dem die achsenparallel auffallenden Strahlen nach dem Durchgang herzukommen scheinen.

Die Brennweite der Zerstreuungslinse kann man dadurch bestimmen, daß man sie mit einer Sammellinse von solcher Brennweite in den Gang von Lichtstrahlen hält, durch die die Zerstreuungswirkung der Zerstreuungslinse aufgehoben wird.

§ 84. Geschichtliche Entwicklung

Im Altertum nahm man an, das Sehen käme in der Weise zustande, daß das Auge Strahlen aussende, die auf die sichtbaren Körper träfen. Man hat Spiegel aus Metall besessen, sowohl Planspiegel als auch Hohlspiegel und erhabene Spiegel. Hohlspiegel haben zum Erzeugen von Feuer, besonders beim Entzünden von Opferfeuern, gedient. Ebenso sind auch Sammellinsen zu diesem Zwecke benutzt worden. Der Schliff dieser Linsen war allerdings sehr ungleichmäßig.

Das Reflexionsgesetz ist schon im 3. Jahrhundert v. Chr. bekannt gewesen. Die Vorgänge bei der Brechung sind ebenfalls schon von griechischen Forschern untersucht worden, doch ist das Brechungsgesetz in der heutigen Form erst um das Jahr 1600 n. Chr. von dem holländischen Physiker Snellius ausgesprochen worden.

Die Totalreflexion ist von dem deutschen Astronomen Kepler etwa um dieselbe Zeit entdeckt worden.

XVI. Die optischen Instrumente

§ 85. Der photographische Apparat

1. Die photographische Kamera. Die Kamera besteht aus einem allseitig lichtdicht geschlossenen Kasten oder Lederbalg. In der Mitte ihrer Vorderseite ist eine Sammellinse angebracht, durch die Licht von den Gegenständen, die der

Kamera gegenüberstehen, in das Innere des Kastens treten kann. Im Inneren vor der Rückseite befindet sich eine Mattscheibe, auf der das reelle Bild entsteht, das die Linse von den Gegenständen entwirft. Diese Mattscheibe kann durch die photographische Platte ersetzt werden, auf der das Bild durch Einwirkung des Lichtes auf die lichtempfindliche Schicht festgehalten wird (Fig. 212).

Die Gegenstände, die photographiert werden sollen, befinden sich nicht immer in derselben Entfernung von dem Apparat. Die Linse entwirft aber von den Gegenständen nur in einer bestimmten Entfernung ein scharfes Bild, die sich aus der Gegenstandsweite und der Brennweite der Linse nach der Formel

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

berechnen läßt. Soll ein scharfes Bild auf der Platte entstehen, so muß es möglich sein, die Entfernung von Linse und Platte zu verändern. Dies wird durch den ausziehbaren Lederbalg ermöglicht. Auf einer Mattscheibe wird nachgeprüft, ob das Bild scharf und der Apparat richtig eingestellt ist. Dann wird die Mattscheibe durch eine Platte ersetzt, die genau deren Stelle einnimmt.

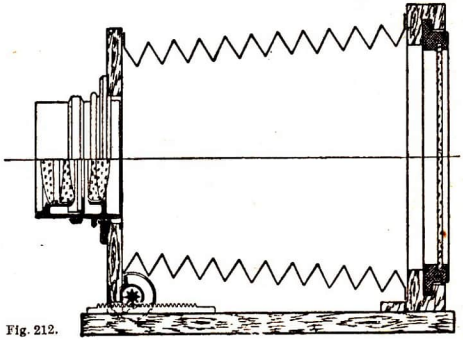


Fig. 212.

2. Die Herstellung des Bildes. Die photographische Platte besteht aus einer ebenen Glasplatte oder einem Blatt aus Zelluloid, das vollkommen durchsichtig ist. Auf der Vorderseite trägt die Platte eine dünne Schicht aus Gelatine, die mit Silberbromid getränkt ist. Wird die Schicht belichtet, so verändert sich, auch wenn die Belichtung nur Bruchteile einer Sekunde dauert, das Silberbromid an den vom Licht getroffenen Stellen. Legt man die Platte in der Dunkelkammer in eine Lösung von gewissen Chemikalien (Entwickler), die die Eigenschaft haben, nur die Teilchen des Silberbromids anzugreifen, die vom Licht getroffen worden sind, so werden durch chemische Reaktion undurchsichtige Silberteilchen an den vom Licht getroffenen Stellen ausgeschieden. Die Platte erscheint nach einigen Minuten Entwicklungsdauer dort schwarz oder undurchsichtig. Man kann das Bild erkennen, nur sind die dunklen Stellen des Gegenstandes hell und die hellen Stellen dunkel wiedergegeben. An den hellen Stellen befindet sich noch lichtempfindliches Silberbromid. Dieses muß entfernt werden. Zu diesem Zweck wird die Platte in eine andere Salzlösung gebracht (Fixierlösung), in der alles noch vorhandene Silberbromid aufgelöst wird. Dann kann die Platte an das Tageslicht gebracht werden.

Nach gründlichem Ausspülen mit Wasser wird die Platte getrocknet. Legt man dann auf die Schichtseite der Platte ein Blatt Papier, das mit lichtempfindlichen Salzen getränkt ist, und läßt kurze Zeit durch die Platte Licht auf das

Papier fallen, so wird die lichtempfindliche Schicht des Papiers gegenüber den hellen Stellen der Platte stärker beeinflußt als gegenüber den dunklen Stellen. Nimmt man nun einen ähnlichen Entwicklungsprozeß mit dem Papier wie mit der Platte vor, so erscheinen die hellen Stellen des Gegenstandes hell und die dunklen dunkel. Auf dem Papier wird also der Gegenstand in seinen Helligkeitswerten richtig wiedergegeben. Man nennt die Platte das Negativ, das Bild auf dem Papier das Positiv.

3. Die Bildfehler. Man bezeichnet die Linse als das Objektiv des photographischen Apparates. Eine einfache Linse entwirft von einem leuchtenden Punkt nur dann ein punktförmiges Bild, wenn die Strahlen durch die Mitte und nicht gleichzeitig auch durch die Randteile der Linse gehen. Das Bild wird daher schärfer, wenn die Randstrahlen aufgehalten werden. Dies geschieht durch eine verstellbare Blende, die mit dem Verschluß des Apparates und der Linse in der Mitte der Vorderwand des Apparates vereinigt ist. Die Blende hat außerdem den Zweck, die Helligkeit des Bildes auf der Platte zu beeinflussen. Sie läßt mehr Licht von einem Punkte durch, wenn sie offen ist, weniger, wenn sie eng ist.

Eine Linse zeigt dieselben Eigenschaften wie das Prisma: sie lenkt die Strahlen ab und zerlegt weiße Lichtstrahlen in verschieden abgelenkte farbige Strahlen. Das kann man an den farbigen Rändern der Bilder erkennen, die eine Sammellinse entwirft. Kittet man eine Sammellinse aus Kronglas und eine weniger stark brechende Zerstreuungslinse aus Flintglas zu einer einzigen Linse zusammen, so zeigt sie, richtig zusammengestellt, wie das achromatische Prisma wohl eine Ablenkung des Lichtstrahls aber keine Farbenzerlegung mehr. Eine solche Linsenkombination ist z. B. das Apochromat (Fig. 213).

Fig. 213.

Eine einfache Linse entwirft im allgemeinen nur auf der Mitte der Platte ein scharfes Bild. Die äußeren Teile sind unscharf, wenn die Mitte scharf ist und umgekehrt. Durch geeignete Zusammensetzung von Linsen kann man auch diesen Fehler beheben. Eine Linsenkombination dieser Art nennt man Aplanat.

Linsensysteme, die fast fehlerfreie Bilder liefern, sind z. B. die Anastigmate. Sie bestehen meist aus zwei gleichen Gruppen von je drei Linsen, die zu einem Objektiv zusammengesetzt sind, in dessen Mitte Blende und Verschluß liegen.

§ 86. Das Auge

1. Die Teile des Auges. Die äußere Hülle des Augapfels wird von der weißen Haut *Sc* gebildet (Fig. 214). Diese Haut ist auf der Vorderseite des Auges stärker gekrümmt und durchsichtig. Sie heißt Hornhaut *C*. Unter der weißen Haut sitzt die Aderhaut *Ch*, eine undurchsichtige Haut, die das Innere des Auges gegen eindringendes Licht schützt. Unter der Hornhaut setzt sich die Aderhaut nicht fort. Sie geht vielmehr über in die Regenbogenhaut oder Iris *J*, die in der Mitte eine Öffnung, die Pupille, besitzt. Zwischen der Iris und der Hornhaut liegt die vordere Augenkammer, die von

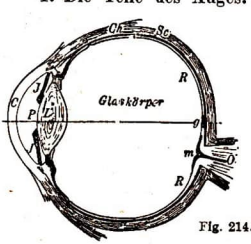


Fig. 214.

einer lichtbrechenden Flüssigkeit angefüllt ist. Die Iris kann sich erweitern und zusammenziehen. Dadurch wird die Pupille größer oder kleiner. Unmittelbar hinter der Iris sitzt die Augenlinse *L*. Sie wird von Bändern an ihrem äußeren Rande festgehalten. Der Linse gegenüber liegt als dritte Haut unter der Aderhaut die Netzhaut *R*. Der Raum zwischen ihr und der Linse, die hintere Augenkammer, ist von einer gallertartigen Masse, dem Glaskörper, angefüllt. Die Netzhaut ist lichtempfindlich. Sie besteht aus feinen Stäbchen und Zäpfchen, in denen der Sehnerv, der von hinten seitlich ins Auge tritt, ausmündet. Eine Stelle der Netzhaut, die der Linse genau gegenüber liegt, ist besonders lichtempfindlich. Sie heißt der gelbe Fleck *g*. Die Stelle, an der der Sehnerv eintritt, ist unempfindlich für Licht. Sie heißt der blinde Fleck *m*.

2. Der Sehvorgang. Das Auge ist einer photographischen Kamera vergleichbar. Die Lichtstrahlen dringen durch die Pupille in das Innere. Die Linse und die anderen lichtbrechenden Substanzen des Auges entwerfen auf der Netzhaut ein umgekehrtes verkleinertes Bild des Gegenstandes. Im Gegensatz zu dem Vorgang beim photographischen Apparat geschieht die Einstellung des Auges zum Zwecke scharfen Sehens nicht durch Veränderung des Abstandes zwischen Linse und Netzhaut, sondern durch Veränderung der Brennweite der Linse. Die Linse wird durch ein ringförmiges Band in ihrer Lage festgehalten. Das Band ist so straff gespannt, daß im Ruhezustand des Auges die Linse flach gezogen und auf die Ferne eingestellt ist. Am äußeren Rand des Bandes liegt ein ringförmiger Muskel. Zieht sich dieser Muskel zusammen, so wird das Band schlaff und die Linse nimmt von selbst eine stärkere Krümmung an. Die Krümmung kann so stark werden, daß Gegenstände, die vom Auge etwa 15 bis 25 cm entfernt sind, noch deutlich abgebildet werden. Nähere Gegenstände sieht das normalsichtige Auge zwar ebenfalls noch. Die Linse kann sich aber nicht weiter krümmen, und daher verschwimmt für unser Auge das Bild von Gegenständen, die dicht vor das Auge gebracht werden.

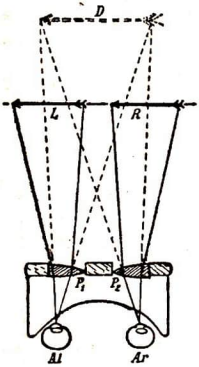
Das Bild, das auf der Netzhaut entworfen ist, ist umgekehrt. Trotzdem sehen wir die Gegenstände aufrecht. Es ist anzunehmen, daß wir aus Erfahrung das in dem Auge entworfene Bild aufrecht sehen, auch wenn es auf der Netzhaut umgekehrt ist.

3. Kurzsichtige und weitsichtige Augen. Sieht ein Auge nur die in der Nähe befindlichen Gegenstände scharf und weit entfernte verschwommen, so liegt dies daran, daß die Strahlen zu stark gebrochen werden. Meist ist dann die Linse zu stark gekrümmt. Schaltet man in den Strahlengang eine Zerstreuungslinse ein, so wird die Brechkraft der Linse geschwächt, und das Auge vermag auch entfernte Gegenstände deutlich zu sehen. Man bezeichnet Augen, die diesen Fehler besitzen, als kurzsichtig.

Vermag das Auge entfernte Gegenstände deutlich, in der Nähe befindliche aber nur unscharf zu sehen, so liegt Weitsichtigkeit vor. Die Strahlen werden dann zu schwach gebrochen. Das Bild der nahen Gegenstände würde hinter der Netzhaut erst scharf. Schaltet man in den Strahlengang eine Sammellinse, so werden die Strahlen, die von nahen Objekten ausgehen, stärker gebrochen. Es entsteht ein scharfes Bild auf der Netzhaut.

Weitsichtige müssen konvexe, Kurzsichtige konkave Brillengläser tragen.

4. Das körperliche Sehen. Das rechte Auge des Menschen sieht die Gegenstände mehr von der rechten, das linke Auge von der linken Seite. Beide Bilder sind daher etwas voneinander verschieden. Davon kann man sich überzeugen, wenn man die Gegenstände erst mit dem einen Auge allein, dann mit dem anderen allein betrachtet, ohne eine Bewegung des Kopfes inzwischen vorzunehmen. Dadurch, daß sich im Gehirn beim Erzeugen der Sehempfindung beide Bilder zu einem zusammensetzen, wird erreicht, daß wir die Gegenstände nicht flächenhaft sondern körperlich in entsprechender Entfernung vom Auge sehen.



Man kann auch mit dem photographischen Apparat einen körperlichen Gegenstand von zwei verschiedenen Punkten aufnehmen. Betrachtet man beide Bilder in einem sogenannten Stereoskop, so gewinnt man aus flächenhaften Bildern einen guten körperlichen Eindruck. Fig. 215 gibt den Strahlenverlauf im Stereoskop wieder, durch den beide Bilder als ein Gegenstand erscheinen.

5. Grenzen der Leistungsfähigkeit des Auges. Das Auge sieht stets nur einen Teil der Gegenstände, auf die es gerichtet ist, besonders deutlich. Das Bild dieses Teiles liegt dann im gelben Fleck. Wir lassen das Auge wandern, wenn wir alle Teile des Gegenstandes deutlich sehen wollen.

Die Farbenempfindung kommt dadurch zustande, daß die Zäpfchen der Netzhaut teils nur für rotes, teils nur für gelbgrünes, teils nur für blaues Licht empfindlich sind. Sämtliche Farben erscheinen uns als Mischungen dieser drei Farben, je nachdem die entsprechenden Zäpfchen gereizt werden. Farbenblindheit beruht darauf, daß Störungen in der Empfindlichkeit der entsprechenden Zäpfchen vorliegen. Weiteres siehe § 94, 3.

Starke Lichteindrücke zeigen Nachwirkungen in der Art, daß die Lichtempfindung erst allmählich aufhört, wenn der Reiz verschwunden ist. Langandauernde Lichtempfindungen derselben Art erzeugen eine Unempfindlichkeit an den belichteten Teilen der Netzhaut. In diesem Falle entstehen negative Nachbilder.

Ein Lichteindruck wirkt etwa $^1/_{20}$ Sekunde nach. Rascher aufeinanderfolgende Eindrücke werden nicht mehr voneinander unterschieden. Eindrücke, die etwa in diesem Zeitmaße aufeinanderfolgen, werden aneinandergereiht (Kino).

Gegenstände, die vom Auge aus gesehen unter einem kleineren Winkel als etwa eine Winkelminute erscheinen, werden nicht mehr unterschieden (Näheres § 88, 1). Man bezeichnet den Winkel, unter dem ein Gegenstand vom Auge aus gesehen erscheint, als den Sehwinkel.

Das Auge ist Sinnestäuschungen unterworfen. Helle Gegenstände auf dunklem Grund werden zu groß, dunkle auf hellem Grund zu klein wahrgenommen. Farbenkontraste werden erst bemerkt, wenn sie kräftig sind. Parallele Linien können als nichtparallel erscheinen usw.

§ 87. Der Bildwerfer (Projektionsapparat)

Er besteht aus einer starken möglichst punktförmigen Lichtquelle in einem Gehäuse, das an seiner Vorderseite ein Linsensystem C trägt (Fig. 216). Die Lichtstrahlen treffen von der Lichtquelle L auf diese Linsen, werden abgelenkt und beleuchten ein Lichtbild G (beim Stehbild eine photographische Platte oder ein Film, auf denen das Bild positiv hervorgerufen ist), das dicht vor die Linsen gestellt ist. Von diesem Bild entwerfen die beiden Linsen O, zwischen denen eine Blende Bl steht, ein Bild auf einem Schirm S, der einige Meter vor dem Apparat entfernt aufgespannt ist. Wird das Lichtbild umgekehrt aufgestellt, so erscheint das Bild auf dem Schirm aufrecht. Die Stellung der Linse ist so gewählt, daß das Bild stark vergrößert ist.

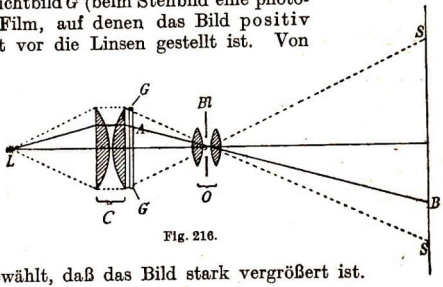


Fig. 216.

Im Kino werden kleine Bilder, die auf einem Filmstreifen aneinandergereiht sind, in so kurzen Zeitabständen vor die Linsen C gebracht, daß alle $^1/_{20}$ Sekunde etwa das folgende Bild an die Stelle des vorhergehenden tritt. Ebenso oft wird also das Auge, das nach dem Schirm sieht, einen neuen Bildeindruck empfangen. Ist der Fimstreifen in einem photographischen Apparat so belichtet worden, daß auf ihm alle $^1/_{20}$ Sekunde von einem Vorgang ein neues Bild neben dem vorhergehenden entstanden ist, dann muß der Vorgang durch den Bildwerfer (Kinematograph) so wiedergegeben werden, wie er verlief.

§ 88. Instrumente zur optischen Vergrößerung

1. Sehwinkel und Auge. Der Winkel, unter dem ein Gegenstand dem Auge erscheint, heißt Sehwinkel.

Die scheinbare Größe des Gegenstandes entspricht der Größe des Sehwinkels.

Das menschliche Auge ist so gebaut, daß in zweierlei Hinsicht seine Leistungsfähigkeit begrenzt ist:

a) Sehr kleine Gegenstände könnten dann groß gesehen werden, wenn man sie ganz dicht vor das Auge bringen könnte. Bringt man sie aber sehr nahe an das Auge heran, so kann sich die Linse nicht mehr dieser Entfernung anpassen. Der Gegenstand wird nur undeutlich gesehen. Das unbewaffnete Auge kann daher einen Gegenstand höchstens unter dem Sehwinkel deutlich sehen, der sich aus der wirklichen Größe des Gegenstandes und der kürzesten deutlichen Sehweite (ca. 25 cm) ergibt.

b) Sehr weit entfernte Gegenstände erscheinen oft unter einem Winkel, der kleiner ist als 1 Winkelminute. Ein Strahlenbüschel, das eine Öffnung von 1 Winkelminute besitzt, trifft nur ein Stäbchen oder Zäpfchen der Netzhaut. Soll der Gegenstand nicht punktförmig sondern ausgedehnt gesehen werden, so müssen gleichzeitig mehrere Stäbchen der Netzhaut von den vom Gegenstand ausgehenden Strahlen getroffen werden. Der Sehwinkel von 1 Winkelminute bildet daher die untere Grenze für das Unterscheidungsvermögen des Auges.

Die optischen Instrumente dienen nun dazu, teils die eine, teils die andere Grenze für die Leistungsfähigkeit des Auges zu erweitern. Dies kann bei Gegenständen, deren Entfernung von uns willkürlich geändert werden kann, in anderer Weise geschehen als bei Gegenständen, deren Entfernung unverändert bleiben muß. Instrumente, die gestatten, den Gegenstand an das Auge näher heranzubringen als in die Entfernung der deutlichen Sehweite (25 cm), heißen Instrumente zur optischen Vergrößerung. Instrumente zur Vergrößerung des Sehwinkels für sehr entfernte Gegenstände sind die Fernrohre.

2. Die Lupe. Ein Gegenstand, der etwa 4 bis 5 cm von dem Auge entfernt ist, erscheint dem Auge undeutlich. Schaltet man zwischen ihn und das Auge eine Sammellinse von 5 cm Brennweite, so sieht das Auge den Gegenstand in derselben Größe, die dem Sehwinkel bei 4 bis 5 cm Entfernung entspricht, aber in allen Teilen als deutliches Bild. Verglichen mit der Größe des Bildes, das im unbewaffneten Auge entstünde, wenn der Gegenstand sich in der deutlichen Sehweite befände, ist dieses Bild etwa fünfmal so groß. Wir sagen daher, durch die Sammellinse werde in diesem Falle der Gegenstand vergrößert, und nennen eine so verwendete Sammellinse ein Vergrößerungsglas oder eine Lupe.

Die Lupe hat also den Zweck, einen nahe vor das Auge gebrachten Gegenstand deutlich sichtbar zu machen. Vergrößert erscheint er, weil er näher dem Auge ist, als es ohne Linse möglich wäre. Deutlich erscheint er, weil die Sammellinse von dem Gegenstand ein virtuelles aufrechtes Bild entwirft, das etwa in deutlicher Sehweite auf derselben Seite der Linse wie der Sehwinkel liegt.

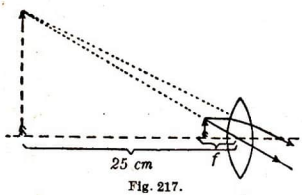


Fig. 217.

Befindet sich nämlich der Gegenstand zwischen dem Brennpunkt und der Linse, so verlaufen die Lichtstrahlen nach dem Durchgang durch die Linse so, als ob sie von dem virtuellen Bilde (Fig. 217) herkämen. Dieses liegt in 25 cm Entfernung von dem Auge bzw. der Linse, wenn die Stellung der Linse so gewählt ist, daß es möglichst groß und deutlich erscheint. Nach dem Linsengesetze muß sich der Gegenstand dann sehr dicht bei dem Brennpunkt befinden.

Ist die Bildweite = 25 cm, und ist die Gegenstandsweite annähernd gleich der Brennweite der Linse, so beträgt die Vergrößerung der Lupe, wie sich aus Fig. 219 ohne weiteres ergibt:

$$\text{Vergrößerung} = \frac{\text{deutliche Sehweite}}{\text{Brennweite}} = \frac{25}{f}.$$

3. Das Mikroskop. Die Lupe ist praktisch nur für Annäherungen zu verwenden, die bei einigen Zentimetern vom Auge ihre Grenze finden. Noch stärkere Annäherung an den Gegenstand gestattet das Mikroskop.

Das Mikroskop besteht zunächst aus einer Sammellinse *Ob*, die eine sehr kleine Brennweite besitzt, und dicht an den Gegenstand *g* herangebracht wird. Liegt der Gegenstand für sie zwischen der einfachen und doppelten Brennweite, so entwirft die Sammellinse von ihm ein vergrößertes, reelles, umgekehrtes Bild *b'*. Man wählt die Stellung von Linse und Gegenstand so, daß dieses Bild etwa 10 bis 15 cm von der Linse entfernt entsteht. Beträgt die Gegenstandsweite etwa 1 cm und die Bildweite damit 15 cm, so ist das Bild 15mal so groß.

Stellt man eine zweite Sammellinse *Ok* so auf, daß das reelle Bild *b'* der ersten Linse für sie in einer Entfernung liegt, die etwas geringer als die Brennweite ist, so wirkt die zweite Linse wie eine Lupe gegenüber dem reellen Bild. Ist die Brennweite der zweiten Linse 4 cm groß, so erfolgt eine nochmalige Vergrößerung des Bildes um etwa das Sechsfache. Im ganzen erscheint das Bild *b''* 90mal so groß wie der Gegenstand. Dies würde der Leistung einer Lupe entsprechen, bei der der Gegenstand nur wenige Millimeter von der Lupe entfernt ist.

Mit dem Mikroskop kann man 1000—2000fache Vergrößerungen bestenfalls erreichen.

Die beiden Linsen des Mikroskopes sind in einer Messingröhre, dem Tubus, eingesetzt. Die Linse, die dem Gegenstand gegenübersteht, heißt das Objektiv. Sie hat eine sehr kleine Brennweite und besitzt deshalb auch nur einen kleinen Durchmesser. Damit sie ein Bild ohne Fehler entwirft, ist sie wie das Objektiv eines guten photographischen Apparates aus einer Anzahl Linsen aus verschiedenen Glassorten und Formen zusammengesetzt. Die Linse, die dem Auge gegenübersteht, heißt Okular. Sie hat eine Brennweite von einigen Zentimetern und ist entsprechend größer. Auch das Okular ist aus mehreren (meist 2) Linsen zusammengesetzt. Fig. 218 gibt den Verlauf der Strahlen für das Mikroskop an.

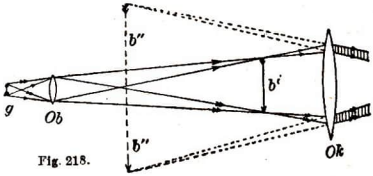


Fig. 218.

Bei der Lupe werden die Gegenstände im auffallenden Lichte betrachtet. Beim Mikroskop kann man dagegen die Gegenstände nur im durchfallenden Lichte sehen. Von undurchsichtigen Körpern werden daher dünne durchsichtige Schnitte hergestellt. Durch einen Spiegel werden sie von unten so beleuchtet, daß das Licht durch sie hindurch in das Objektiv des Mikroskopes tritt.

§ 89. Die Fernrohre

Bei der Lupe und dem Mikroskop konnte der Sehwinkel dadurch vergrößert werden, daß man die Gegenstände nahe an das Instrument und damit an das Auge heranbrachte. Ist dies nicht möglich, und das ist meist bei sehr entfernten Gegenständen der Fall, so kann man an Stelle des Gegenstandes, den man dem Auge nicht nähern kann, das Bild, das man durch eine Sammellinse

von dem Gegenstand entwirft, dem Auge beliebig nahe bringen. Optische Instrumente, die in dieser Weise wirken, heißen Fernrohre.

Zweierlei haben die Linsen eines Fernrohres zu leisten:

a) Sie müssen ein Bild von dem entfernten Gegenstand entwerfen. Das geschieht stets durch eine Sammellinse. Sie entwirft von einem sehr weit entfernten Gegenstand ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild nahezu im Brennpunkt der Linse. Der Sehwinkel, unter dem der Gegenstand von der Linse aus erscheint, und der Sehwinkel, unter dem das Bild von der Linse aus erscheint, ist genau derselbe.

b) Der Sehwinkel, unter dem der Gegenstand dem Auge erscheint, soll vergrößert werden. Dies kann auch dadurch geschehen, daß wir den Sehwinkel, unter dem das reelle Bild zu sehen ist, vergrößern. Bringen wir das Auge näher an das Bild heran, als die Objektivlinse von ihm entfernt ist, so muß der Sehwinkel größer werden. Das reelle Bild wird damit zum Gegenstand, der unter Benutzung von Linsen beliebig genähert werden kann. Die zweite Wirkung der Linsen des Fernrohrs ist also eine Vergrößerungswirkung wie bei der Lupe.

1. Das Keplersche Fernrohr. Das Objektiv besteht aus einer Sammellinse mit großer Brennweite F. Es entwirft ein reelles, umgekehrtes Bild b' in der Nähe des Brennpunktes. Das Okular besteht aus einer Sammellinse mit kleiner Brennweite f. Sie wird als Lupe benutzt und so aufgestellt, daß das reelle Bild der ersten Linse zwischen ihren Brennpunkt und die Linse selbst zu liegen kommt. Dann erscheint das reelle Bild b' von dem Objektiv aus in der Entfernung F, vom Okular aus in der Entfernung f. Die Sehwinkel müssen sich daher annähernd zueinander wie die beiden Brennweiten verhalten. Wir können sagen:

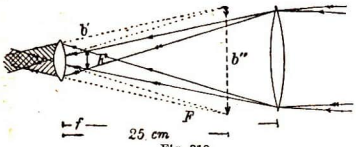


Fig. 219.

Die Vergrößerung, die durch das Keplersche Fernrohr erreicht wird, ist gleich dem Verhältnis der Brennweiten von Objektiv und Okular.

Ein Nachteil des Keplerschen Fernrohrs besteht darin, daß das Bild b'' umgekehrt ist.

Die Länge des Fernrohrs ist gleich der Summe der Brennweiten. Fig. 219 gibt den Strahlenverlauf wieder.

2. Das Holländische Fernrohr. Das Objektiv besteht aus einer Sammellinse mit einer größeren Brennweite. Es entwirft ein reelles, umgekehrtes Bild b' nahezu im Brennpunkt der Linse. Schaltet man in den Strahlengang zwischen Linse und Bild eine Zerstreuungslinse mit kleiner Brennweite so ein, daß sie etwa um Brennweitenentfernung von dem Bild b' entfernt ist, so kommt das Bild gar nicht zustande. Die Strahlen werden durch die Zerstreuungslinse abgelenkt, so daß ein virtuelles Bild b'' entsteht, das aufrecht ist. Auch hier tritt eine Vergrößerung ein, die dem Verhältnis der Objektiv- zur Okularbrennweite entspricht, denn dasselbe Bild b' erscheint von der Sammellinse im Abstand F, von der Zerstreuungslinse im Abstand f.

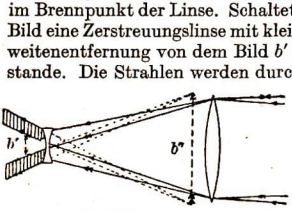


Fig. 220.

Die Länge des Fernrohrs ist gleich der Differenz der Brennweiten. Fig. 220 gibt den Verlauf der Strahlen wieder.

Ein Vorzug des Fernrohrs besteht darin, daß es aufrechte Bilder liefert.

3. Das Prismenfernrohr. Schaltet man zwischen die beiden Sammellinsen des Keplerschen Fernrohrs zwei rechtwinklige Prismen aus Glas, die so aufgestellt sind, wie dies Fig. 221 andeutet, dann wird durch das obere linke Prisma der Strahlenverlauf so geändert, daß oben und unten im Bilde vertauscht werden, durch das rechte untere Prisma bewirkt, daß rechts und links im Bilde vertauscht werden. Denn stets treffen die Lichtstrahlen im Glasprisma unter Winkeln auf die Kathetenflächen des Prismas, die größer sind als 42°. Alle Strahlen müssen also total reflektiert werden. Die Prismen wirken daher wie je zwei unter rechten Winkeln aufgestellte Spiegel und kehren das Bild um. Da das Licht vollständig reflektiert wird, tritt kein erheblicher Verlust an Helligkeit durch die Reflexion ein.

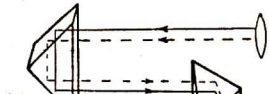


Fig. 221.

Der Vorzug des Prismenglases ist zunächst der, daß ein aufrechtes Bild entsteht. Gegenüber dem Keplerschen Fernrohr besitzt es den weiteren Vorteil, daß seine Länge wesentlich geringer ist.

4. Das Spiegelteleskop. Auch durch einen Hohlspiegel läßt sich von einem sehr weit entfernten Gegenstand ein reelles, verkleinertes, umgekehrtes Bild in der Nähe des Brennpunktes des Spiegels hervorrufen. Betrachtet man dieses Bild durch eine Sammellinse, so erhält man ebenfalls ein vergrößertes Bild des Gegenstandes. Die Einrichtung entspricht dem Fernrohr.

Solche Spiegelteleskope werden vielfach für astronomische Zwecke verwandt. Es ist technisch sehr schwierig, große einwandfreie Linsen herzustellen, verhältnismäßig leicht aber Spiegel von bedeutender Größe anzufertigen. Außerdem zeigen Spiegel keine chromatische Abweichung.

5. Die Verwendung der Fernrohre. Das Keplersche Fernrohr und das Spiegelteleskop dienen astronomischen oder wissenschaftlichen Zwecken.

Das holländische Fernrohr wird vielfach als Opernglas benutzt, weil es infolge seiner geringen Länge sehr handlich ist. Es ist aber in bezug auf Helligkeit des Bildes und auf die Größe des gleichzeitig übersehenen Raumes dem Keplerschen Fernrohr unterlegen. Als Erdbeobachtungsinstrument ist daher das Prismenfernrohr am geeignetsten.

§ 90. Geschichtliche Entwicklung

Von der vergrößernden Wirkung gläserner Kugelsegmente hat zuerst der arabische Gelehrte Alhazen im 11. Jahrhundert n. Chr. berichtet. Er hat auch als erster auf die Bedeutung der Augenlinse für die Entstehung des Bildes im Auge hingewiesen. Die Erfindung der Augengläser wird dem Florentiner Salvino degli Armati zugeschrieben, der im 13. Jahrhundert gelebt haben soll. Sicher ist, daß sich im 14., 15. und 16. Jahrhundert in Italien und besonders in Flandern eine Brillenmacherzunft entwickelt hat, die es zu großer Blüte brachte.

Die Lochkamera ist schon dem Künstler und Gelehrten Leonardo da Vinci um 1500 bekannt gewesen. Die Kamera mit Linse ist zuerst von dem Neapolitaner della Porta im 16. Jahrhundert beschrieben worden.

Im Jahre 1590 hat der Glasschleifer Janson in Holland das Mikroskop ersonnen. Seine Erfindung wurde von dem englischen Physiker Hooke im 17. Jahrhundert verbessert. Damit ist das Mikroskop zu dem Instrument geworden, das für die Entwicklung der Biologie und der Anatomie und überhaupt für die moderne wissenschaftlich betriebene Heilkunde unentbehrlich ist.

Im Jahre 1608 verbreitete sich von Holland aus die Kunde von der Erfindung des Fernrohrs. Es ist ungewiß, wer der eigentliche Erfinder des Fernrohrs war. Es wird erzählt, daß Kinder beim Spielen mit Linsen die vergrößernde Wirkung entdeckt hätten. Mit mehr Recht darf gesagt werden, daß der in Wesel geborene und in Middelburg in Holland lebende Brillenmacher Lippershey offenbar durch Zufall die Wirkung einer Konvex- und einer Konkavlinse in ihrer Zusammensetzung erkannt hat. Er hat ein Patent auf diese Erfindung genommen und hat auf Verlangen des holländischen Staates ein Doppelfernrohr aus Bergkristallinsen 1608 angefertigt. Die Erfindung erregte großes Aufsehen und fand allerorten leicht Nachahmung, weil die Brillenschleiferkunst weit verbreitet war.

Noch in dem gleichen Jahre hörte der italienische Physiker Galilei von der Erfindung des Fernrohrs. Er schuf sich nach der Beschreibung ein Fernrohr aus einer Konvex- und einer Konkavlinse, das eine dreißigfache Vergrößerung zeigte. Mit diesem Instrument machte Galilei in den Jahren 1610 bis 1612 wichtige astronomische Entdeckungen. Er stellte fest, daß der Planet Jupiter 4 Monde besitzt, daß der Planet Venus Lichtphasen wie der Mond zeigt, und daß auf der Sonne dunkle Sonnenflecken entstehen und verschwinden. Er erkannte die Berge auf dem Monde. Die Milchstraße löste sich ihm im Fernrohr in Sternhaufen auf. Unter den Fixsternen fielen ihm Sterne auf, die aus Nebelmassen zu bestehen schienen usw. Diese Entdeckungen erregten in einer Zeit, in der die Frage heftig erörtert wurde, ob sich die Erde um die Sonne oder die Sonne um die Erde bewegte, großes Aufsehen. Sie unterstützten die Meinung derer, die annahmen, die Erde bewege sich um die Sonne. Galileis Entdeckungen und die Erfindung des Fernrohrs wurden in einem Atem genannt. So kam es, daß man heute noch häufig das in Holland erfundene Fernrohr das Galileische Fernrohr nennt.

Um dieselbe Zeit beschäftigte sich der große deutsche Astronom Johann Kepler mit der Konstruktion von Fernrohren und den Wirkungen, die Zusammenstellungen verschiedener Linsen zeigten. Dabei erkannte er, daß auch aus zwei Sammellinsen ein Fernrohr gebildet werden konnte. Er hat zum erstenmal besonders darauf hingewiesen, daß von einem leuchtenden Punkte nicht nur ein einziger Strahl, sondern ein ganzes Strahlenbündel ausgeht, und daß dieses Strahlenbündel durch die Linse in einem Punkte vereinigt werden muß, wenn ein deutliches und scharfes Bild entstehen soll. So hat er den Grund zur modernen Optik gelegt. Das von ihm erfundene Fernrohr ist von dem Jesuitenpater Scheiner einige Jahre später zu erfolgreichen Entdeckungen und Beobachtungen am Sternenhimmel benutzt worden.

Im Jahre 1668 konstruierte der englische Physiker Newton das erste Spiegelteleskop, das wenige Jahre vorher von dem Engländer Gregory beschrieben worden war. Dieses Instrument erwies sich dem Fernrohr in mancher Beziehung

überlegen, weil es keine chromatischen Abweichungen zeigte, und die Bilder deshalb eine stärkere Vergrößerung gestatteten.

Achromatische Linsen sind erst um die Mitte des 18. Jahrhunderts von dem Engländer Dollond hergestellt worden. In Deutschland entstand im 19. Jahrhundert an vielen Orten (Rathenow, Jena, Thüringen) eine blühende optische Industrie. Die erzielten Fortschritte hingen erheblich von der Entwicklung der Glashütten ab, die es allmählich verstanden, Glassorten mit den verschiedensten optischen Eigenschaften herzustellen. Aus den Werken der Firma Zeiß in Jena ging das erste Prismenfernrohr gegen Ende des 19. Jahrhunderts hervor.

Das Lichtspielgerät ist eine Erfindung des Amerikaners Edison.

XVII. Lichtenergie und Farben

§ 91. Licht als Energieform

1. Lichtquellen und Temperatur. Unter einer selbstleuchtenden Lichtquelle verstehen wir einen Körper, der vermöge des physikalischen Zustandes, in dem er sich befindet, Licht aussendet.

In einer nichtleuchtenden Flamme erhitzen wir einen kleinen Körper aus Metall und beobachten, in welcher Weise sich das von dem Körper ausgestrahlte Licht ändert. Die Temperatur, die der Körper in einem bestimmten Stadium besitzt, können wir dadurch annähernd bestimmen, daß wir ihn in eine bestimmte Wassermenge werfen und aus der Temperaturerhöhung des Wassers die Temperatur des Körpers entsprechend dem Verfahren der Wärmelehre berechnen. Es ergibt sich:

Unter 500° sendet ein Körper kein Licht aus. Er reflektiert nur Licht, das auf ihn fällt, und ist im Dunkeln nichtleuchtend.

Zwischen 500° und 600° leuchtet der Körper in dunkelrotem Licht.

Bei 800° bis 900° erscheint uns das Licht, das der Körper ausstrahlt, gelblich.

Bei Temperaturen über 1000° leuchtet der Körper in weißem Lichte, und zwar um so heller, je höher die Temperatur ist.

Lassen wir einen elektrischen Strom durch eine Glühlampe fließen und regeln seine Stärke so, daß zuerst nur ein geringer Strom und dann allmählich ein stärkerer Strom durch die Lampe fließt, dann zeigt sich derselbe Wechsel in der Farbe des ausgestrahlten Lichtes mit steigender Temperatur. Bei allzu großer Steigerung des Stromes schmilzt der Glühdraht durch.

Licht wird von diesen selbstleuchtenden Lichtquellen nur so lange ausgesandt, wie Wärme dem Körper zugeführt wird. Die Farbe des ausgesandten Lichtes ist von der Temperatur des Körpers abhängig.

Das Licht einer Leuchtgasflamme, einer Kerze oder eines unter Flammenbildung brennenden Körpers erscheint weiß, weil sich bei der Verbrennung Kohleteilchen in der Flamme ausscheiden, die ins Glühen geraten. Solche Flammen rußen oft.

Metalldrahtglühlampen zeigen bei normaler Benutzung eine Temperatur von

1800° bis 2500°. Der Glühdraht besteht aus schwer schmelzbaren Metallen: Tantal, Wolfram, Osmium usw.

Das elektrische Bogenlicht strahlt weißes Licht aus, das hauptsächlich von der weißglühenden positiven Lichtkohle ausgeht. Die Temperatur des Lichtbogens beträgt zwischen 3000° und 4000°.

Alle unsere irdischen Lichtquellen mit geringen Ausnahmen strahlen nur dann Licht aus, wenn ihnen Wärme zugeführt wird, und wenn sie die hohe Temperatur besitzen, von der die Farbe des ausgestrahlten Lichtes abhängig ist.

Die Sonne ist eine selbstleuchtende Lichtquelle. Sie besitzt an der Oberfläche eine Temperatur von etwa 6000°.

Die Fixsterne sind selbstleuchtende Lichtquellen, die verschieden heiß sind, und bei denen Oberflächentemperaturen bis zu 12000° vorkommen.

Die Planeten und der Mond senden uns nur reflektiertes Licht.

2. Umwandlung von Lichtenergie. *Lassen wir Lichtstrahlen auf die Schaufeln eines leichtbeweglichen, im luftleeren Raum befindlichen Rädchens fallen, die auf der einen Seite blank, auf der anderen berußt sind, so gerät das Rad in Bewegung.*

Licht kann daher Bewegung hervorrufen.

Ein Körper erscheint hell, wenn er das Licht, das auf ihn fällt, meist reflektiert, dunkel, wenn er das Licht absorbiert.

Lassen wir Lichtstrahlen, z. B. Sonnenlicht, auf einen hellen und einen dunklen Körper gleichzeitig fallen, so zeigt sich, daß sich beide Körper erwärmen, der hellere aber weniger stark als der dunkle.

Licht kann daher auch Erwärmung bewirken.

Wenn Licht nur unter Aufwand von Energie erzeugbar ist, und wenn es benutzt werden kann, um Energie zu erzeugen, dann liegt die Annahme nahe:

|| Licht ist eine Form der Energie.

§ 92. Ausbreitung der Lichtenergie

1. Der Lichtstrom. Von einer punktförmigen Lichtquelle strömt die Lichtenergie im homogenen Medium gleichmäßig nach allen Seiten. Man spricht daher von dem Lichtstrom.

Die in einem bestimmten Winkelraum ausströmende Lichtenergie heißt die Lichtstärke der Lichtquelle.

Den auf 1 cm² fallenden Lichtstrom nennt man die Beleuchtung der getroffenen Fläche.

Fig. 222.

Lassen wir von einer Lichtquelle paralleles Licht auf eine ebene Fläche fallen, so erkennen wir:

Die Beleuchtung dieser Fläche ist abhängig von der Neigung der Fläche gegen die Lichtstrahlen. Fallen die Strahlen senkrecht auf die Fläche auf, so ist die Beleuchtung am größten, fallen die Strahlen schräg auf, so ist die Beleuchtung um so geringer, je größer der Einfallswinkel bzw. je kleiner der Neigungswinkel der Strahlen gegen die Fläche ist (Fig. 222).

Die Beleuchtung dieser Fläche ist ferner abhängig von der Entfernung der Lichtquelle. Eine einfache Überlegung ergibt uns das Gesetz der Abhängigkeit. Das Licht breitet sich nach allen Seiten gleichmäßig aus. Denken wir uns die Lichtquelle im Mittelpunkt einer Kugel, so trifft auf 1 cm² der Oberfläche einer Kugel von 1 m Radius viermal so viel Licht wie auf 1 cm² der Kugelfläche von 2 m Radius und neunmal so viel wie auf 1 cm² einer Kugelfläche von 3 m Radius usw. Die Beleuchtung nimmt also in demselben Maße ab, wie die Quadrate der Kugelradien zunehmen (Fig. 223). Wir sagen daher:

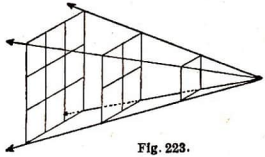


Fig. 223.

Die Beleuchtung, die eine Lichtquelle auf einer Fläche hervorruft, nimmt im Quadrat der Entfernung ab.

$$\boxed{B_1 : B_2 = r_2^2 ; r_1^2}.$$

2. Lichtstärke und Beleuchtungsstärke. Zur Messung der Lichtstärke und Beleuchtungsstärke benutzt man gewöhnlich praktische Maße:

Das praktische Maß der Lichtstärke ist in Deutschland die Hefnerkerze (HK, auch kurzweg Kerze K). Seit kurzem ist als internationale Einheit die Neue Kerze (NK) eingeführt: 0,92 NK = 1 HK.

Die HK wird von einer Lampe ausgestrahlt, die mit Amylazetat gespeist wird und mit 40 mm Flammenhöhe brennt.

In diesem Maße gemessen kommen unseren Lichtquellen folgende Lichtstärken zu: Glühlampen zur Zimmerbeleuchtung besitzen zwischen 16 und 100 Kerzen Lichtstärke. Es gibt kleine Glühlampen, die nur 5 Kerzen stark sind, und große Lampen, die mehrere Tausend Kerzen Lichtstärke ausstrahlen. Gasglühlicht ist in der gewöhnlichen Form etwa 100 Kerzen stark. Eine Petroleumlampe besitzt etwa 16 Kerzen Lichtstärke. Bogenlampen und Projektionslampen haben mehrere Tausend Kerzen Lichtstärke.

Das praktische Maß der Beleuchtungsstärke ist die Meterkerze (1 Lux). Sie wird auf einer Fläche hervorgerufen, die von 1 Hefnerkerze in 1 m Abstand senkrecht bestrahlt wird.

Lichtquellen, die in derselben Entfernung auf derselben Fläche dieselbe Beleuchtung hervorrufen, sind gleich stark. Eine Lichtquelle, die dieselbe Beleuchtung auf einer Fläche hervorruft wie eine andere, trotzdem sie doppelt so weit wie diese von ihr entfernt ist, ist viermal so stark wie diese. Geschieht dies in der dreifachen Entfernung, so ist sie neunmal so stark.

Zwei Lichtquellen, die in der Entfernung r_1 und r_2 dieselbe Beleuchtung auf einer Fläche hervorrufen, verhalten sich in ihren Lichtstärken L_1 und L_2 wie die Quadrate der Abstände r_1 und r_2.

$$\boxed{L_1 : L_2 = r_1^2 : r_2^2}.$$

3. Die Photometer. Apparate zum Messen und Vergleichen von Lichtquellen heißen Photometer. Bei allen Photometern werden die Lichtquellen so lange in

ihrer Stellung zu einer beleuchteten Fläche geändert, bis diese gleich stark von beiden Lichtquellen beleuchtet erscheint. Es ist aber schwer zu erkennen, ob eine Fläche ebenso stark beleuchtet ist wie eine andere. Daher bedient man sich bei den Photometern meist besonderer Hilfsmittel.

a) Das Schattenphotometer. Vor einer weißen Fläche steht ein Stab, von dem durch jede Lichtquelle ein Schatten auf die Fläche geworfen wird. Die Beleuchtungsstärke der beiden Lichtquellen ist gleich groß auf der Fläche, wenn die beiden Schatten gleich dunkel sind. Unterschiede in der Stärke des Schattens sind leicht zu erkennen (Fig. 224).

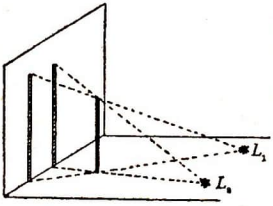


Fig. 224.

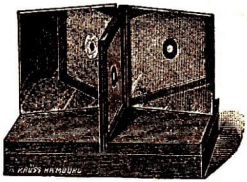


Fig. 225.

b) Das Fettfleckphotometer. Ein auf weißem Papier angebrachter Fettfleck erscheint im durchfallenden Lichte heller, im reflektierten Lichte dunkler als das weiße Papier. Stehen die Lichtquellen zu beiden Seiten des Papiers, und sind sie von ihm so weit entfernt, daß sie die gleiche Beleuchtungsstärke auf dem Papier hervorrufen, so wird der Fettfleck sich nur wenig von dem Papier abheben und gleich hell wie das Papier erscheinen. Denn wenn die Beleuchtung auf beiden Seiten gleich ist, dann ist es einerlei, ob an einer Stelle viel Licht reflektiert und wenig durchgelassen wird oder umgekehrt, insgesamt wird auf jeder Seite an jeder Stelle gleich viel Licht von der Fläche ausgehen (Fig. 225).

Zwei zum Fettfleckschirm schrägstehende Spiegel gestatten die beiden Seiten des Schirmes gleichzeitig zu beobachten.

§ 93. Spektralfarben

1. Das Spektrum. *Stellen wir in den Strahlengang einer weißleuchtenden Lichtquelle einen Schirm mit einem Spalt, und entwerfen wir durch eine Linse von diesem Spalte ein Bild auf einem weißen Schirm, so ist dieses Bild B weiß wie der beleuchtete Spalt. Stellen wir aber zwischen Linse und Spalt ein optisches Prisma in den Strahlengang, so entsteht an Stelle des schmalen Spaltbildes ein breites farbiges Band RV* (Fig. 226).

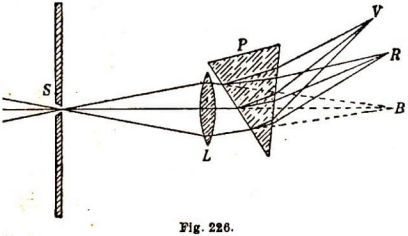


Fig. 226.

Dieses Spaltbild nennen wir Spektrum.

In dem Spektrum gehen

die Farben ohne scharfe Grenze allmählich ineinander über. Immerhin können wir folgende Hauptfarben unterscheiden:

Rot, orange, gelb, grün, blau, indigo und violett.

Schalten wir in den Strahlengang eine farbige Scheibe so ein, daß nur Licht einer bestimmten Farbe vorhanden ist, so zeigt sich:

Rotes Licht wird durch das Prisma am wenigsten, blaues und violettes Licht am stärksten abgelenkt.

Ersetzen wir den Schirm, auf dem das Spektrum entsteht, durch einen Schirm, der einen Spalt besitzt, durch den das rote Licht des Spektrums z. B. hindurchtreten kann, und versuchen wir dieses rote Licht wieder durch ein Prisma in Farben zu zerlegen, so ergibt sich:

Nur weißes Licht wird in ein Spektrum zerlegt. Die einzelne Farbe des Spektrums, die wir Spektralfarbe nennen, wird nicht mehr in andere Farben zerlegt.

|| Spektralfarben sind einheitliches Licht.

2. Komplementärfarben. *Stellen wir in den Strahlengang an geeigneter Stelle eine Zylinderlinse, dann können die verschieden abgelenkten farbigen Strahlen so vereinigt werden, daß wieder ein weißes Spaltbild hervortritt. Daraus ergibt sich:*

Das weiße Licht ist aus Spektralfarben zusammengesetzt. Aus der Vereinigung aller Spektralfarben gewinnt man weißes Licht.

Lenken wir aus dem Spektrum, das auf die Zylinderlinse fällt, eine Farbe durch ein schmales Prisma ab, so zeigt sich an der Stelle des weißen Spaltbildes ein farbiges Spaltbild und zwar:

Wird rot abgelenkt, so ist der Rest der Spektralfarben zusammen grün,
„ gelb „ „ „ „ „ „ „ „ blau,
„ grün „ „ „ „ „ „ „ „ rot,
„ blau „ „ „ „ „ „ „ „ gelb.

Die zuerst genannten Farben sind Spektralfarben. Die zuletzt genannten Farben sind Farbenmischungen. Es ergibt sich also:

|| Farbiges Licht kann einheitlich sein, dann ist es durch ein Prisma nicht in ein Band zerlegbar. Solche Farben heißen Spektralfarben.

|| Farbiges Licht kann aus einem Gemisch verschiedener Farben bestehen, dann liefert es ein Spektrum, in dem die eine oder andere Farbe fehlt. Solche Farben heißen Mischfarben.

Weiß ist eine Mischfarbe aus allen Spektralfarben.

Die Farben rot und grün, gelb und blau, die immer wechselseitig auftreten, wenn eine dieser Farben aus dem Spektrum entfernt wird, heißen Komplementärfarben.

Komplementärfarben ergänzen sich zu weißem Licht.

3. Das Spektrum glühender Metalldämpfe. *Entwirft man von einer Flamme des Bunsenbrenners, in der ein Metallsalz verdampft wird, ein Spektrum, so zeigt sich nicht ein ineinander übergehendes Band aller Farben, sondern es treten einzelne scharf abgegrenzte Spaltbilder verschiedener Farbe auf.*

Natriumdampf zeigt nur eine gelbe Linie, Kaliumdampf mehrere Linien, teils in Rot, teils in Violett usw.

Spektren glühender Gase und Dämpfe bestehen aus einzelnen Spektrallinien. Sie sind nicht zusammenhängend und heißen deshalb Linienspektren.

Spektren glühender fester Körper sind zusammenhängend und liefern ein zusammenhängendes Farbenband oder ein kontinuierliches Spektrum.

4. Das Sonnenspektrum. *Entwirft man ein Spektrum vom Lichte der Sonne, so entsteht ein kontinuierliches Spektrum, das von feinen schwarzen Linien durchzogen ist, die unregelmäßig über das Spektrum verteilt sind* (Fig. 227).

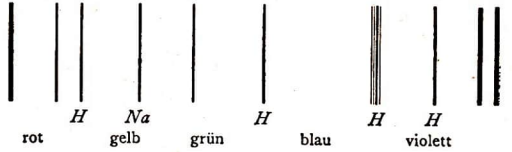


Fig. 227.

Diese schwarzen Linien gleichen in ihrer Anordnung den farbigen Linien eines Linienspektrums von Gasen.

Ein Versuch zeigt, daß weißes Licht, das durch leuchtenden Metalldampf, z. B. Natriumdampf, fällt, bei dem Durchgang in seiner Farbenzusammensetzung gerade die Farbe des Natriumdampfes verliert. In dem Spektrum, das man entwirft, tritt im Gelben eine schwarze Linie auf.

Findet sich also im Sonnenspektrum im Gelben ebenfalls eine schwarze Linie, so kann sie in der Weise entstanden gedacht werden, daß das Sonnenlicht in der Sonnenatmosphäre durch Natriumdämpfe hindurchdringen mußte, und daß dabei die gelbe Farbe des Natriumdampfes absorbiert worden ist.

Ähnlich ist es mit anderen Linien. Wir führen ihren Ursprung aus Absorption durch Dämpfe zurück und schließen daraus auf das Vorhandensein der Stoffe auf der Sonne. Wir nennen die schwarzen Linien im Sonnenspektrum Fraunhofersche Linien.

Das Sonnenspektrum ist ein Absorptionsspektrum.

Auch in den Spektren der Fixsterne treten Absorptionslinien auf. Sie sind nicht genau dieselben wie die Linien des Sonnenspektrums. Auch sie vermitteln uns Aufschlüsse über die Stoffe auf diesen Himmelskörpern.

Die Wissenschaft, die mit Hilfe der Zerlegung des Lichtes in Spektrallinien Stoffe untersucht, heißt Spektralanalyse.

5. Chemische Wirksamkeit des Lichtes. Das Licht des Spektrums zeigt hinsichtlich seiner chemischen Wirkung in den einzelnen Farben ganz verschiedene

Wirkungen. Die photographische Platte kann dem roten Lichte längere Zeit ausgesetzt sein, ohne daß eine Veränderung der wirksamen Schicht eintritt. Im blauen und violetten Licht wird die Platte sehr schnell angegriffen. Rotes Licht wird daher zur Beleuchtung der photographischen Dunkelkammer benutzt.

§ 94. Die Körperfarben

1. Durchsichtige und undurchsichtige helle und dunkle Körper. Im luftleeren Raum breitet sich das Licht ungehemmt aus. In gasförmigen, flüssigen und festen Körpern wird ein Teil des Lichtes beim Durchgang durch den Körper aufgehalten, auch wenn der Körper durchsichtig ist. Dies erkennen wir z. B. daran, daß eine Glasplatte in einem Lichtkegel einen Schatten wirft. Je größer der Teil des Lichtes ist, der von dem Körper verschluckt oder absorbiert wird, desto weniger durchsichtig ist er. Undurchsichtige Körper absorbieren alles Licht, das in den Körper eindringt

Alle Körper reflektieren einen Teil des auf sie treffenden Lichtes, andernfalls würden wir sie nicht sehen können Der Teil des Lichtes, der nicht reflektiert wird, wird von dem Körper absorbiert oder durchgelassen. Der Körper erscheint hell, wenn sehr viel Licht von ihm reflektiert wird und wenig in ihn eindringt, dunkle, wenn es umgekehrt ist. Daraus geht hervor:

Sowohl im durchfallenden Lichte als auch im reflektierten Lichte erscheinen die Körper, die wir sehen, in dem Lichte, das von dem auf die Körper treffenden Lichte übrig bleibt.

2. Farbige Körper. Die Farbe, in der ein Körper demnach erscheint, hängt im wesentlichen davon ab, in welcher Auswahl das auftreffende Licht von dem Körper absorbiert wird.

Halten wir eine rote Glasscheibe in den Strahlengang einer weißen Lichtquelle und beobachten wir die dadurch hervorgerufenen Veränderungen des Spektrums, so erkennen wir, daß die rote Scheibe alle anderen Farben außer rot absorbiert. Halten wir die Scheibe an die Stelle, wo das Spektrum entsteht, so finden wir, daß die Scheibe nur im roten Teil des Spektrums leuchtet, in den übrigen Teilen aber dunkel ist.

Rot wäre uns auch eine Glasscheibe erschienen, die nur das grüne Licht absorbiert hätte. Im ersteren Falle wäre die rote Farbe der Scheibe eine Spektralfarbe, im letzteren eine Mischfarbe gewesen.

Im allgemeinen läßt sich sowohl für reflektiertes als auch für durchgelassenes Licht sagen:

Erscheint ein Körper in einer bestimmten Farbe, so absorbiert er diese Farbe am wenigsten, und die Farben, die die Komplementärfarbe bilden, am meisten.

Ein Körper erscheint weiß, wenn alle Farben des Spektrums gleichmäßig und nur in geringem Grade absorbiert werden.

Ein Körper erscheint schwarz, wenn alle Farben gleichmäßig und sehr stark absorbiert werden.

3. Farbstoffe und rotierende Farbentafel. Wir haben oben gesehen, daß aus zwei komplementären Farben weißes Licht zusammengesetzt werden kann. Läßt man eine Scheibe rotieren, auf der zwei Komplementärfarben angebracht sind, so erscheint die Scheibe hell ohne bestimmten Farbenton. Mischt man aber z. B. blauen und gelben Farbstoff, so erhält man eine Farbe, die nicht hell ohne besonderen Farbenton, sondern ausgesprochen grün ist.

Die Erklärung besteht darin: Körperfarben, die wir im Farbstoff mischen, sind Restfarben, d. h. Farben, die nach der Absportion im Körper für die Reflexion übrig geblieben sind. Beim blauen Farbstoff werden besonders die Farben rot, orange, gelb und violett absorbiert, beim gelben Farbstoff die Farben blau, violett und rot. Der gelbe Farbstoff kommt in seiner ganzen Leuchtkraft nicht zur Geltung, weil ihm der blaue Farbstoff entgegenwirkt, und für den blauen gilt dasselbe. Es überwiegt also der Eindruck der in beiden Farbstoffen am wenigsten absorbierten oder geschwächten Farbe, der grünen.

Im Falle des rotierenden Farbenkreisels ist es so: Der gelbe Eindruck des Farbstoffes wirkt unvermindert auf das Auge, ebenso der Eindruck des blauen Farbstoffes. Die Wirkungen treten nebeneinander auf und addieren sich also.

Das Auge selbst ist nur für die Farben rot, gelbgrün und blau empfindlich. Sämtliche Farbenempfindungen unseres Auges sind Kompositionen dieser drei verschiedenen Farbenempfindungen.

4. Der Dreifarbendruck. Farbige Bilder kann man in der Weise herstellen, daß man von einem farbigen Gegenstand ein rotes, ein gelbgrünes und ein blaues Bild herstellt, und zwar derart, daß jedes dieser einfarbigen Bilder nur die Stellen wiedergibt, die in seiner Farbe erscheinen. Druckt man dann die drei einfarbigen Bilder auf denselben Bogen Papier genau übereinander, so erscheint das Bild in seinen natürlichen Farben, denn unser Auge fügt die drei Bilder in den Farben rot, gelbgrün und blau zu einem Bild zusammen und gewinnt die Farbentöne des wirklichen Gegenstandes. Man nennt die so ausgeführte Wiedergabe farbiger Gegenstände den Dreifarbendruck.

5. Fluoreszenz. Es gibt Körper, die im durchfallenden Lichte eine andere Farbe besitzen als im auffallenden Licht, z. B. eine Chlorophyllösung, eine Lösung von Fluoreszein usw. Man nennt sie fluoreszierende Körper. Bei diesen Körpern handelt es sich darum, daß sie vom Lichte getroffen eigenes Licht ausstrahlen. Hier haben wir es mit Licht zu tun, das nicht von Körpern hoher Temperatur ausgestrahlt wird.

§ 95. Optische Erscheinungen in der Atmosphäre

Das Tageslicht läßt uns alle Gegenstände erkennen, auch wenn sie nicht direkt von Sonnenstrahlen getroffen sind. Es besteht in der Hauptsache aus Licht, das von der Luft, den in der Luft schwebenden Wasserteilchen und den Gegenständen an der Erdoberfläche reflektiert wird.

Als Dämmerung bezeichnen wir den Zwischenzustand zwischen Tag und Nacht, bei dem die Sonne schon unter dem Horizont steht, aber noch die höheren Luftschichten beleuchtet. Aus diesen Teilen der Luft gelangt dann das Dämme-

rungslicht durch Reflexion auf die Erdoberfläche. Die Dämmerung ist am Äquator kurz, im Norden und Süden langdauernd.

Der Himmel erscheint in blauer Farbe, weil das blaue Licht der Sonne beim Durchgang durch die Atmosphäre stärker nach allen Seiten zerstreut wird als das rote, das damit in der direkten Strahlung stärker zu finden ist. Steht die Sonne tief am Horizont, so muß ihr Licht dickere Luftschichten als bei hohem Sonnenstand durchdringen. Sie erscheint dann häufig rotgelb.

Aus dem Flimmern heißer aufsteigender Luft über Kaminen oder heißen Sandflächen kann man erkennen, daß die Luft die Sonnenstrahlen auch in ihrer geradlinigen Ausbreitung beeinflußt. Beim Übergang aus einer kalten in eine warme Luftschicht wird der Lichtstrahl gebrochen. Es entstehen dadurch in Gegenden, in denen häufig ungleich warme Luftschichten übereinanderliegen, Luftspiegelungen und Strahlenbrechungen. An der Küste erscheinen weit entfernte Gegenstände mitunter höher gehoben, als man sie normalerweise sieht. Man nennt diese Erscheinung Kimmung. Umgekehrte Spiegelbilder erscheinen am Himmel von entfernten Gegenden, wenn an der Erdoberfläche eine warme und darüber eine kalte Luftschicht ruht.

Auch die Strahlen der Gestirne werden gebrochen, wenn sie durch die Luft schräg auf die Erdoberfläche fallen. Wir sehen also die Gestirne nie in der Richtung, in der sie wirklich stehen.

Der Regenbogen entsteht dann, wenn sich in der Luft eine Wolke in Regentropfen auflöst und von der Sonne beschienen wird. Man sieht am Himmel ein Farbenband, in dem von oben nach unten die Farben rot, orange bis violett erscheinen, und einen sogenannten Nebenregenbogen, der über dem Hauptregenbogen steht und bei dem die Farbenfolge von oben nach unten umgekehrt ist. Die Erscheinung zeigt sich dann, wenn man die Sonne im Rücken und die Wolke vor sich hat.

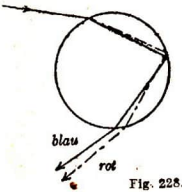


Fig. 228.

Lassen wir einen Lichtstrahl in ein zylindrisches Gefäß mit Wasser fallen, daß er so gebrochen und reflektiert wird, wie dies Fig. 228 *angibt, dann findet dabei auch eine Zerlegung in Farben statt. Aus dem Gefäß treten unter verschiedenen Winkeln rote und blaue Strahlen aus. Ist der Strahlenverlauf so, wie es* Fig. 229 *angibt, dann wird im Inneren des Gefäßes der Strahl zweimal reflektiert, aber ebenfalls in Farben zerlegt. Die roten Strahlen sind wieder am wenigsten, die blauen am meisten abgelenkt, der Strahlengang im Gefäß ist aber umgekehrt gerichtet.* (*Bei bestimmter Ablenkung sind die Farben besonders deutlich.*)

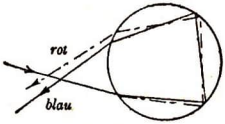


Fig. 229.

Nehmen wir an, in der Wolke von Wassertropfen werde in jedem Tropfen das Licht der Sonne wie beim Versuch gebrochen, dann wird bei der einmaligen Reflexion im Inneren des Tropfens der rote Teil des Lichtstrahls weniger abgelenkt und daher unter einem steileren Winkel zur Erde geschickt als der blaue. Der Winkel zwischen den parallel einfallenden Sonnenstrahlen und den von vielen Tropfen parallel abgelenkten Strahlen beträgt (bei größter Farbenwirkung) für rot etwa 42°, für blau etwa 40°. Blickt das Auge bei tiefstehender

Sonne also um 40° in die Höhe, so muß ihm die Wolke dort blau erscheinen, weil vor allem blaue Strahlen unter diesem Winkel eintreffen. Blickt es unter 42°, so muß es nur rote Strahlen an diesem Teil der Wolke sehen. Dazwischen erscheinen die anderen Farben. Auch seitlich müssen unter denselben Winkeln die Strahlen gefärbt erscheinen. Daher hat die Erscheinung die Form eines Bogens. Bei hoch stehender Sonne ist der Bogen flach, bei tief stehender Sonne nahezu halbkreisförmig (Fig. 230).

Beim Nebenregenbogen ist es umgekehrt. Dort tritt das rote Licht unter dem Winkel geringster Neigung aus. Er beträgt etwa 50°. Das blaue Licht unter einem steileren Winkel. Daher ist die Farbenfolge dort umgekehrt.

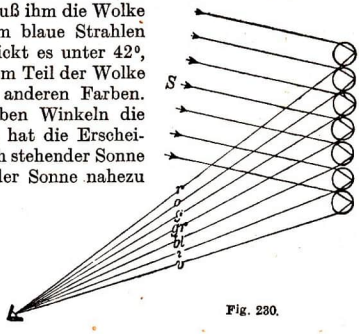


Fig. 230.

§ 96. Geschichtliche Entwicklung

Trotz des Interesses, das der Mensch von jeher den Farben entgegengebracht hat, ist erst spät die Frage nach der physikalischen Natur der Farben gelöst worden. In den Jahren zwischen 1666 und 1704 hat der englische Physiker Isaak Newton umfangreiche Untersuchungen über die Zerlegung des Lichtes durch das Prisma angestellt. Er hat dann die Ansicht vertreten und experimentell begründet, daß weißes Licht aus den Farben des Regenbogens zusammengesetzt sei. Er hat die Körperfarben richtig erklärt und auf den Unterschied zwischen einfachen und zusammengesetzten Farben hingewiesen. Es hat sehr lange gedauert, bis man allgemein diese überraschende Lösung der Farbenlehre anerkannt hat.

Die dunklen Linien in dem Spektrum der Sonne sind zuerst von dem Optiker Joseph Fraunhofer in München entdeckt worden (1814). Sie werden nach ihm die Frauenhoferschen Linien genannt. Fraunhofer hat sie bei seinen Bemühungen, achromatische Linsen anzufertigen, entdeckt.

Die Spektralanalyse ist von den Professoren Kirchhoff und Bunsen im Jahre 1860 begründet worden. Durch dieses Verfahren ist es gelungen, über die Zusammensetzung der Fixsterne Aufschluß zu erhalten, und andererseits ist diese Methode der Untersuchung geeignet, Spuren eines Stoffes dann noch nachzuweisen, wenn andere, chemische Mittel dazu nicht mehr ausreichen.

Die hier beschriebenen Photometer stammen aus dem Anfang und der Mitte des 19. Jahrhunderts.

Das erste Verfahren, Bilder auf Silberplatten zu fixieren, ist von dem Maler Daguerre im Jahre 1822 angegeben worden. Es wurde verdrängt, nachdem der Engländer Talbot im Jahre 1835 einen Weg gefunden hatte, die Bilder auf Papier zu erzeugen. Seitdem hat sich die Photographie sehr rasch entwickelt.

Sie ist in dem wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Leben heute nicht mehr zu entbehren.

Das Verfahren zur Herstellung von Dreifarbenphotographien und Dreifarbendruck stammt erst aus den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts.

XVIII. Elektrische Strahlen

§ 97. Kathoden-, Kanal- und Röntgenstrahlen

1. Entladungen in verdünnten Gasen. *Durch die Wände einer Glasröhre* (Fig. 231), *die mit verdünnter Luft oder einem verdünnten anderen Gas gefüllt ist, sind zwei Metalldrähte in die Röhre geführt, die Elektroden genannt werden. Führen wir den Strom der Sekundärwicklung eines Ruhmkorffschen Induktors an die Elektroden der Röhre, so nehmen wir wahr, daß die Röhre unter eigentümlichen Lichterscheinungen aufleuchtet. Es zeigt sich:*

Fig. 231.

Das Leuchten geht von dem Gase aus. Es ist abhängig von dem Druck, der in der Röhre herrscht. Es bilden sich, wenn der Druck gering ist, zwischen den leuchtenden Gasteilchen dunkle Räume, die um so größer werden, je geringer der Gasdruck ist.

In diesem Falle wird das Aussenden des Lichtes nicht durch Erhitzen des ganzen eingeschlossenen Gases, sondern durch elektrische Vorgänge in den kleinsten Gasteilchen verursacht.

2. Kathodenstrahlen. *Ist die Röhre so stark ausgepumpt, daß der ganze Raum zwischen den Elektroden dunkel geworden ist, dann nehmen wir gegenüber dem negativen Pol der Röhre eine helle Lichterscheinung wahr* (Fig. 232). *Nähere Untersuchung zeigt:*

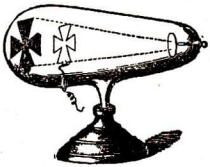


Fig. 232.

Von dem negativen Pol der Röhre gehen geradlinig Strahlen aus, die beim Auftreffen auf die Glaswand das Glas aufleuchten lassen. Geradlinig breiten sich diese Strahlen aus, weil sie einen scharfen Schatten von den Gegenständen werfen, die ihnen im Wege stehen.

Diese Strahlen gehen nicht durch Glas hindurch, dagegen treten sie durch undurchsichtige dünne Aluminiumfolie.

Nähert man den Strahlen einen Magneten, so werden sie nach der Dreifingerregel zur Seite abgelenkt wie ein elektrischer Strom, der entgegen der Richtung der Strahlen fließt.

Wir nennen diese Strahlen Kathodenstrahlen und schließen aus ihrem Verhalten:

Kathodenstrahlen sind von Lichtstrahlen ganz verschieden.

Kathodenstrahlen transportieren negative Elektrizität geradlinig von der Kathode zur Anode der Röhre.

3. Kanalstrahlen. *Wenden wir eine stark ausgepumpte Röhre an* (Fig. 233), *in der die Kathode aus einem Blech besteht, in das ein Schlitz geschnitten ist, so gewahren wir bei Stromdurchgang, daß sich von der Anode durch den Kanal der Kathode hindurch Strahlen bewegen, die ebenfalls geradlinig fortschreiten und magnetisch ablenkbar sind. Wenden wir hier die Dreifingerregel an, so ergibt sich, daß die Stromrichtung mit der Strahlrichtung übereinstimmt. Wir schließen aus diesen Versuchsergebnissen:*

Von der Anode her kommen Strahlen, die wir Kanalstrahlen nennen.

Kanalstrahlen transportieren geradlinig positive Elektrizität zur Kathode.

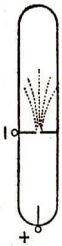


Fig. 233.

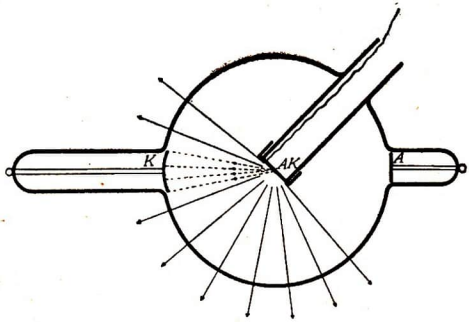


Fig. 234.

4. Röntgenstrahlen. *Wenden wir eine stark ausgepumpte Röhre an* (Fig. 234), *bei der gegenüber der Kathode K ein Blech AK so aufgestellt ist, daß die Kathodenstrahlen auf dieses Blech auftreffen, dann nehmen wir wahr, daß von dem Blech, der sogenannten Antikathode AK, eine Lichterregung ausgeht, die die Röhre gegenüber der Antikathode zum Leuchten bringt.*

Diese Strahlen heißen Röntgenstrahlen.

Die nähere Untersuchung zeigt:

Röntgenstrahlen gehen von der Antikathode aus.
Sie gehen durch die Glaswand der Röhre hindurch.
Sie erregen auf einem fluoreszierenden Schirm Lichterscheinung.
Sie durchdringen undurchsichtige Körper und breiten sich geradlinig aus.
Sie sind photographisch wirksam.
Sie sind magnetisch nicht ablenkbar.

Die Röntgenstrahlen gleichen also in vieler Beziehung dem Lichte. Sie vermögen aber undurchsichtige Körper ohne erhebliche Schwächung zu durchdringen. Sie werden von Blei und Metallen mit großer Dichte stark absorbiert, von Aluminium wenig. Von den Weichteilen des Körpers werden sie weniger stark absorbiert als von den Knochen. Sie liefern, wenn man den Körper mit Röntgenstrahlen durchleuchtet, ein Schattenbild des Knochengerüstes und geben auch feinere Unterschiede im Bau und in der Beschaffenheit des Körpers wieder.

So sind die Röntgenstrahlen ein wichtiges Hilfsmittel für die Heilkunde geworden.

§ 98. Radioaktivität

An Uranerz hat man bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen die Beobachtung gemacht, daß dieses Erz von selbst Strahlen aussendet, die durch lichtdichtes Papier hindurch eine photographische Platte schwärzen können. Man hat dann aus dem Uranerz einen Stoff gewonnen, den man Radium nennt, der diese Eigenschaft in hervorragendem Maße besitzt.

Nähere Untersuchung hat gezeigt, daß die vom Radium ausgesandten Strahlen den drei Arten der Kanal-, Kathoden- und der Röntgenstrahlen gleichen.

Ferner hat sich ergeben, daß die Stoffe, welche solche Strahlen aussenden, außerordentlich zahlreich über die Erde verbreitet sind. Die Intensität der Strahlung ist allerdings meist so gering, daß sie kaum bemerkt wird. Sie ist auffällig groß bei allen Heilquellen, die tief aus dem Boden kommen.

Die Strahlen haben die Eigenschaft, die Luft elektrisch leitend zu machen, wenn sie von ihr absorbiert werden. Es hat sich gezeigt, daß sie auf erkrankte Gewebe unter Umständen große Heilwirkung ausüben.

Man nennt alle Stoffe, die Strahlen dieser Art aussenden, radioaktiv.

§ 99. Geschichtliche Entwicklung

Die Erscheinungen, die bei der elektrischen Entladung in verdünnten Gasen hervorgerufen werden, sind seit den letzten zwei Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts eingehend untersucht worden. Die Röntgenstrahlen wurden von dem Professor Röntgen im Jahre 1895 entdeckt. Seitdem hat sich die Technik dem Ausbau von Röntgenapparaten gewidmet, und die Ärzte haben gelernt, dieses Hilfsmittel immer mehr zu verwenden. Während vor 25 Jahren noch eine Röntgenaufnahme viele Minuten lang dauerte, kann man jetzt Momentaufnahmen mit Röntgenstrahlen machen.

Das Gebiet der Kanal-, Kathoden- und Röntgenstrahlen in Verbindung mit der Radioaktivität ist für die Physik als Wissenschaft von großer Bedeutung geworden. Aus den Erscheinungen, die hier zutage getreten sind, hat man die Überzeugung gewonnen, daß die Atome nicht die kleinsten Teile der Körper sind, sondern daß die Atome wieder aus einer ganzen Anzahl von Körpern bestehen, die sich in bestimmten Bahnen bewegen. Diese kleineren Gebilde heißen Elektronen. Sie bestehen aus den kleinsten Teilen der Elektrizität. Elektronen sehen wir in den Kathodenstrahlen auf die Glaswand aufprallen.

Anhang

I. Verzeichnis geeigneter Schülerübungsversuche

Zu I. 1. Längenmessung mit der Schublehre.
Bestimmung des Volumens einfacher Formen von Ankerbausteinen.

2. Längenmessung mit dem Schraubenmikrometer.
Bestimmung des Durchmessers von Drähten, der Dicke von Blechen, Volumenberechnung.

3. Volumenbestimmung durch den Meßzylinder.
Der Körper wird in den teilweise mit Wasser gefüllten Meßzylinder geworfen und sein Volumen aus der Steighöhe des Wassers bestimmt (in bindung mit 2).

4. Volumenbestimmung mit dem Überlaufgefäß (in Verbindung mit 1).

5. Längenmessung mit dem Spiegelmaßstab.

6. Spezifisches Gewicht fester Körper.
Gewichtsbestimmung mit der Waage, Volumenbestimmung nach Versuch 1—4.

7. Spezifisches Gewicht flüssiger Körper (mit dem Pyknometer).

8. Rohrkalibrierung mit Quecksilber.

9. Bestimmung von π durch Wägung.
Wägung einer kreisförmigen Scheibe von 5 cm Radius und einer quadratischen Scheibe von 5 cm Seitenlänge, die aus demselben Blech oder Karton ausgeschnitten sind.

10. Bestimmung der Mittagslinie mit dem Gnomon.

11. Zeitmessung durch Pendelschwingungen.

12. Verwendung des hundertteiligen Thermometers.

13. Eichung eines Thermometers.

Zu II. 14. Verlängerung eines Drahtes für verschiedene Belastung.

15. Verlängerung eines Drahtes für verschiedene Längen.

16. Verlängerung von Drähten verschiedenen Querschnitts.

17. Senkung des freien Endes eines einseitig eingespannten Stabes in ihrer Abhängigkeit von der Belastung.

18. Dasselbe für verschiedene Längen.

19. Dasselbe für verschiedene Breiten.

20. Dasselbe für verschiedene Höhen.

21. Gewichtsbestimmung mit der Federwaage.

22. Nachprüfung der elastischen Eigenschaften von Gummi.

23. Wärmeausdehnung von Stäben.

24. Relative Wärmeausdehnung von Quecksilber (mit Pyknometer).

25. Spezifisches Gewicht von Flüssigkeiten (mit der kommunizierenden Röhre).

26. Spezifisches Gewicht fester Körper nach dem Archimedischen Prinzip.

27. Spezifisches Gewicht von Flüssigkeiten durch Auftrieb eines Probekörpers.

28. Oberflächenspannung einer Seifenlamelle.

29. Spezifisches Gewicht von Luft (durch Wägung eines Glaskolbens, aus dem ein Teil der Luft ausgesaugt ist).

30. Das Boylesche Gesetz.

31. Das Gay-Lussacsche Gesetz für konstanten Druck.

32. Das Gay-Lussacsche Gesetz für konstantes Volumen.

33. Begriff der Wärmemenge.
Erwärmen von 1 kg Wasser mit dem Bunsenbrenner. Feststellen der Temperatur nach 1, 2, 3 usw. Minuten.
34. Begriff der spezifischen Wärme.
Denselben Versuch für ½ kg Wasser und ½ kg Eisen.
35. Bestimmung der spezifischen Wärme fester Körper nach dem Mischungsverfahren.
36. Bestimmung der Schmelzwärme des Eises.
37. Bestimmung der Verdampfungswärme des Wassers.

Zu III. 38. Das Parallelogramm der Kräfte.
39. Der Satz von der Zerlegung der Kräfte.
40. Das Hebelgesetz oder der Momentensatz.
41. Hangabtrieb und Druckkomponente an der schiefen Ebene.

Zu V. 42. Wärmeleitung in metallenen Stäben.
43. Abhängigkeit des Wärmeverlustes eines erwärmten Körpers von der Temperatur.
44. Die Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalentes.

Zu VIII. 45. Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Pendels von der Amplitude.
46. Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Pendels von der Länge.

Zu IX. 47. Kraftlinienbild eines Magneten.
48. Kraftlinienbild zweier Magnete.
49. Kraftlinienbild mit eingelagertem Eisen.
50. Das magnetische Polgesetz.
51. Nachweis des Molekularmagnetismus (an zerbrochenen magnetischen Stricknadeln).

Zu X. 52. Elektrische Erregung durch Reibung.
53. Positive und negative Elektrizität.
54. Sitz und Verteilung der Ladung.
55. Die Influenz.
56. Die Elektrizität des Reibzeuges.

Zu XI. 57. Elektrolyse der verdünnten Schwefelsäure.
58. Das Kupfervoltameter.
Bestimmung des elektrochemischen Äquivalentes von Kupfer.
59. Der Akkumulator als Stromquelle.
Laden eines Elementes aus Bleiplatten und Entladen über eine kleine Glühlampe. Abhängigkeit von der Ladezeit.
60. Die magnetischen Kraftlinien des Stromes.

Zu XII. 61. Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalentes.

Zu XV. 62. Reflexion an ebenen Spiegeln (Stecknadelversuch).
63. Reflexion am Hohlspiegel (Hohlspiegelgesetz).
64. Die Brechung im Wasser.
Versuch mit drei drehbaren Drähten, die Einfallslot, einfallenden und gebrochenen Lichtstrahl vorstellen.
65. Brechung in Glas (Stecknadelversuch).
66. Ableitung der Linsenformel.
67. Bestimmung der Vergrößerung des Bildes.

Zu XVI. 68. Zusammenstellung eines Galileischen Fernrohrs.
69. Zusammenstellung eines Keplerschen Fernrohrs (mit Fadenkreuz).
70. Zusammenstellung eines terrestrischen Fernrohrs.

Zu XVII. 71. Lichtstärkenbestimmung mit dem Photometer von Rumford.
72. Dasselbe mit dem Photometer von Ritschie.
73. Dasselbe mit dem Fettfleckphotometer.

II. Übungsaufgaben

1. Ein Messingdraht von 251,3 cm Länge nimmt bei Belastung folgende Längen an: für 1 kg 251,75; 2 kg 252,2; 3 kg 252,6; 4 kg 253,05 cm. Wie groß ist die mittlere Ausdehnung für 1 kg Mehrbelastung? Wie groß ist die mittlere Ausdehnung für 1 m Länge und 1 kg Belastung? [$d = 0{,}43$; $d = 0{,}17$ cm

2. Bei der Untersuchung der Senkung des freien Endes eines einseitig eingespannten Stabes wurden an einem vertikalen Maßstab folgende Stellungen des Stabendes festgestellt. Bei Belastung mit 1 kg ging das Stabende aus der Stellung 39,7 cm über in die Stellung 35,2 cm; bei 2 kg in 32,1 cm; bei 3 kg in 29,0; bei 4 kg in 25,5; bei 5 kg in 22,0; bei 6 kg in 19,2 cm. Wie groß ist die durchschnittliche Senkung für 1 kg Mehrbelastung? Stelle die Abhängigkeit der Senkung von der Belastung graphisch dar! [$s = 3{,}5$ cm; $s \sim P$

3. Ein einseitig eingespannter Stab wird bei veränderlicher Länge mit 1 kg am freien Ende belastet. Es ergeben sich folgende Senkungen des freien Endes: bei 100 cm Länge 19,4 cm; bei 90 cm 14,4; bei 80 cm 10,5; bei 70 cm 6,9; bei 60 cm 4,2; bei 50 cm 2,5 cm. Welcher Potenz der Länge sind die Senkungen proportional? [$s \sim l^3$

4. Um wieviel dehnt sich eine Eisenbahnschiene von 12 m Länge aus, wenn sie um 20° C in ihrer Temperatur erhöht wird? Welchen Druck würde sie auf ein Widerlager ausüben, das ihre Ausdehnung verhinderte? Der Querschnitt der Schiene betrage 8000 qmm. Eisen von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt dehnt sich bei 1 kg Belastung um 0,00008 m aus. [8 mm; 24 000 kg

5. Um wieviel verringert sich der Radius eines eisernen Reifens, der bei 420° C einen Durchmesser von 100 cm hat, wenn er sich auf 20° C abkühlt? [2,4 mm

6. Um wieviel cm³ nimmt das Fassungsvermögen eines würfelförmigen Messinggefäßes zu, das bei 20° C genau 1 *l* Inhalt besitzt, wenn es auf 100° C erwärmt wird? Um wieviel ein Glasgefäß in demselben Falle? [4,6 cm³; 2,2 cm³

7. Unter welchem Druck strömt Wasser aus der Wasserleitung im untersten Stockwerk eines Hauses, das 40 m unter dem Wasserspiegel des Wasserbehälters im Wasserwerk liegt, wie groß in dem obersten Stockwerk, das 12 m höher gelegen ist? [4 Atm.; 2,8 Atm.

8. Wie hoch ist die Quecksilbersäule, die denselben Druck ausübt wie eine 156 cm hohe Säule aus Salzwasser vom spezifischen Gewicht 1,09? [12,5 cm

9. Ein Mensch erfährt in Flußwasser einen Auftrieb von 70 kg. Wie groß ist sein Auftrieb in Meerwasser vom spezifischen Gewicht 1,03? [72,1 kg

10. Ein Stück Kork wiegt 12 g. Es wird mit einem Stück Eisen vom spezifischen Gewicht 7,4 und dem Gewicht 105 g fest verbunden. Die beiden Körper erfahren zusammen in Wasser einen Auftrieb von 73 g. Wie groß ist das spezifische Gewicht des Korkes? [$s = 0{,}2$

11. Ein Körper aus Glas wiegt 36,4 g. In Wasser gewogen ist sein Gewicht 22,3 g, in Spiritus gewogen 25,3 g. Wie groß ist das spezifische Gewicht des Spiritus? [$s = 0{,}8$

12. Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Sand nimmt man folgende Wägungen vor: Ein Pyknometer wiegt leer 13,07 g, mit Sand teilweise gefüllt 23,7 g. Gießt man Wasser zum Sand, bis das Pyknometer völlig gefüllt ist, so besitzt es das Gewicht 44,58 g. Gießt man dann den Sand aus und füllt das Pyknometer von neuem vollständig mit Wasser, so findet man 38,0 g. Wie groß ist das spezifische Gewicht des Sandes? [$s = 2{,}63$

13. Das Gewicht einer Glasröhre beträgt 14,65 g. Füllt man sie auf einer Länge von 21,4 cm mit Wasser, so wiegt sie nun 15,95 g. Wie groß ist der Querschnitt der Röhre? [$q = 6{,}1$ mm²]

14. Ein Kapillarrohr wiegt leer 23,05 g, mit Quecksilber auf einer Länge von 10,5 cm gefüllt 23,75 g. Wie groß ist der Querschnitt der Kapillaren? [$q = 0{,}5$ mm²]

15. Wieviel Gas würde ausströmen, wenn bei unverändertem Druck die Temperatur des Gases von 10^0 auf 20^0 C steigen würde? [2570 cm³]

16. Bei einem Schülerübungsversuch ergibt sich, daß 153,5 cm³ Luft, die sich von 50^0 C abkühlen, für je 1^0 C Temperaturerniedrigung um 0,46 cm³ sich zusammenziehen. Wie groß ist dann das Volumen bei 0^0 C? In welchem Verhältnis steht die Volumänderung für 1^0 C zum Volumen, das das Gas bei 0^0 C besitzt? [$V_0 = 130{,}3$ cm³; 1/277]

17. Ein anderer Versuch ergibt, daß der Druck einer abgeschlossenen Gasmenge, die bei 18^0 C einen Druck von 758 mm besitzt, für je 1^0 C Temperaturerhöhung um 2,5 mm zunimmt. Wie groß ist dann der Druck des Gases bei 0^0 C? In welchem Verhältnis steht die Zunahme des Druckes für 1^0 C zu dem Druck des Gases bei 0^0 C? [$p_0 = 713$ mm; 1/285]

18. Bei einem Barometerstand von 751,3 mm und einer Temperatur von 17^0 werden 220 cm³ Wasserstoff entwickelt, die durch eine Wassersäule in einem Meßglas abgeschlossen sind, welche innen 10 cm höher als außen steht. Wie groß ist das Normalvolumen der Gasmenge? [204,4 cm³]

19. Wie schwer ist 1 *l* Sauerstoff von 20^0 C bei 770 mm Druck? [1,35 g]

20. Welche Temperatur nehmen 185 g Wasser von 18^0 C an, wenn 50 g Kupfer von 100^0 C in das Wasser geschüttet werden? [$t = 20$ C°]

21. Ein kleines Kupferstück von 3,2 g wird in die Flamme des Bunsenbrenners gehalten, bis es die Temperatur der Flamme angenommen hat. Dann wird es rasch in ein Gefäß mit 48 g Wasser geworfen, das seine Temperatur dabei von $13{,}5^0$ bis $20{,}5^0$ C erhöht. Wie heiß ist die Flamme? [$t = 1100°$ C]

22. Wie groß ist die Wärmemenge, die 2 kg Eis von -10^0 C zugeführt werden müßte, damit es sich in Wasserdampf von 100^0 C verwandelt? [$W = 1148$ kcal]

23. 3 kg Eis von 0^0 C werden mit 10 kg Wasser von 50^0 C gemischt. Welche Temperatur besitzt das Wasser nach dem Auflösen des Eises? [$t = 20°$ C]

24. In 200 cm³ Wasser von 22^0 C werden 20 g Eis von 0^0 C gebracht. Nach dem Schmelzen des Eises beträgt die Mischungstemperatur $12{,}7^0$ C. Wie groß ist die Schmelzwärme des Eises? [$t = 80$ kcal]

25. Welche Temperatur nehmen 500 g Wasser von 15^0 C an, in die 10 g Dampf von 100^0 C geleitet und kondensiert werden? [$t = 28{,}2°$ C]

26. Welche Arbeit leistet ein Bergsteiger von 85 kg Gewicht, der in 3 Stunden 1200 m hoch steigt? Wie groß ist die Leistung in PS? [$A = 102\,000$ mkg, $L = 9{,}4$ mkg/sec $= 1/8$ PS]

27. Ein Kran besitzt eine Maschine von 20 PS Leistung. Er hebt in 5 Sekunden eine Last 3 m hoch. Wie groß darf die Last sein, wenn die volle Leistung der Maschine beansprucht wird? [1,5 t]

28. Mit welcher Kraft fährt ein mit 4 Personen besetzter Schlitten von 250 kg Gewicht auf einer Bahn von 15% Neigung zu Tal? Welchen Druck übt der Schlitten auf die Unterlage aus? (Von der Reibung werde abgesehen.) [$H = 37{,}5$ kg; $D = 245$ kg]

29. Zwei Personen *A* und *B* tragen auf einem Balken von 10 kg Gewicht und 2 m Länge eine Last von 100 kg, die von *A* 80 cm und von B 120 cm entfernt ist. Welche Last haben beide zu tragen? [*A* 65 kg; *B* 45 kg]

30. Auf den Kolben eines Sicherheitsventils von 1 cm² Querschnitt wirkt ein Dampfdruck von 4 Atmosphären. An dem Hebel, durch den das Ventil geschlossen wird, sitzt in 3 cm Abstand vom Drehpunkt der Kolben. An welcher Stelle muß das Laufgewicht von 0,8 kg ruhen, damit dem Dampfdruck gerade das Gleichgewicht gehalten wird? [18,7 cm

31. Der Arbeitszylinder einer hydraulischen Presse besitzt 1,2 cm² Querschnitt und der Kolben eine Hubhöhe von 6 cm. Der Druckzylinder hat 80 cm² Querschnitt. Wievielmal muß der Kolben im Arbeitszylinder auf- und abgehen, damit der Druckzylinder um 1 cm gehoben wird? Wie groß ist der Druck der Presse, wenn der Kolben im Arbeitszylinder mit 30 kg niedergedrückt wird? [11 mal; 2000 kg

32. Welche Kraft drückt auf ein Segel von 16 m² Fläche, wenn der Wind pro m² 10 kg Druck ausübt und er unter 30° von vorn auf das Segel trifft? Welche Kraft treibt das Boot vorwärts, wenn das Segel einen Winkel von 30° mit der Kielrichtung bildet? [80 kg; 40 kg

33. Eine Dampfmaschine besitzt einen Zylinder von 500 cm² Querschnitt, in den Dampf von 3 Atm. strömt. Der Kolben hat eine Hubhöhe von 60 cm. Welche Arbeit wird bei Volldampf geleistet? Welche Arbeit, wenn nur auf $\frac{1}{3}$ des Kolbenweges Volldampf herrscht und auf den anderen $\frac{2}{3}$ des Kolbenweges ein durchschnittlicher Druck von 1,8 Atm. angenommen werden kann? Der Kondensatordruck sei 0. Welche Leistungen erzielt die Maschine bei 90 Touren pro Minute? [900 mkg; 660 mkg; 36 PS; 26,4 PS

34. Welche Leistung kann ein Staubecken liefern, aus dem 2 m³ Wasser bei 40 m Gefälle in der Sekunde entnommen werden können? [80 000 mkg/sec; rund 1000 PS

35. Im Walchenseewerk beträgt das Gefälle des Wassers rund 200 m. Wieviel Wasser muß aus dem See abfließen, damit das Werk 100000 PS liefern kann, wenn die Anlage 85% Nutzleistung erzielt? [44 m³

36. Wieviel kg Kohle müssen in einer Dampfmaschine von 300 PS Leistung während 8 Stunden verbrannt werden, wenn 15% des Heizwertes der Kohle (Heizwert von 1 kg Kohle 8000 kcal) in mechanische Arbeit umgewandelt werden? [1300 kg

37. Wieviel m³ Leuchtgas (spez. Gewicht 0,0006, Heizwert von 1 kg beträgt 9000 kcal) braucht man, um 150 *l* Wasser von 15° auf 30° C zu erhitzen? Es werde alle Wärme dem Wasser zugeführt. [0,42 m³

38. Ist Kohlen- oder Gasheizung zum Heizen eines Zimmers billiger, wenn angenommen wird, daß 50% der Verbrennungswärme der Kohle und 80% der Verbrennungswärme des Leuchtgases ausgenutzt werden? Der Kohlenpreis betrage für den Zentner 2,50 ℳ, der Gaspreis für 1 m³ 0,18 ℳ. Heizwert für 1 kg Kohle 7000 kcal, für 1 kg Leuchtgas 9000 kcal. [Kohle zu Gas wie 1:2,3

Warum ist das Kochen mit Gas wirtschaftlicher und auch billiger als das Kochen auf dem Kohlenherd?

39. Ein Wagen gleitet auf einer schiefen Ebene herunter. In dem Augenblick, wo er den Weg 3 mm zurückgelegt hat, schlägt ein Funke durch einen nachgezogenen Papierstreifen. Neue Funken schlagen nach je $\frac{1}{5}$ sec durch den Streifen und markieren die Wege. Die Messung ergibt für die insgesamt zurückgelegten Wege:

Zeit ($\frac{1}{2}$ sec):	—	1	2	3	4	5	6	7	8
Wege in mm:	3	34	94	185	306	456	637	853	1101

a) Wie groß sind die nacheinander in gleichen Zeitspannen zurückgelegten Wege? Wie groß sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten ausgedrückt in cm/sec? b) Wie groß sind die Geschwindigkeitszunahmen in aufeinanderfolgenden Zeitspannen? Wie groß ist die durchschnittliche Beschleunigung ausgedrückt in cm/sec²? [Beschleunigung 77,5 cm/sec²

40. Stelle die Ergebnisse der Aufgabe 39 graphisch dar. Welcher Potenz der Zeit ist der Weg proportional? Welche Beziehung besteht zwischen Geschwindigkeit und Zeit? Wann beginnt die Bewegung? [$s \sim t^2$ $v \sim t$; 0,08 sec vor dem ersten Funken

41. Wie groß ist die Fallstrecke eines Körpers in 5 sec? Welche Geschwindigkeit hat er nach 5 sec erlangt? [122,5 m; 49 m/sec

42. Ein Körper fällt von einem 100 m hohen Turm. Wie groß ist die Fallzeit? Welche Geschwindigkeit besitzt er beim Auffallen? [3,2 sec; 44 m/sec

43. Ein Körper wird mit der Geschwindigkeit 20 m/sec in die Höhe geworfen. Welche Geschwindigkeit besitzt er nach 1, 2, 3, 4 sec? Wo ist er dann? [10; 0; —10; —20 m/sec
[15; 20; 15; 0 m hoch

44. Ein Schülerübungsversuch ergibt für die Messung der Schwingungsdauer verschieden langer Pendel:

Pendellänge in cm:	300	200	100	80	60	40	20
Schwingungsdauer in sec:	3,5	2,8	2	1,8	1,6	1,25	0,85

Welcher Potenz der Zeit t ist die Länge l proportional? [$l \sim t^2$

45. Wie groß ist der elektrische Widerstand einer Kupferleitung von 3 mm² Querschnitt und 200 m Länge? [1,13 Ω

46. Wie groß ist der elektrische Widerstand einer Telegraphenleitung von 10 km Länge, die aus Eisendraht von 12 mm² Querschnitt besteht? [rd. 100 Ω

47. Welcher Strom fließt in einem Stromkreis, wenn die Stromquelle aus einem Akkumulator von 1,9 Volt Spannung und dem inneren Widerstand 0,05 Ω besteht und die äußere Leitung aus einem Nickelindraht gebildet wird, der 2,10 m Länge und 1 mm Durchmesser besitzt? [$i = 1,6$ Amp.

48. Drei Trockenelemente von 1,3 Volt Spannung und 0,2 Ω innerem Widerstand sind hintereinander geschaltet. Welcher Strom fließt durch eine Glühlampe von 14 Ω Widerstand? [$i = 0,26$ Amp.

49. Eine Stromverzweigung besteht aus den Widerständen 15,3 und 22,5 Ω. Wie stark sind die Ströme, die durch die Zweige fließen, wenn der Gesamtstrom 1 Amp. beträgt? [0,595; 0,405 Amp.

50. Welcher Strom fließt durch ein Voltmeter, das 75 Volt anzeigt und einen inneren Widerstand von 20000 Ω besitzt? [3,75 Milliamp.

51. Eine Glühlampe brennt bei 110 Volt Spannung mit 0,2 Amp. Stromstärke. Wie groß ist ihr innerer Widerstand? [550 Ω

52. Welche Wärmemenge entwickelt eine Kohlenfadenglühlampe, die mit 110 Volt Spannung und 0,5 Amp. Stromstärke brennt, in 10 Minuten, wenn alle Energie in Wärme umgewandelt wird? [7,9 kgkal

53. Welche Leistung besitzt ein Elektromotor, der bei 220 Volt Spannung mit 8 Ampere Strom gespeist wird? [2½ PS

54. In einer Wohnung brennen drei Lampen mit je 25 und eine mit 10 Watt Stromverbrauch. Welcher Strom fließt durch den elektrischen Zähler, wenn die Spannung 110 Volt beträgt? [0,76 Amp.

55. Ein Bügeleisen verbraucht 250 Watt. Die Kilowattstunde kostet 60 Pf. Wieviel kostet der Strom, der in 3 Stunden zum Bügeln verbraucht wird? [45 *Rpf.*

56. Wie hoch stellen sich die stündlichen Beleuchtungskosten bei Glühlampen von 15, 25, 60 und 100 Watt bei einem Strompreis von 42 *Rpf* für die Kilowattstunde? [0,6; 1; 2,5; 4,2 *Rpf.*

57. Welche Stromstärke muß in einem Motor fließen, der mit 440 Volt Spannung betrieben wird und 20 PS leisten soll? Wie groß muß der Widerstand des Motors sein? [34 Amp.; 13 Ω

58. Ein Zimmer wird durch einen Ofen geheizt, in dem 8 kg Kohle während eines Tages verbrennen. Der Preis der Kohle betrage 2,50 ℳ für den Zentner, 50 % ihres Heizwertes sollen ausgenutzt werden. Dieselbe Wärmemenge soll elektrisch erzeugt werden. Die Kilowattstunde koste 50 ℛ₰. Alle elektrische Energie werde in Wärme übergeführt. Welche Heizung ist billiger? Wie steht es mit dem Verhältnis, wenn die Kilowattstunde 2 ℛ₰ und die Kohle 3,50 ℳ kostet (Gebirgsgegend)?
[Kohle 40 *Rpf*, Elektr. 1625 *Rpf.*; Kohle 56 *Rpf.*; Elektr. 64 *Rpf.*

59. Welche Arbeit geht in der Zuleitung verloren, wenn der Strom durch eine Kupferleitung von 3 km Länge 100 mm² Querschnitt einem Straßenbahnwagen zugeführt wird, in dessen Motor 20 Amp. fließen? Spannung 440 Volt. [200 Watt = 2 %

60. Wie lang ist der Kernschatten des Mondes bei Sonnenfinsternis? Mittlere Entfernung des Mondes von der Sonne 149 500 000 km, Sonnenradius 700 000 km, Mondradius 1740 km. Vergleiche damit die Entfernung von Erde und Mond, die zwischen 360 000 und 410 000 km wechselt. [374 000 km

61. Dieselbe Aufgabe für die Erde, deren Entfernung von der Sonne durchschnittlich 149 500 000 km beträgt? Erdradius 6370 km. [1 374 000 km

62. Wieviel Bilder zeigen zwei unter 90^0, 60^0, 30^0 gegeneinander geneigte Spiegel, von einem zwischen den Spiegeln liegenden Gegenstande?

63. An welcher Stelle erscheint das Bild eines Gegenstandes, der 1 m von einem Hohlspiegel von 60 cm Brennweite steht? [1,50 m

64. Wie groß ist der Grenzwinkel der Totalreflexion bei Diamant, Kron- und Flintglas? [24 5°, 42', 36°

65. Ein Lichtstrahl fällt unter dem Einfallswinkel $\alpha = 0^0$ auf die eine Fläche eines optischen Prismas von 30^0 brechendem Winkel und dem Brechungsexponenten 1,5. Um wieviel Grad ist der Strahl nach dem Durchgang durch das Prisma abgelenkt? Dieselbe Aufgabe für einen Einfallswinkel $\alpha = 60^0$. Wie groß muß der Einfallswinkel sein, damit der Strahl symmetrisch durch die Linse geht? Wie groß ist dann die Ablenkung? $\varepsilon_1 = 43^0\,35'$, $\varepsilon_2 = 52^0\,7'$, $\alpha_2 = 22^0\,50'$, $\varepsilon_3 = 45^0\,40'$

66. Wie groß ist die Brennweite einer Linse, die einen 2 m entfernten Gegenstand in 60 cm Entfernung reell abbildet? Wie groß ist das Bild des 20 cm hohen Gegenstandes? [$f = 46$ cm; 6 cm

67. Wie groß muß der Schirm einer Projektionsvorrichtung sein, deren Objektiv eine Brennweite von 40 cm besitzt und die in 10 m Entfernung von Diapositiven der Größe 8 × 10,5 cm Bilder entwerfen soll? [198 × 253

68. Wie groß ist das Mondbild, das vom Objektiv eines Fernrohres von 1 m Brennweite entworfen wird? Wo liegt es? Wie groß erscheint es, wenn das Okular eine Brennweite von 4 cm besitzt? Mondentfernung 384 000 km, Mondradius 1740 km. Wie groß ist der Sehwinkel? [0,46 cm; $b \sim 1$ m; 25 mal so groß; $\alpha = 15'$

Register

Achromatisches Prisma 161
Adhäsion 16
Aggregatzustand 29
Akkumulator 113
Ampère 112
Amperemeter 120
AmpèresSchwimmerregel114
Aneroidbarometer 29
Aplanat 166
Aräometer 20
Arbeit 39
Archimedisches Prinzip 20
Atmosphärendruck 23
Auftrieb 20
Auge 166
Ausdehnungskoeffizient 13

Barometer 27
Batterie, galvanische 110
Beleuchtungsstärke 176
Beschleunigung 72
Bild, optisches 152
Bodendruck 18
Bogenlampe 137
Boylesches Gesetz 23
Brechung des Lichtes 157
Brechzahl 158
Brennpunkt der Linse 161
Brennweite der Linse 162
Bruchfestigkeit 12
Brückenwaage 48

Celsius 10
Chladnische Klangfiguren 89
Cortisches Organ 92

Dampfdruck 33
Dampfmaschine 53
Dampfturbine 56
Deklination 96
Dezimalwaage 48
Dopplersches Prinzip 91
Druck in Flüssigkeiten 18
Druckpumpe 50
Dyn 78
Dynamomaschine 124

Ebbe und Flut 84
Einfallslot, -winkel 157
Elastizität 11
Elektrischer Strom 110
Elektrisiermaschine 165
Elektrizitätsmenge 99
Elektrolyse 110, 140
Elektromagnet 116
Elektromotor 135
Elektroskop 99
Element, galvanisches 108
Energie 59
„ kinetische 78
„ potentielle 60, 78
Entladung, elektrische 106
Erdmagnetismus 96
Expansion 23, 56
Explosionsmotor 59

Fachwerk 45
Fall, freier 73
Farben 178, 181
Federwaage 12
Feld des elektr. Stromes 113
„ elektr. 102
„ magn. 94
Fernrohr 171
Fernsprecher 144
Feste Körper 11
Festigkeit 12
Feuchtigkeit 34
Flächenmaße 4
Flaschenzug 40
Flüssigkeit 15
Fundamentalpunkte 9
Funke, elektrischer 105, 147
Funkeninduktor 127
Funkentelegraphie 146

Galvanischer Strom 109
Gase 21
Gelber Fleck 167
Geschwindigkeit 71
Gewicht, spezifisches 6, 20
Gleichförmige Bewegung 71
Gleichgewicht 14
Gleichmäßig beschleunigte Bewegung 71
Glühlampe 137
Gnomon 8
Grammgewicht, -masse 78
Gravitation 83
Grundton 90

Haarröhrchen 17
Handregel, links u. rechts 121
Härte 12
Hebel 43
Heber 50
Hohlspiegel 154
Horizontal 16
Hydraulische Presse 49

Indifferentes Gleichgewicht 14
Induktion 121
Induktor 127
Influenz 103
Inklination 96
Iris 166
Isolator 98

Kalorie 30
Kältemaschinen 68
Kältemischung 31
Kamera 164
Kanalstrahlen 186
Kapazität, elektrische 101
Kapillarität 17
Kathodenstrahlen 185
Kernschatten 151
Kilowatt 137
Klang 90
Klingel, elektrische 141
Kohäsion 13
Kommunizierende Röhren 17
Kompaß 96
Komponenten 38
Kondensator, Dampf- 5
„ elektr. 103
Konduktor 98

Kraft 36
Kräfteparallelogramm 37
Kraftlinien 95, 102

Labiles Gleichgewicht 14
Leidener Flasche 104
Leistung 39
Lichtstärke 176
Lichtstrahl 151
Linsen 161
Luftpumpe 27
Lupe 170

Magnetismus 93
Magnetnadel 94
Magnetpole 93
Manometer 22, 25
Maschinen, einfache 39
Masse 76
Mechanisches Wärmeäquivalent 63
Meterkilogramm 39
Metronom 7
Mikrometerschraube 4
Mikrophon 145
Mikroskop 171
Mischfarben 179
Morsetelegraph 142

Nachhall 86
Niederschläge, atmosph. 34
Nordpol 93

Oberfläche einer Flüssigkeit 16
Obertöne 90
Objektiv 166, 172
Ohm, Ohms Gesetz 118
Ohr 92
Oktave 88
Okular 171, 172

Parallelogramm der Kräfte 37
Pendel 80
Pendeluhr 7
Pferdestärke 39
Photographie 164
Photometer 177
Planparallele Platte 158
Prisma 159, 160
Projektionsapparat 168
Projektionssatz 168
Projektionssatz der Kräfte 38

Radioaktivität 187
Réaumur 10
Reflexionsgesetz 152
Reibung 38
Resonanz 81, 91
Resultante 38
Rolle 40
Röntgenstrahlen 185
Rundfunk 148

Saiten 89
Sammellinsen 161
Saugpumpe 49
Schall 85
Schiefe Ebene 41
Schmelzpunkte 30
Schmelzwärme 31
Schraube 42
Schwerpunkt 14
Schwimmen 20
Schwingungen 80
Sehwinkel 168, 170
Seitendruck 18
Sekunde 9
Siedepunkte 32
Solenoid 115
Spannung, elektrische 100, 109
Spektralfarben 178
Spektrum 178
Spiegel 152
Spiegelteleskop 173
Spitzenwirkung 102, 103
Stabiles Gleichgewicht 14
Stereoskop 168
Stimmgabel 89
Südpol 93
Telegraph 142
Telegraphie, drahtlos 146
Telephon 144
Telephonie, drahtlos 146
Temperatur 9
Thermometer 9
Ton 88
Totalreflexion 159
Trägheit 76
Transformator 128
Turbine, Dampf- 56
— Wasser- 52

Uhr 7
Unruhe 8

Verbrennungswärme 61
Verdampfungswärme des Wassers 32
Verdunsten 31
Virtuelle Bilder 153
Volt 109
Voltmeter 120
Volumen 5

Waage 6, 47
Wärmeäquivalent, mechanisches 63
Wärmeleitung 62
Wärmemenge 30
Wärmequellen 59
Wärmestrahlung 63
Wärmeströmung 62
Wärmewirtschaft 66
Wasserwaage 17
Watt 131
Wellrad 43
Widerstand, elektrischer 117
Windkessel 50

Zentimeter 5
Zentrifugalkraft 82
Zentrifugalpumpe 82
Zugfestigkeit 12