

Elementare Physik

Von

Arthur Haas

Dr. phil., Professor für Physik an der Universität in Wien

Mit 85 Textabbildungen



Wien

Verlag von Julius Springer

1937

ISBN 978-3-7091-5880-7 ISBN 978-3-7091-5930-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-7091-5930-9

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten

Copyright 1937 by Julius Springer in Vienna

Vorwort.

Das vorliegende Büchlein beansprucht nicht, als ein Lehrbuch der Physik zu gelten. Es soll lediglich solchen Studierenden, die eine Anfängervorlesung über Physik gehört haben und für die Wiederholung des Stoffes eine knappere und mehr zusammenfassende Darstellung wünschen, eine solche bieten. In dieses Buch wurden darum alle Probleme und Erkenntnisse aufgenommen, die in einer solchen Vorlesung hauptsächlich behandelt werden. Die verschiedenen Zweige der Physik wurden gleichmäßig berücksichtigt und insbesondere auch solche moderne Erkenntnisse, die als bleibend angesehen werden können. Wegen des elementaren Charakters beschränkt sich das vorliegende Buch auf das Gebiet der sogenannten Experimentalphysik; doch werden auch, und zwar ohne Heranziehung höherer Mathematik, einige besonders einfache Beispiele physikalischer Deduktionen gebracht.

Arthur Haas.

Derzeit Notre Dame-Universität
in Notre Dame, Indiana, U. S. A.,
im Januar 1937

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

Mechanik und Akustik.

	Seite
Erstes Kapitel. Die Bewegung fester Körper	1
§ 1. Der freie Fall.....	1
§ 2. Der Wurf	2
§ 3. Die Zentripetalbeschleunigung	5
§ 4. Die harmonische Schwingung.....	6
§ 5. Die Pendelbewegung.....	7
§ 6. Die Kraft	8
§ 7. Die Newtonschen Bewegungsgesetze	8
§ 8. Die Planetenbewegungen.....	10
§ 9. Das Gravitationsgesetz	11
§ 10. Die Zentrifugalkraft	13
§ 11. Die Coriolis-Kraft	14
§ 12. Arbeit und Energie	14
§ 13. Die potentielle Energie	16
§ 14. Die Zusammensetzung der Kräfte an einem starren Körper	18
§ 15. Die mechanischen Maschinen	21
§ 16. Die Waage	22
§ 17. Die Rotation starrer Körper	23
§ 18. Das physische Pendel	24
§ 19. Der Kreisel	25
§ 20. Die Elastizität	26
§ 21. Der Stoß	27
§ 22. Die Reibung fester Körper	28
Zweites Kapitel. Die Flüssigkeiten.....	29
§ 23. Der hydrostatische Druck	29
§ 24. Das Archimedische Prinzip	30
§ 25. Der Ausfluß	31
§ 26. Strömung und Wirbel	31
§ 27. Die Wirbel	32
§ 28. Wasserrad und Wasserturbine	33
§ 29. Die Kompressibilität	33
§ 30. Die Oberflächenspannung	34
§ 31. Die Kapillarität	34

	Seite
Drittes Kapitel. Die Gase	35
§ 32. Der Luftdruck	35
§ 33. Das Boylesche Gesetz und das Gewicht der Gase	36
§ 34. Die Luftpumpe	37
§ 35. Der Reibungswiderstand der Luft	38
§ 36. Das Flugzeug	39
§ 37. Absorption und Adsorption von Gasen	39
Viertes Kapitel. Akustik	40
§ 38. Allgemeine Eigenschaften von Schwingungen	40
§ 39. Allgemeine Eigenschaften von Wellen	41
§ 40. Die Schallwellen	42
§ 41. Die Tonhöhe	43
§ 42. Die Klangfarbe	44
§ 43. Die Tonstärke	45
§ 44. Die Sprachtöne	45
§ 45. Die Erregung der Töne	45
§ 46. Reflexion von Schallwellen	46
§ 47. Die Raumakustik	47
§ 48. Interferenzen und Schwebungen von Tönen	48
§ 49. Schallempfänger	48
§ 50. Das Grammophon	49

Zweiter Teil.

Wärmelehre.

Fünftes Kapitel. Allgemeine Wärmelehre	50
§ 51. Die Temperatur	50
§ 52. Das Thermometer	50
§ 53. Die Gasthermometer	51
§ 54. Die Wärmeausdehnung	52
§ 55. Die spezifische Wärme	53
§ 56. Die Kalorimeter	54
§ 57. Die Wärmeleitung	55
§ 58. Die Konvektion der Wärme	55
§ 59. Das mechanische Wärmeäquivalent	56
§ 60. Anwendungen des ersten Hauptsatzes	56
§ 61. Der zweite Hauptsatz	57
§ 62. Der thermodynamische Kreisprozeß	58
§ 63. Der Nernstsche Wärmesatz	60
Sechstes Kapitel. Die Umwandlungen des Aggregatzustandes	60
§ 64. Das Schmelzen	60
§ 65. Die Verdampfung	61
§ 66. Verdunstung und Sublimation	62
§ 67. Der gesättigte Dampf	62
§ 68. Die Luftfeuchtigkeit	63

Inhaltsverzeichnis.

VII

	Seite
§ 69. Die Hygrometrie	64
§ 70. Der kritische Zustand	64
§ 71. Die Verflüssigung der Luft	65
§ 72. Die Herstellung tiefster Temperaturen	66
§ 73. Die Zustandsgleichung der Gase	66
§ 74. Die Lösungen	68
§ 75. Der osmotische Druck	68
§ 76. Die Dampfmaschine	69
§ 77. Der Verbrennungsmotor	70
§ 78. Die Kältemaschine	71
§ 79. Die kinetische Auffassung der Wärme	71
§ 80. Das Gesetz von Avogadro	73

Dritter Teil.

Optik.

Siebentes Kapitel. Strahlenoptik	74
§ 81. Die geradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen	74
§ 82. Die Dunkelkammer	74
§ 83. Das Reflexionsgesetz	75
§ 84. Die Methode der Spiegelablesung	76
§ 85. Der Hohlspiegel	76
§ 86. Das Brechungsgesetz	78
§ 87. Die totale Reflexion	79
§ 88. Die Brechung durch ein Prisma	79
§ 89. Die Dispersion	80
§ 90. Die Messung des Brechungsexponenten	81
§ 91. Die Linsen	81
§ 92. Die sphärische Abweichung	84
§ 93. Die chromatische Abweichung	84
§ 94. Das Auge	85
§ 95. Das Mikroskop	86
§ 96. Das Fernrohr	87
§ 97. Die Photographie	88
§ 98. Die lichttechnischen Einheiten	89
§ 99. Die Photometrie	89
§ 100. Die astronomische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit	90
§ 101. Die terrestrische Messung der Lichtgeschwindigkeit	90
§ 102. Die Lichtgeschwindigkeit als obere Grenze mechanischer Geschwindigkeiten	92
§ 103. Das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit als Proportionali- tätswert zwischen Energie und Masse	92
§ 104. Die Lichtausbreitung in bewegten Medien	93
§ 105. Der Michelsonsche Versuch	93
Achstes Kapitel. Wellenoptik	94
§ 106. Die Interferenz des Lichtes	94
§ 107. Der Fresnelsche Spiegelversuch	95

	Seite
§ 108. Die Beugung des Lichtes	96
§ 109. Die Beugungsgitter	97
§ 110. Die Doppelbrechung	98
§ 111. Die Polarisation des Lichtes	98
§ 112. Die Polarisationsapparate	99
§ 113. Die Drehung der Schwingungsebene des Lichtes	100
§ 114. Die chromatische Polarisation	101
§ 115. Das Auflösungsvermögen des Mikroskops	101
§ 116. Die Lichtquanten	102
Neuntes Kapitel. Die Spektroskopie	104
§ 117. Die Emissionsspektren	104
§ 118. Die Absorptionsspektren	105
§ 119. Die Spektroskope	106
§ 120. Das Ultrarot	106
§ 121. Das Ultraviolett	107
§ 122. Spektralserien und Spektralmerkmale	108
§ 123. Das Wasserstoffspektrum	109
§ 124. Die Spektren der Alkalimetalle	109
§ 125. Die Kristalle als Beugungsgitter	110
§ 126. Die Messung der Röntgen-Wellenlängen	112
§ 127. Die Röntgenspektren	113
§ 128. Das Moseleysche Gesetz	114
§ 129. Die Optik der Röntgenstrahlen	115
§ 130. Das Gesetz von Kirchhoff	116
§ 131. Das Strahlungsgesetz von Stefan	117
§ 132. Das Verschiebungsgesetz von Wien	117
§ 133. Die Fluoreszenz	118
§ 134. Der Doppler-Effekt	119

Vierter Teil.

Elektrizitätslehre.

Zehntes Kapitel. Elektrisches und magnetisches Feld ...	120
§ 135. Der Dualismus der Elektrizität	120
§ 136. Das Coulombsche Gesetz	120
§ 137. Die Elektrizitätsleiter	121
§ 138. Das elektrische Feld	122
§ 139. Die Kapazität	124
§ 140. Der Kondensator	125
§ 141. Die Elektrometer	126
§ 142. Die Dielektrizitätskonstante	127
§ 143. Die Entdeckungen Voltas und Oersteds	127
§ 144. Der Magnetismus	128
§ 145. Der Erdmagnetismus	131
§ 146. Der Ferromagnetismus	132
§ 147. Dia- und Paramagnetismus	134

Inhaltsverzeichnis.

IX

Seite

Elftes Kapitel. Die elektrischen Ströme	135
§ 148. Das Gesetz von Biot und Savart	135
§ 149. Die Stromspule	136
§ 150. Der Konvektionsstrom	137
§ 151. Das Experiment von Weber und Kohlrausch	137
§ 152. Die Stromleistung	138
§ 153. Der elektrische Widerstand	138
§ 154. Die Stromverzweigung	139
§ 155. Das Galvanometer	142
§ 156. Glühlampe und Bogenlicht	143
§ 157. Die Telegraphie	144
§ 158. Die galvanischen Elemente	146
§ 159. Der Akkumulator	146
§ 160. Das Thermolement	147
§ 161. Die elektrochemischen Grundgesetze von Faraday ..	148
§ 162. Das elektrische Elementarquantum	149
§ 163. Die Elektrizitätsleitung in Gasen	150
§ 164. Die selbständige Gasentladung	151
§ 165. Die Entladungserscheinungen in verdünnten Gasen ..	151
§ 166. Die Kathodenstrahlen	152
§ 167. Die Elektronen	153
§ 168. Der lichtelektrische Effekt	153
§ 169. Die Glühelktrizität	154
§ 170. Die Verstärkerröhre	154
§ 171. Die Röntgenröhren	155
Zwölftes Kapitel. Die elektromagnetische Induktion und die elektrischen Wellen	156
§ 172. Die Induktionsströme	156
§ 173. Die Selbstinduktion	157
§ 174. Die Wechselströme	158
§ 175. Der Transformator	160
§ 176. Die Telephonie	161
§ 177. Der Tonfilm	162
§ 178. Die Stromgeneratoren	163
§ 179. Die Wechselstromgeneratoren	164
§ 180. Der Drehstrom	165
§ 181. Der Elektromotor	165
§ 182. Die elektrische Energieübertragung	165
§ 183. Die hochfrequenten Wechselströme	167
§ 184. Die Hertzschcn Versuche	168
§ 185. Die elektromagnetische Natur des Lichtes	169
§ 186. Die Sendung elektrischer Wellen	169
§ 187. Der Empfang elektrischer Wellen	171
§ 188. Die drahtlose Telephonie	171
§ 189. Der Rundfunk	172

	Seite
Dreizehntes Kapitel. Der elektrische Aufbau der Materie .	172
§ 190. Die materiellen Urteilchen	172
§ 191. Die Wilson-Kammer	173
§ 192. Die kernige Struktur der Atome	174
§ 193. Die Isotopie	176
§ 194. Die Massenspektroskopie	176
§ 195. Der radioaktive Kernzerfall	178
§ 196. Die Umwandlungsreihen	179
§ 197. Die künstlichen Kernumwandlungen	180
§ 198. Die experimentelle Bestätigung des Satzes von der Eigen- energie	183
§ 199. Die künstliche Radioaktivität	184
§ 200. Die Materialisation des Lichtes	185
§ 201. Die kosmische Ultrastrahlung	185
§ 202. Die Atomhüllen	186
§ 203. Die chemische Periodizität	187
§ 204. Die Elektronenstöße	187
§ 205. Zeeman- und Stark-Effekt	189
§ 206. Der Compton-Effekt	190
§ 207. Raman-Effekt und Bandenspektren	190
§ 208. Die Materiewellen	191
Namenverzeichnis	193
Sachverzeichnis	196

Erster Teil.

Mechanik und Akustik.

Erstes Kapitel.

Die Bewegung fester Körper.

§ 1. Der freie Fall. Die Physik verdankt ihre Begründung als exakte Wissenschaft den beobachtenden und messenden Forschungen Galileis über den freien Fall. Bezeichnen wir den im Falle zurückgelegten Weg mit s , die Fallzeit mit t und die jeweilige, in ständiger Zunahme begriffene Geschwindigkeit mit v , so ist das Fallgesetz durch die Formeln beschrieben:

$$s = \frac{1}{2} g t^2, \quad v = g t;$$

dabei bedeutet g den auf die Zeiteinheit bezogenen Zuwachs der Geschwindigkeit, die sogenannte *Fallbeschleunigung*.

Als Einheit der Länge benutzt die Physik das *Zentimeter*, als Einheit der Zeit die *Sekunde*.¹ Die Einheit der *Geschwindigkeit* ist somit 1 cm pro sec oder 1 cm/sec, wofür man auch 1 cm sec⁻¹ schreibt. Eine Bewegung erfolgt mit der Beschleunigung Eins, wenn die Geschwindigkeit, pro Sekunde, eine Vermehrung um die Geschwindigkeitseinheit erfährt. Die Einheit der Beschleunigung ist somit 1 cm sec⁻².

In der geographischen Breite von Mitteleuropa beträgt die Fallbeschleunigung 981 cm sec⁻². Sie ist von allen speziellen Eigenschaften des fallenden Körpers unabhängig, so daß, wenn man den Luftwiderstand ausschaltet, alle Körper gleich schnell

¹ Das Zentimeter ist definiert als der hundertste Teil der Entfernung zweier Striche auf einem in Paris verwahrten Normalstab aus Platin-Iridium; dieser entspricht nahezu dem 10 000 000sten Teil der Länge des Erdquadranten. Die Sekunde ist definiert als der (24 × 3600)ste Teil eines mittleren Sonnentages.

fallen. Wegen der Konstanz von g stellt der Fall eine *gleichförmig beschleunigte* Bewegung dar. Erfolgt der Fall entlang einer schiefen Ebene von dem Neigungswinkel α , so ist die Beschleunigung $g \sin \alpha$.

§ 2. Der Wurf. Wie im wesentlichen bereits Galilei feststellte, zeigt jeder bewegte Körper ein Bestreben, seine Bewegung als eine gleichförmige in der jeweiligen Richtung und mit dem Betrage der jeweiligen Geschwindigkeit fortzusetzen; dieses Bestreben wird als *Beharrungsvermögen* oder *Trägheit* bezeichnet.

Infolge des Beharrungsvermögens setzt sich die Bewegung, die ein *geworfener* Körper zurücklegt, nach dem Prinzip des *Bewegungsparallelogramms* aus einer gleichförmigen Bewegung in der Wurfrichtung und einer gleichförmig beschleunigten Fallbewegung zusammen.

Eine Wurfbewegung ergibt somit nur in dem speziellen Falle einer *vertikalen* Anfangsgeschwindigkeit eine geradlinige Bahn. Je nachdem, ob diese die Richtung des freien Falles hat oder ihr entgegengesetzt ist, unterscheiden wir den vertikalen Wurf abwärts und aufwärts. Bezeichnen wir den Betrag der Anfangsgeschwindigkeit mit u , so gelten für den *vertikalen Wurf abwärts* die Beziehungen

$$s = ut + \frac{1}{2}gt^2, \quad v = u + gt.$$

Der vertikale Wurf abwärts verläuft, wie es ja selbstverständlich ist, rascher als der freie Fall und unter Zurücklegung größerer Fallräume in gleichen Zeiten.

Für den vertikalen Wurf *aufwärts* ist in den letzten Gleichungen das Plus- durch ein Minuszeichen zu ersetzen. Für den Wurf aufwärts gelten also die Beziehungen

$$s = ut - \frac{1}{2}gt^2, \quad v = u - gt,$$

wobei aber jetzt Weg und Geschwindigkeit nach aufwärts positiv zu rechnen sind. Da sich der Körper solange aufwärts bewegt, bis seine Geschwindigkeit Null geworden ist, so folgt aus den letzten Gleichungen für die *Steigzeit*

$$t = \frac{u}{g}$$

und hieraus für die *Steighöhe*

$$s = \frac{u^2}{2g}.$$

Die vertikale Wurfgeschwindigkeit, die zu der Erreichung einer bestimmten Steighöhe erforderlich ist, ist also ebenso groß wie die Endgeschwindigkeit, die ein Körper bei dem freien Fall durch die Steighöhe erlangt. Mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 500 m/sec, wie sie Gewehrkugeln haben, würde ein Körper ungefähr 50 Sekunden lang bis zu einer Höhe von etwa 12 km steigen.

Im allgemeinen wird der Winkel, den die Wurfrichtung mit der Horizontalen einschließt, der *Elevationswinkel* genannt. Die tatsächliche Bewegung setzt sich nach dem Prinzip des *Bewegungsparallelogramms* aus einer gleichförmigen geradlinigen Bewegung in der Wurfrichtung und einer gleichförmig beschleunigten, geradlinigen Fallbewegung zusammen (Abb. 1).

Errichten wir daher in einer vertikalen Ebene, die auch die Wurfrichtung einschließt, ein Koordinatensystem so, daß die x -Achse horizontal und die y -Achse vertikal aufwärts gerichtet ist und der Ursprung des Koordinatensystems mit dem Ausgangspunkt der Wurfbewegung zusammenfällt, so sind nach Ablauf einer Zeit t , von dem Beginn der Wurfbewegung an gerechnet, die Koordinaten des geworfenen Körpers

$$x = u' t, \quad y = u'' t - \frac{1}{2} g t^2,$$

wobei u' die horizontale und u'' die vertikale Komponente der Wurfgeschwindigkeit sind (denn für y gilt die vorhin abgeleitete Formel des vertikalen Wurfes). Bezeichnen wir den Elevationswinkel mit α , und die Wurfgeschwindigkeit mit u , so ist aber

$$u' = u \cos \alpha, \quad u'' = u \sin \alpha.$$

Es wird somit

$$x = u t \cos \alpha, \quad y = u t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2.$$

Setzen wir hierin $y = 0$ und lösen wir nach t auf, so erhalten wir diejenige Zeit (t^*), in der der aufwärts geworfene Körper wieder das horizontale Ausgangsniveau erreicht, nämlich

$$u t^* \sin \alpha = \frac{1}{2} g t^{*2}$$

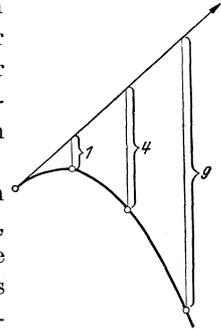


Abb. 1. Die Wurf-
bewegung.

oder

$$t^* = \frac{2 u \sin \alpha}{g}.$$

Setzen wir diesen Wert für t in die Formel für x ein, so erhalten wir die *Wurfweite*, nämlich diejenige Entfernung, in der der geworfene Körper wieder sein Ausgangsniveau erreicht. Wir finden so für die *Wurfweite*

$$x^* = \frac{2 u^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}$$

oder, da $2 \sin \alpha \cos \alpha$ gleich $\sin (2 \alpha)$ ist,

$$x^* = \frac{u^2}{g} \sin (2 \alpha).$$

Ein gegebenes Ziel kann daher mittels einer gegebenen Wurfgeschwindigkeit unter zwei verschiedenen, zueinander komplementären Elevationswinkeln erreicht werden, mittels einer steilen und einer flachen Bahn (Abb. 2); denn zwei Winkel, die einander zu 180° ergänzen (und das sind dann die beiden Werte von 2α), haben denselben Sinus.

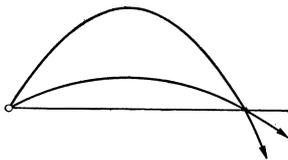


Abb. 2. Der schiefe Wurf.

Ist die Entfernung des zu erreichenden Zieles größer als $\frac{u^2}{g}$, so wird $\sin (2 \alpha)$ größer als Eins, so daß es dann keinen Winkel gibt, der der letzten Gleichung genügt. Das Ziel liegt dann zu weit, als daß es mit der gegebenen Wurfgeschwindigkeit erreicht werden könnte. Für eine gegebene Anfangsgeschwindigkeit u nimmt nach der letzten Gleichung x^* den größten Wert an, wenn $\sin (2 \alpha)$ gleich Eins wird. Die größte *Wurfweite* entspricht also einem Elevationswinkel von 45° .

Aus der früheren Gleichung für x finden wir

$$t = \frac{x}{u \cos \alpha}.$$

Setzen wir dies in der Formel für y ein, so ergibt sich

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{1}{2} g \frac{x^2}{u^2 \cos^2 \alpha}.$$

Hierfür können wir auch schreiben

$$x^2 + C' x = C'' y,$$

wobei C' und C'' Konstanten bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit und gegebener Wurfrichtung sind. Aus der analytischen Geometrie ist es aber bekannt, daß eine solche Beziehung die Gleichung einer *Parabel* ist, so daß sich die *Wurfbahn* als parabolisch ergibt.

§ 3. Die Zentripetalbeschleunigung. Bewegt sich ein Körper in einem *Kreise*, so müssen wir auch dann, wenn die Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit (v) erfolgt, eine *Beschleunigung* annehmen, die die ständige Abweichung von einer geraden Bahn erklärt. Legt der bewegte Körper z. B. in einer Zeit t' den kleinen Bogen AB zurück (Abb. 3), so stellt die Strecke AC die dieser Zeit entsprechende Abweichung von der geraden Bahn dar. C ist hierbei der Fußpunkt des Lotes, das von B auf den Durchmesser AOD gefällt wird. Die gegen den Mittelpunkt gerichtete Beschleunigung wird als die *Zentripetalbeschleunigung* bezeichnet.

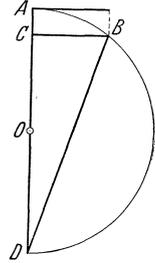


Abb. 3. Die Kreisbewegung.

Nun ist für eine gleichförmig beschleunigte Bewegung, wie die Fallgesetze zeigen, der Weg gleich dem halben Produkte aus der Beschleunigung und dem Quadrate der Zeit. Bezeichnen wir die Zentripetalbeschleunigung mit γ , so ist also

$$AC = \frac{1}{2} \gamma t'^2.$$

Andererseits ist

$$AB = vt',$$

wobei wir wegen der vorausgesetzten Kleinheit des Bogens diese Formel auch auf die Sehne AB anwenden dürfen.

Da der über dem Durchmesser konstruierte Winkel ABD als Winkel im Halbkreis bekanntlich ein rechter Winkel ist, besteht Ähnlichkeit zwischen den Dreiecken ABC und ABD ; es ist somit

$$\frac{AC}{AB} = \frac{AB}{AD}$$

oder

$$AC \cdot AD = AB^2.$$

Setzen wir für AC und AB die vorhin angegebenen Werte ein, so finden wir

$$\frac{1}{2} \gamma t'^2 \cdot 2r = v^2 t'^2$$

oder

$$\gamma = \frac{v^2}{r}.$$

Die Zentripetalbeschleunigung ist gleich dem durch den Bahnhalbmesser geteilten Geschwindigkeitsquadrat.

Wir können dieser Beziehung auch eine andere Form geben, wenn wir die *Umlaufszeit* T einführen. Das Produkt aus ihr und der Geschwindigkeit muß den Kreisumfang ($2\pi r$) ergeben. Es ist somit v gleich $\frac{2\pi r}{T}$ und daher

$$\gamma = \frac{4\pi^2 r}{T^2}.$$

§ 4. Die harmonische Schwingung. Wenn wir eine gleichförmig kreisende Bewegung auf einen Durchmesser des Kreises projizieren, so ergibt sich eine *schwingende, geradlinige Bewegung* um den Mittelpunkt des Kreises. Sie wird harmonische Bewegung genannt. Bezeichnen wir (Abb. 4) die jeweilige Entfernung von dem Mittelpunkt mit x und den Winkel, den der zu dem kreisenden Punkte gezogene Radius mit dem festen Durchmesser einschließt, mit ϑ , so ist die jeweilige Beschleunigung

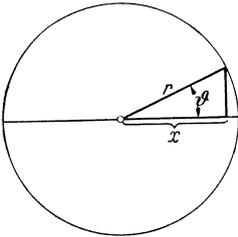


Abb. 4. Die harmonische Bewegung.

und

$$b = \gamma \cos \vartheta$$

$$x = r \cos \vartheta.$$

Es ist also

$$b = \frac{\gamma}{r} x,$$

d. h. die gegen das Zentrum gerichtete Beschleunigung ist stets dem Abstand von dem Zentrum proportional.

Setzen wir für γ den am Ende des § 3 abgeleiteten Wert ein, so finden wir

$$b = \frac{4\pi^2}{T^2} x.$$

Umgekehrt können wir, wenn wir von einer geradlinigen Bewegung wissen, daß sie mit einer gegen ein Zentrum gerichteten Beschleunigung

$$b = \alpha x$$

verbunden ist, sagen, daß diese Bewegung eine Schwingung um das Zentrum darstellt; dabei ist die Dauer einer vollen Schwingung (hin und her) durch die Beziehung gegeben

$$\tau = \frac{2\pi}{\sqrt{\alpha}}.$$

§ 5. Die Pendelbewegung. Unter einem Pendel versteht man jeden aufgehängten schweren Körper, der unter dem Einfluß seines Gewichtes schwingende Bewegungen ausführt. Wenn im besonderen die Masse des schweren Körpers in einem einzigen Punkte konzentriert gedacht und neben ihr die Masse der Aufhängevorrichtung vernachlässigt werden kann, so spricht man von einem *Fadenpendel* oder mathematischen Pendel. Der Winkel, den während der Schwingung die Fadenrichtung mit der Vertikalen einschließt, wird als *Elongation*, sein größter Wert als *Schwingungsweite* oder *Amplitude* bezeichnet.

Die auf das Pendel wirkende vertikale Fallbeschleunigung können wir in zwei zueinander senkrechte Komponenten zerlegen, eine in der Richtung des Pendelfadens und eine dazu senkrechte. Jene sei in Abb. 5 durch die Strecke AB , diese durch die Strecke AC und die vertikale Fallbeschleunigung durch die Strecke AD dargestellt. Die erste Komponente kann wegen der Spannung des Fadens nicht zur Geltung kommen; es bleibt nur die zweite übrig, und ihr entspricht eine Beschleunigung $g \cdot \sin \varphi$, wenn φ der Elongationswinkel ist. Für kleine Elongationen, auf deren Betrachtung wir uns beschränken wollen, hängt aber die Elongation x mit der Pendellänge l durch die Beziehung zusammen

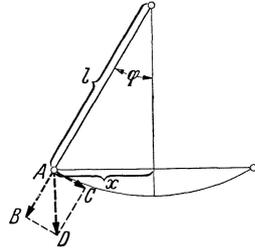


Abb. 5. Die Pendelbewegung.

$$x = l \sin \varphi,$$

und daher wird die Beschleunigung gegen die Ruhelage

$$b = \frac{g}{l} x.$$

Nach dem am Ende von § 4 Gesagten ergibt dies eine Schwingungsdauer

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Die Schwingungsdauer ist sonach bei kleinen Ausschlägen des Pendels nicht nur von der Elongation, sondern auch von dem Gewicht und der stofflichen Beschaffenheit des Pendels unabhängig, wie bereits Galilei um 1590 feststellte.

Ein Pendel, das zu einer halben Schwingung eine Sekunde

braucht, wird als *Sekundenpendel* bezeichnet. Seine Länge beträgt angenähert 1 m; die genaue Ausmessung seiner Länge ermöglicht eine genaue Bestimmung von g .

§ 6. Die Kraft. Infolge des Beharrungsvermögens muß eine besondere Ursache für einen Übergang eines Körpers aus dem Zustand der Ruhe, aber auch für jede Abweichung von der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung angenommen werden. Eine solche Ursache wird als *Kraft* bezeichnet, wobei aber sorgfältig zwischen wirksamen und bloß auslösenden Ursachen unterschieden werden muß.

Da die Erfahrung zeigt, daß die Wirkung einer Kraft immer durch einen in bestimmter Richtung ausgeübten Zug eines bestimmten Gewichtes aufgehoben werden kann, so kann eine Gewichtseinheit auch als technische Einheit der Kraft verwendet werden; man wählt hierfür das Kilogrammgewicht.¹

Greifen an einem Körper gleichzeitig mehrere Kräfte an, so sagt man, daß sie sich untereinander im *Gleichgewicht* befinden, wenn sie in ihren Wirkungen einander wechselseitig aufheben, wenn also trotz ihres Vorhandenseins der angegriffene Körper in Ruhe bleibt. Zwei in einem Punkte angreifende Körper halten einander das Gleichgewicht, wenn sie bei gleichem Betrag entgegengesetzte Richtung haben. Die gemeinsame Wirkung zweier gleichzeitig in einem Punkte angreifender Kräfte läßt sich stets durch die Wirkung einer einzigen *resultierenden* Kraft ersetzen, deren Größe und Richtung sich, wie schon um 1600 Stevin fand, nach dem Prinzip des *Kräfteparallelogramms* ergibt; sind nämlich die zusammenwirkenden Kräfte nach Größe und Richtung durch die Seiten eines Parallelogramms dargestellt, so ist die Resultierende durch die Diagonale repräsentiert. Drei in einem Punkt angreifende Kräfte halten somit einander das Gleichgewicht, wenn die Resultierende aus zwei Kräften der dritten Kraft entgegengesetzt gleich ist.

§ 7. Die Newtonschen Bewegungsgesetze. Die exakte Formulierung der grundlegenden mechanischen Prinzipie verdanken wir Newton, der (1687) als die allgemeinsten Bewegungsgesetze die folgenden drei sogenannten *Axiome* aufstellte:

¹ Das Kilogrammgewicht ist das Gewicht, das der Masse von 1000 Gramm in der geographischen Breite von 45° und im Niveau des Meeresspiegels zukommt.

1. Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, jenen Zustand zu ändern.

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

3. Jeder Wirkung ist stets eine Gegenwirkung entgegengesetzt und gleich.

Das erste Bewegungsgesetz wird auch als *Beharrungs-* oder *Trägheitsgesetz* bezeichnet, weil es die Tatsache des Beharrungsvermögens zum Ausdruck bringt. Das zweite Bewegungsgesetz heißt auch *Newtonsches Kraftgesetz*. Es lehrt, daß die Beschleunigung in der Richtung der wirkenden Kraft erfolgt und in ihrem Betrage der Kraft proportional ist. Der Quotient aus einer Kraft und der durch sie an einem Körper hervorgerufenen Beschleunigung stellt somit eine charakteristische Konstante des Körpers dar, die seine *Masse* genannt wird.

Als Einheit der Masse gilt das *Gramm*; es ist als der tausendste Teil der Masse eines bei Paris verwahrten Platinzylinders definiert und entspricht ziemlich genau der Masse von 1 Kubikzentimeter Wasser bei 4⁰ C. Als absolute Einheit der Kraft erscheint nach dem Newtonschen Kraftgesetz eine Kraft, die der Masse von 1 g eine Beschleunigung von 1 cm sec⁻² erteilt. Diese Einheit wird als *Dyn* bezeichnet (nach dem griechischen Worte Dynamis = Kraft); es ist also 1 Dyn = 1 g cm sec⁻² (denn die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung).

Da die Masse eines Gramms durch ihr eigenes Gewicht die Beschleunigung g , also von 981 cm sec⁻² erfährt, ist die technische Krafteinheit, das Kilogrammgewicht, gleich $9,81 \cdot 10^5$ Dyn, und umgekehrt entspricht ein Dyn dem Gewichte von 1,02 mg. Es ist wohl zu beachten, daß zwar nicht die Masse, wohl aber das Gewicht eines Körpers vom Orte abhängig ist.

Einfache Beobachtungen bestätigen, daß ein Körper, der sich infolge einer äußeren Einwirkung ungleichförmig oder auch nur krummlinig bewegt, sogleich in geradlinige gleichförmige Bewegung übergeht, wenn jene Ursache zu wirken aufhört. Wenn wir etwa einen schweren Gegenstand an einer Schnur befestigen und, indem wir deren anderes Ende in der Hand fest-

halten, im Kreise herumschwingen, so fliegt der Gegenstand in tangentialer Richtung fort, sobald wir die Schnur loslassen.

Besonders deutlich zeigt sich der Übergang aus der ungleichförmigen in die gleichförmige Bewegung bei der Atwoodschen Fallmaschine.

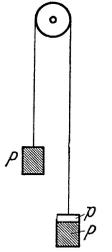


Abb. 6. Die Atwoodsche Fallmaschine.

Über eine um ihre Achse drehbare Rolle ist bei diesem Apparat ein Faden gelegt, der an beiden Enden zwei gleiche Gewichte P , an einem aber überdies ein kleines Übergewicht p trägt, das so geformt ist, daß es während des Niedergehens mittels einer geeigneten Vorrichtung aufgefangen werden kann (Abb. 6). Die messenden Beobachtungen zeigen in der Tat, daß die Bewegung mit mäßiger konstanter Beschleunigung erfolgt, daß aber von dem Augenblicke an, da das Gewicht abgehoben wird, die Beschleunigung wegfällt und die Geschwindigkeit konstant bleibt.

Aus dem Beharrungsvermögen erklärt es sich auch, daß ein in einem fahrenden Eisenbahnzug niederfallender Körper einem mitfahrenden Beobachter genau vertikal zu fallen scheint. Denn bis zu dem Beginne der Fallbewegung nimmt der Körper an der Bewegung des Zuges teil, und infolge seines Beharrungsvermögens behält er diese Bewegung als Komponente auch während des Falles bei.

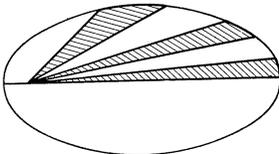


Abb. 7. Das erste Keplersche Gesetz.

Infolgedessen legt der Körper in der Zeit des Niederfallens in waagrechter Richtung eine Strecke zurück, die ebenso groß ist wie diejenige, um die sich in derselben Zeit der Zug vorwärtsbewegt.

§ 8. Die Planetenbewegungen. Unter den beobachtbaren mechanischen Vorgängen erregten die Bewegungen der Himmelskörper nicht nur wegen ihrer

Großartigkeit, sondern vor allem auch deshalb stets ein besonderes Interesse, weil bei ihnen das Fehlen merklicher Bewegungshindernisse mit einer außerordentlichen Meßgenauigkeit vereint ist. Die Gesetzmäßigkeiten der *Planetenbewegungen* fanden einen exakten Ausdruck zuerst in den drei *Keplerschen Gesetzen* (1609 bzw. 1619).

Das erste Keplersche Gesetz lehrt, daß der von der Sonne zu einem Planeten gezogene gerichtete Strahl oder Radiusvektor in gleichen Zeiten stets *gleiche Flächen* durchstreicht (Abb. 7).

Das zweite Keplersche Gesetz sagt aus, daß die Planetenbahnen *Ellipsen* sind, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet (vgl. Abb. 7). Nach dem dritten Keplerschen Gesetz verhalten sich die Quadrate der *Umlaufzeiten* der verschiedenen Planeten untereinander wie die dritten Potenzen der großen Achsen ihrer Bahnen. Die Keplerschen Gesetze zeigen sich auch für die Bewegungen erfüllt, die die Trabanten der einzelnen Planeten um diese ausführen.

§ 9. Das Gravitationsgesetz. Das Gesetz der die Planetenbewegungen beherrschenden Kraft ist aus den Keplerschen Beziehungen zuerst von Newton (1687) auf Grund seines Kraftgesetzes abgeleitet worden. Aus dem ersten Keplerschen Gesetz konnte Newton rein mathematisch deduzieren, daß die Beschleunigung der Planeten stets gegen die Sonne gerichtet ist. Aus den geometrischen Eigenschaften der Ellipse folgt wiederum, wie Newton bewies, daß die Beschleunigung in einer Planetenbahn dem Quadrate der jeweiligen Entfernung von der Sonne umgekehrt proportional ist. Aus dem dritten Keplerschen Gesetz konnte schließlich Newton ableiten, daß die Beschleunigung, die die Sonne an einem Planeten hervorbringt, nur von der Entfernung abhängt, hingegen von allen individuellen Eigenschaften des Planeten unabhängig ist.

Newton konnte ferner zeigen, daß auch die Bewegung des *Mondes* um die Erde durch die irdische *Schwere* erklärt werden kann, wenn man annimmt, daß diese im umgekehrt quadratischen Verhältnis mit der Entfernung vom Erdmittelpunkt abnimmt. Der durchschnittliche Abstand des Mondes von der Erde beläuft sich nämlich auf 384400 km, während seine durchschnittliche Umlaufzeit $27\frac{1}{3}$ Tage oder ungefähr 2360000 Sekunden beträgt. Berechnen wir hieraus die Zentripetalbeschleunigung, indem wir in dem früher dafür angegebenen Ausdruck, nämlich $\frac{4\pi^2 r}{T^2}$, für r und T die Werte in Zentimetern und Sekunden angeben, so finden wir für diese Beschleunigung

$$\gamma = 0,272 \text{ cm sec}^{-2}.$$

Vergleichen wir diesen Wert mit der Beschleunigung des irdischen Falls, nämlich 980 cm sec^{-2} , so ergibt sich das Verhältnis

$$\frac{g}{\gamma} = 3600.$$

Die Kraft, die die Zentralbewegung des Mondes hervorbringt, erteilt also diesem tatsächlich eine Beschleunigung, die gegenüber der irdischen Fallbeschleunigung im Verhältnis $1:60^2$ verkleinert ist, während andererseits die Entfernung des Mondes von dem Erdzentrum dem 60fachen Erdradius gleich ist. Newton hielt somit den Schluß für gerechtfertigt, daß die Kräfte, die die Sonne auf die Planeten, die die großen Planeten auf die Trabanten, die die Erde auf den Mond und auf die schweren Körper auf ihrer Oberfläche ausüben, untereinander wesensgleich sind und nur spezielle Fälle einer *universellen Gravitation* darstellen, die von jedem beliebigen Körper des Weltalls auf jeden beliebigen anderen ausgeübt wird. Da aber die Planetenbeschleunigungen von den Massen der Planeten unabhängig und dem Quadrate der Entfernung von der Sonne umgekehrt proportional sind, muß nach dem zweiten Newtonschen Bewegungsgesetz sowie dem Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung das Gravitationsgesetz die Form haben

$$K = f \frac{m_1 m_2}{r^2};$$

dabei bedeuten m_1 und m_2 die Massen der beiden einander anziehenden Körper, r deren Entfernung und f eine universelle Konstante, die sogenannte *Gravitationskonstante*.

Durch die Beobachtung der Bewegungen der *Doppelsterne* ist die Gültigkeit des Newtonschen Gravitationsgesetzes noch in Entfernungen erwiesen worden, die millionenmal größer sind als die Distanz der Sonne von uns.

Cavendish hat im Jahre 1798 mittels schwerer Bleikugeln zuerst die allgemeine Massenanziehung auch durch einen Laboratoriumsversuch nachgewiesen und damit zuerst eine Bestimmung der Gravitationskonstanten durchgeführt. Aus der gemessenen Kraft und den bekannten Massen zweier einander anziehender Metallkugeln fand er für f den Wert $6,7 \cdot 10^{-8}$ in absoluten Einheiten, d. h. dieser Wert ist in der Gravitationsformel einzusetzen, wenn in ihr die Massen in Gramm, die Entfernung in Zentimetern und die Kraft in Dyn ausgedrückt sind. Aus dieser Formel findet man für die „Dimension“ der Gravitationskonstanten $g^{-1} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-2}$. Auf Grund moderner, mit besonderer Genauigkeit durchgeführter Messungen wird gegenwärtig die

Gravitationskonstante zu $6,68 \cdot 10^{-8}$ mit einer Fehlergrenze von etwa 3 Promille angenommen.

Da die Fallbeschleunigung g gleich sein muß $\frac{fM}{R^2}$, wenn M und R Masse und Radius der Erde bedeuten, so kann aus dem wohlbekannten Halbmesser der Erde und dem Werte von f auch die mittlere *Dichte der Erde* ermittelt werden; sie ergibt sich, auf die Dichte des Wassers bezogen, zu 5,1.

Die Anziehung, die auf die Erde seitens des *Mondes* ausgeübt wird, äußert sich in der Erscheinung von *Flut* und *Ebbe*. Da nach dem Gravitationsgesetz die Anziehung auf der dem Monde zugewandten Seite stärker als auf der gegenüberliegenden ist, zieht der Mond auf der zugewandten Seite das Meer von der Erde, auf der abgewandten hingegen die Erde von dem Meere weg. An beiden Stellen tritt Flut ein. Da der Mond infolge seines Umlaufs um die Erde täglich um etwa $\frac{3}{4}$ Stunden später als an dem Vortag aufgeht, so rotiert in bezug auf den Mond ein Punkt der Erde mit einer Periode von ungefähr $24\frac{3}{4}$ Stunden. Innerhalb dieser Periode tritt also für jeden Punkt der Meeresküste *zweimal* Flut und *zweimal* Ebbe ein.

§ 10. Die Zentrifugalkraft. Ein Körper, der sich mit konstanter Geschwindigkeit in einem Kreise vom Radius r mit einer Umlaufzeit T bewegt, erfährt, wie wir sahen, eine gegen den Kreismittelpunkt gerichtete Zentripetalbeschleunigung im Betrage $\frac{4\pi^2 r}{T^2}$. Das Beharrungsvermögen des kreisförmig bewegten Körpers äußert sich im Sinne des dritten Newtonschen Bewegungsgesetzes in dem Auftreten einer *Zentrifugal-* oder *Fliehkraft*, die vom Zentrum weggerichtet und dem Produkte aus der Zentripetalbeschleunigung und der Masse (m) gleich ist, also

$$K = \frac{4\pi^2 m r}{T^2}.$$

Diese Formel kann durch mannigfache Versuche an der sogenannten Schwungmaschine experimentell bestätigt werden. Auf der Tatsache der Zentrifugalkraft beruht die bekannte Überhöhung der äußeren Bahnschiene bei Bahnkrümmungen sowie die Gepflogenheit von Läufern oder Radfahrern, sich bei dem Durchsetzen einer Kurve nach innen zu neigen, um nicht das Gleichgewicht zu verlieren.

Die durch die *Erdrotation* hervorgerufene Fliehkraft äußert sich in einer Verminderung der Fallbeschleunigung in der Richtung von den Polen zum Äquator; dieser Effekt wird allerdings noch durch die Abplattung der Erde erhöht, die ebenfalls eine Folge der Erdrotation ist. An den Polen beträgt die Fallbeschleunigung 983, am Äquator hingegen nur 978 cm sec^{-2} .

Unter den zahlreichen technischen Anwendungen der Fliehkraft sind vor allem die Zentrifugen wichtig, die der Trennung flüssiger von festen Stoffen oder von spezifisch leichteren von spezifisch schwereren Substanzen dienen, sowie der Zentrifugalregulator und eine bestimmte Art von Tourenzählern.

§ 11. Die Coriolis-Kraft. Die Erdrotation beeinflusst die auf der Erdoberfläche sich abspielenden Bewegungsvorgänge in zweifacher Weise: einerseits durch das Auftreten der schon erörterten Fliehkraft, andererseits durch Geltendmachung einer Zusatzkraft, die senkrecht zur Bewegungsrichtung und senkrecht zur Richtung der Erdachse ist. Diese Zusatzkraft wird nach ihrem Entdecker gewöhnlich als *Coriolis-Kraft* bezeichnet.

Bei dem freien Fall bewirkt die Coriolis-Kraft stets eine östliche Abweichung von der Lotrichtung; sie beträgt bei einer Fallhöhe von 100 m in der geographischen Breite von 48° 1,46 cm. Horizontale Bewegungen suchen auf der nördlichen Erdhälfte nach rechts, auf der südlichen nach links abzuweichen, was sich in großem Maßstab bei den *Passatwinden* zeigt. Für ein mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 500 m/sec horizontal abgefeuertes Geschöß beträgt die durch die Coriolis-Kraft verursachte seitliche Ablenkung in der geographischen Breite von Mitteleuropa nach einer Sekunde ungefähr 27 mm, nach zwei Sekunden viermal soviel usw.

Am anschaulichsten und überzeugendsten offenbart sich der Einfluß der Erdrotation auf die irdischen Bewegungsvorgänge in dem Foucaultschen *Pendelversuch* (1850). Die Schwingungsebene eines Pendels, das sich ohne eine seitliche Anfangsgeschwindigkeit bewegt, dreht sich für einen irdischen Beobachter, und zwar in einem Tage um einen Winkel, der sich durch Multiplikation von 360° mit dem Sinus der geographischen Breite ergibt. Auf der nördlichen Erdhälfte erfolgt die Drehung, von oben gesehen, im Sinne des Uhrzeigers.

§ 12. Arbeit und Energie. Das Produkt aus einer bewegten

Masse und ihrer Geschwindigkeit wird als *Bewegungsgröße* oder *Impuls* bezeichnet, das halbe Produkt aus der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit als *lebendige Kraft* oder Bewegungsenergie oder *kinetische Energie*.

Bewegt sich ein Körper in der Richtung einer konstanten Kraft, so wird das Produkt aus dem Betrag der Kraft und einem bestimmten Stück des Weges als die *Arbeit* bezeichnet, die auf diesem Wegstück verrichtet wird. Ist die Kraft veränderlich, so können wir nur von der Arbeit sprechen, die längs eines Weges verrichtet wird. Fallen schließlich, um den allgemeinsten Fall zu betrachten, die Richtungen der Kraft und des Weges nicht zusammen, so definiert man die Arbeit als das Produkt aus der wirkenden Kraft und der Projektion des Wegstückes auf die Krafrichtung. Nennen wir die Kraft K , das Wegelement Δs und den Winkel, den die Krafrichtung mit der Bewegungsrichtung einschließt, φ (Abb. 8), so ist also die Arbeit auf dem Wegelement, die ΔA genannt werde, gleich

$$\Delta A = K \Delta s \cdot \cos \varphi.$$

Je nachdem, ob der Winkel φ spitz oder stumpf ist, wird von *geleisteter* oder *verbrauchter* Arbeit gesprochen.

Da nach dem früher Gesagten die lebendige Kraft

$$L = \frac{1}{2} m v^2$$

ist, wenn m die Masse des Körpers ist, so folgt für die Änderung der lebendigen Kraft ΔL in dem Zeitelement Δt , in dem die Geschwindigkeit sich von v in $(v + \Delta v)$ ändert,

$$\Delta L = \frac{1}{2} m [(v + \Delta v)^2 - v^2]$$

oder, wenn wir wegen der Kleinheit von Δv die Größe $(\Delta v)^2$ vernachlässigen,

$$\Delta L = m v \Delta v.$$

Nun ist andererseits nach dem zweiten Newtonschen Bewegungsgesetz die Kraft gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung, also, wenn die Geschwindigkeitsänderung um Δv in dem Zeitelement Δt erfolgt,

$$K = m \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

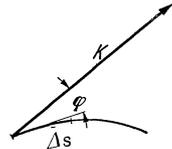


Abb. 8. Die Arbeit.

Ein Vergleich der letzten zwei Beziehungen liefert die Formel

$$\Delta L = K v \Delta t$$

oder, da das Produkt aus v und Δt das Wegelement Δs darstellt, das in dem Zeitelement Δt zurückgelegt wird,

$$\Delta L = K \Delta s.$$

Die Ableitung wurde hier allerdings nur für den Sonderfall der Richtungsgleichheit von Kraft und Weg gegeben, ist aber verallgemeinerbar und führt somit zu der Beziehung, daß die längs eines Wegstückes verrichtete Arbeit der Änderung gleich ist, die die lebendige Kraft während der Zurücklegung des Wegstückes erfährt.

Eine absolute Arbeitseinheit, die man als *Erg* bezeichnet, wird durch das Produkt aus 1 Dyn und 1 cm dargestellt; es ist daher $1 \text{ Erg} = 1 \text{ g cm}^2 \text{ sec}^{-2}$. Als praktische Arbeitseinheit gilt in der Technik das *Kilogramm-Meter*; es ist diejenige Arbeit, die verrichtet werden muß, um ein Gewicht von 1 kg 1 m hoch zu heben; aus der Beziehung zwischen Dyn und Kilogrammgewicht folgt, daß

$$1 \text{ kg m} = 9,81 \cdot 10^7 \text{ Erg}$$

ist.

Die auf die Zeiteinheit bezogene Arbeit wird als *Effekt* oder *Leistung* bezeichnet. Die absolute Einheit des Effektes ist also das Erg pro Sekunde; als technische Einheit gilt hingegen die *Pferdestärke* (PS); sie ist als der Effekt definiert, bei dem die Arbeit pro Sekunde 75 kg m beträgt und ist gleich $7,36 \cdot 10^9$ Erg pro Sekunde.

§ 13. Die potentielle Energie. In den meisten für physikalische Untersuchungen wichtigen Fällen läßt sich innerhalb des räumlichen Gebietes, in dem eine Kraft wirksam ist, jedem Punkte eine als *mechanisches Potential* bezeichnete Größe derart zuordnen, daß die Arbeit, die auf einem beliebigen Wege von einem Punkte A zu einem Punkte B verrichtet wird, einfach gleich ist dem Unterschiede der Werte, die das mechanische Potential in den Punkten A und B aufweist; die Form und die Länge des von A nach B führenden Weges sind dabei gleichgültig.

Eine Kraft besitzt, wie sich aus dem zweiten Newtonschen Bewegungsgesetz deduzieren läßt, immer dann ein Potential, wenn sie nach einem bestimmten Punkte gerichtet ist und nur von der

Entfernung von diesem Punkte abhängt; dies trifft also jedenfalls auch für die Schwerkraft zu. Im irdischen Schwerfeld ist das mechanische Potential durch die Höhenlage bestimmt, und die gewonnene lebendige Kraft hängt somit nur von dem durchlaufenen *Höhenunterschied* ab, ist also z. B. dieselbe für den freien Fall und eine Abwärtsbewegung längs einer schiefen Ebene.

Ist nun ein Potential vorhanden, so ist die Arbeit, die auf dem Wege zwischen zwei Punkten *A* und *B* verrichtet wird, nach der Definition des Potentials gleich

$$A = \Delta V,$$

wenn ΔV der Potentialunterschied zwischen *A* und *B* ist. Andererseits ist nach dem im vorhergehenden Abschnitt Gesagten

$$A = -\Delta L,$$

nämlich gleich der Abnahme der lebendigen Kraft.

Es muß also

$$\Delta V = -\Delta L$$

sein oder es muß die Summe

$$L + V$$

eine von Ort und Zeit unabhängige *Konstante* darstellen, die als die mechanische *Energie* des bewegten Körpers bezeichnet wird; statt von mechanischem Potential spricht man allgemein auch von *potentieller Energie*. Die Summe aus ihr und der kinetischen Energie ergibt die konstant bleibende mechanische Energie.

Wie unter Zuhilfenahme des dritten Newtonschen Bewegungsgesetzes gezeigt werden kann, gilt die Konstanz oder „Erhaltung“ der mechanischen Energie nicht nur für die Bewegung eines einzelnen Körpers, sondern auch für die Bewegungen einer Gruppe von Körpern, die wechselseitig aufeinander Kräfte ausüben.¹ Es läßt sich ferner zeigen, daß für solche Gruppen von Körpern stets auch die gesamte *Bewegungsgröße* erhalten bleibt.

Letzterem Satz kann man auch eine andere einfache Fassung bei Benutzung des Begriffes des *Schwerpunktes* oder *Massenmittelpunktes* geben. Man definiert als Mittelpunkt zweier Massen den-

¹ Es müssen dies allerdings solche Kräfte sein, die in der Richtung der Verbindungslinien wirken und ein Potential besitzen.

jenigen Punkt, der die Verbindungsstrecke im umgekehrten Verhältnis der Massen teilt, also in Abb. 9

$$AS : SB = m_2 : m_1.$$

Den Mittelpunkt dreier Massen erhält man, indem man zunächst den Schwerpunkt zweier Massen bestimmt, in diesem sich eine

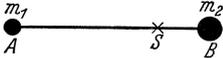


Abb. 9. Der Schwerpunkt.

Masse befindlich denkt, die der Summe der beiden Massen gleich ist, und nun für sie und die dritte Masse den Mittelpunkt bestimmt und so fort. Der Schwerpunkt eines Systems von Körpern, auf das keine Kräfte von außen wirken, muß ruhen oder in geradliniger gleichförmiger Bewegung fortschreiten. Wirken Kräfte von außen, so verhält sich das System so, als ob seine ganze Masse im Schwerpunkt vereinigt wäre und an dieser die Kräfte angreifen würden; darum setzt z. B. der Schwerpunkt einer Granate auch nach deren Explosion die frühere parabolische Bahn fort.

§ 14. Die Zusammensetzung der Kräfte an einem starren Körper. Bei den bisherigen Betrachtungen von Bewegungsvorgängen blieb die tatsächliche räumliche Ausdehnung der bewegten Objekte noch unberücksichtigt. Daß aber diese Vernachlässigung keineswegs allgemein berechtigt ist, geht schon aus der elementaren Erfahrungstatsache hervor, daß bei einem Körper sehr wohl einzelne Teile in Ruhe und andere wieder in Bewegung begriffen sein können. Im allgemeinen muß daher unterschieden werden, in welchem Teile eines Körpers eine Kraft angreift. Zunächst mögen solche Körper betrachtet werden, die unter der Einwirkung

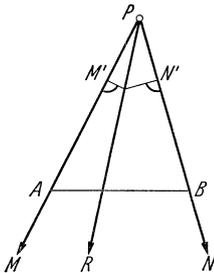


Abb. 10. Zusammensetzung von Kräften am starren Körper.

äußerer Kräfte weder ihre Gestalt noch ihr Volumen ändern und darum als *starr* bezeichnet werden.

Für die Mechanik starrer Körper ist natürlich die Frage der Zusammensetzung angreifender Kräfte von grundlegender Bedeutung. Als einfacher Sonderfall möge zunächst die Zusammensetzung zweier Kräfte betrachtet werden, deren Angriffsrichtungen in einer und derselben Ebene liegen. Es mögen etwa (Abb. 10) die Angriffspunkte der beiden Kräfte A und B sein, während sie

selbst durch die gerichteten Strecken AM und BN dargestellt seien. Um die Angriffsrichtung der Resultierenden zu finden, gehen wir von der selbstverständlichen Tatsache aus, daß man den Angriffspunkt einer Kraft in der Angriffsrichtung beliebig verlegen kann, ohne an der Wirkung etwas zu ändern, die durch diese Kraft an dem Körper hervorgebracht wird. Wir verlängern somit die Strecken AM und BN bis zu ihrem Schnittpunkt, der mit P bezeichnet werde. Damit erscheint das Problem auf den einfacheren Fall der Zusammensetzung zweier in demselben Punkte angreifender Kräfte zurückgeführt. Wir tragen also von P aus auf den beiden in P sich schneidenden Geraden die Strecken PM' und PN' auf, die den Strecken AM und BN gleich seien. Die Diagonale des Parallelogramms, dessen drei Ecken von den Punkten P , M' und N' gebildet werden, stellt dann die resultierende Kraft nach Betrag und Angriffsrichtung dar.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Frage, in welchem Verhältnis die Verbindungslinie der beiden Angriffspunkte, also die Strecke AB durch die Angriffsrichtung der Resultierenden geteilt wird. Zu der Beantwortung dieser Frage

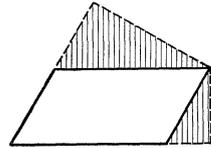


Abb. 11 Die Lote auf die Seiten eines Parallelogramms.

benutzen wir einen leicht ableitbaren geometrischen Satz. Wir verlängern zwei zusammenstoßende Seiten eines beliebigen Parallelogramms und fällen auf diese Verlängerungen von der gegenüberliegenden Ecke des Parallelogramms Lote (Abb. 11). Die beiden so entstehenden Dreiecke sind ähnlich, und daher müssen sich die Längen der beiden Lote umgekehrt wie die Längen der Parallelogrammseiten verhalten, auf deren Verlängerungen sie gefällt werden. Diese Beziehung bleibt natürlich auch dann gewahrt, wenn statt der vierten Ecke des Parallelogramms ein beliebig in der Diagonale oder in deren Verlängerung gelegener Punkt gewählt wird.

Man bezeichnet nun ganz allgemein das Produkt aus einer Kraft und dem Perpendikel, das von einem beliebigen Punkt auf die Kraftrichtung gefällt wird, als das *statische Moment* der Kraft in bezug auf jenen Punkt. Die resultierende Kraft-richtung ist also dadurch ausgezeichnet, daß für jeden ihrer Punkte das statische Moment der beiden Einzelkräfte gleich groß ist.

Zwei gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kräfte heben einander in ihrer Wirkung auf einen starren Körper auf, wofern die Verbindungslinie ihrer Angriffspunkte mit ihrer Angriffsrichtung zusammenfällt.

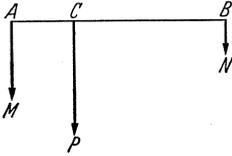


Abb. 12. Zusammensetzung paralleler Kräfte.

Greifen andererseits in zwei Punkten A und B zwei beliebige, jedoch parallel und gleich gerichtete Kräfte an, die durch die Strecken AM und BN dargestellt seien, so ist nach dem Momentensatz der Schnittpunkt C der Resultierenden und der Verbindungsstrecke (Abb. 12) durch die Proportion bestimmt,

$$AC : CB = BN : AM = Q : P.$$

Dabei bedeuten P und Q die Beträge der Einzelkräfte, und der Betrag der Resultierenden ist der Summe ($P + Q$) gleich. Sind hingegen die Kräfte P und Q entgegengesetzt gerichtet oder, wie man sagt, *antiparallel*, so muß die Proportion erfüllt sein (vgl. Abb. 13)

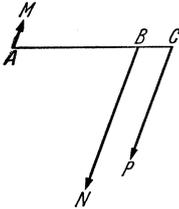


Abb. 13. Zusammensetzung antiparalleler Kräfte.

$$AC : BC = Q : P;$$

der Betrag der Resultierenden ist dann $Q - P$.

Im Falle zweier gleich großer antiparalleler Kräfte rückt jedoch der Punkt C ins Unendliche; es ist somit unmöglich, die vereinte Wirkung der beiden gleichen, antiparallelen Kräfte durch eine einzige Kraft aufzuheben, denn die Kombination jener beiden Kräfte läßt eine Zusammensetzung zu einer Resultierenden überhaupt nicht zu.

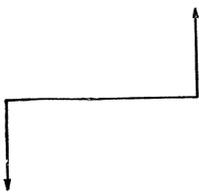


Abb. 14. Das Kräftepaar.

Das System der beiden Kräfte (Abb. 14) sucht vielmehr eine drehende Bewegung des Körpers hervorzubringen, und zwar in dem Sinn der Drehung, die auf kürzestem Wege die parallelen Richtungen der beiden Kräfte zur Deckung bringt.

Ein System von zwei gleichen antiparallelen Kräften wird darum als Drehpaar oder *Kräftepaar* bezeichnet. Als charakteristische Größe eines solchen Paares erscheint das Produkt aus dem Betrag einer der beiden gleichen Einzelkräfte und dem senkrechten Abstand der beiden Kraftrichtungen. Dieses Produkt wird als das *Moment* des Kräftepaars bezeichnet.

Sämtliche an einem starren Körper angreifenden Kräfte lassen sich stets zu einer einzigen Kraft und einem einzigen Kräftepaar vereinigen. Nur dann, wenn sowohl die resultierende Kraft als auch das resultierende Kräftepaar verschwinden, ist *Gleichgewicht* des Körpers möglich.

Das Gleichgewicht eines aufgehängten oder gestützten *schweren* Körpers ist *stabil* oder *labil*, je nachdem, ob der Schwerpunkt die tiefste oder höchste mögliche Lage hat. Die Stabilität eines Gleichgewichtes ist durch die als *Standfestigkeit* bezeichnete Kraft bestimmt, die erforderlich ist, um den Körper aus seiner gegebenen Gleichgewichtslage in ein labiles Gleichgewicht überzuführen. Die Standfestigkeit eines auf horizontaler Grundlage ruhenden Körpers ist z. B. der Breite der Grundfläche sowie dem Gewicht direkt, hingegen der Erhebung des Schwerpunktes über die Grundfläche umgekehrt proportional.

§ 15. Die mechanischen Maschinen. Unter einer mechanischen Maschine im einfacheren Sinne dieses Wortes

versteht man eine Vorrichtung, die es gestattet, eine einem bestimmten Vorhaben hinderliche und kurz als *Last* bezeichnete Kraft durch Anwendung einer anderen Kraft von geringerer Größe oder anderer als unmittelbar entgegengesetzter Richtung zu überwinden. Der Wert, den im Gleichgewichtsfalle das Verhältnis von Last zu Kraft annimmt, wird als *Übersetzungsverhältnis* bezeichnet.

Die feste *Rolle* wirkt nur richtungändernd. An der losen Rolle (Abb. 15) ist das Übersetzungsverhältnis $\frac{1}{2}$. Eine Kombination von festen und losen Rollen wird durch den *Flaschenzug* dargestellt. Eine Verbindung zweier fester Rollen von verschiedenen Radien (von denen die größere auch durch eine Kurbel ersetzt sein kann), wird als *Wellrad* bezeichnet; durch das Verhältnis der beiden Radien (Abb. 16) ist das Übersetzungsverhältnis gegeben. Zu den Wellrädern gehören auch die Zahnräder.

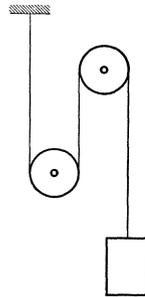


Abb. 15. Die lose Rolle.

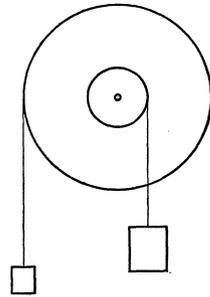


Abb. 16. Das Wellrad.

Ein um eine feste Achse drehbarer starrer Körper stellt als *Hebel* eine besonders einfache Maschine dar; im Gleichgewichtsfalle verhält sich die Kraft zur Last umgekehrt wie die zugehörigen Hebelarme, unter denen man die Abstände der beiden Kraftrichtungen von der Drehachse versteht.

Eine *schiefe Ebene* gestattet die Reduktion der Kraft im Verhältnis von $\sin \alpha : 1$, wenn α der Neigungswinkel der Ebene ist und die Kraft in der Richtung der Länge der schiefen Ebene angreift. Auf die Probleme der schiefen Ebene sind auch diejenigen der *Schraube* und des *Keiles* zurückführbar.

Ganz allgemein kann durch eine Maschine zwar die zur Arbeitsleistung erforderliche Kraft vermindert, jedoch nie Arbeit gespart werden. Ist bei einer Maschine die Kraft nur dem n -ten Teile der Last gleich, so muß sie dafür auf einer Strecke aufgewendet werden, die n -mal so groß wie diejenige ist, um die die Last gehoben wird.

§ 16. Die Waage. Der gleicharmige Hebel findet eine wichtige Anwendung als Waage. Damit eine Waage richtig sei, müssen die Waagbalken möglichst gleich lang und gleich schwer und auch die Waagschalen und deren Aufhängevorrichtungen möglichst gleich beschaffen sein; die Einstellung der Waage darf durch ein Vertauschen zweier gleicher Gewichte auf verschiedenen Seiten nicht beeinflußt werden. Der Schwerpunkt der Waage muß genau unter der Drehungsachse liegen. Das Verhältnis des durch ein kleines Übergewicht hervorgerufenen Ausschlages zu dem Übergewicht bestimmt die *Empfindlichkeit* der Waage; sie ist der Balkenlänge direkt, hingegen dem Balkengewicht und ebenso dem Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse umgekehrt proportional. Bei Laboratoriumswaagen beträgt die Empfindlichkeit etwa einen Skalenteil pro Milligramm, und zwar bei einer Tragkraft von etwa 200 Gramm, so daß eine Gewichtsbestimmung bis fast auf ein Milliontel des Wertes möglich ist.

Bei modernen Waagen werden verhältnismäßig kurze Balken benutzt, wodurch die Schwingungsdauer abgekürzt wird. Die Bestimmung von Milligrammen erfolgt durch Verschiebung eines „Reiters“ von 10 mg Gewicht auf dem in zehn Teile geteilten Waagbalken. Speziell konstruierte Mikrowaagen ermöglichen chemische Analysen von nur 0,1 mg mit einer Wägegenauigkeit von etwa einem Promille.

§ 17. Die Rotation starrer Körper. Die Bewegung eines starren Körpers läßt sich stets auf eine *Translation* und eine *Rotation* zurückführen. Bei einer Translation beschreiben alle Punkte des starren Körpers kongruente parallele Bahnen; bei einer Rotation beschreiben sie hingegen in gleichen Zeiten gleiche Winkel um eine feste, als Rotationsachse bezeichnete Gerade. Der in der Zeiteinheit zurückgelegte und im Bogenmaß ausgedrückte Winkel¹ wird als die *Winkelgeschwindigkeit* bezeichnet.

Es werde zunächst der einfachste Fall einer konstanten Winkelgeschwindigkeit betrachtet. Ist w der Betrag der Winkelgeschwindigkeit und p der Abstand, den ein beliebiges, zu dem Körper gehöriges Massenteilchen von der Rotationsachse hat, so ergibt sich die lineare Geschwindigkeit des betreffenden Teilchens zu $w \cdot p$ und somit die lebendige Kraft des rotierenden starren Körpers zu

$$L = \sum \frac{1}{2} m p^2 w^2 = \frac{1}{2} w^2 J,$$

wobei zur Abkürzung gesetzt ist

$$J = \sum m p^2.$$

Die Größe J , die sich ergibt, indem alle Massen mit dem Quadrat ihres Abstandes von der Rotationsachse multipliziert werden und sodann die Summe dieser Produkte gebildet wird, wird als das *Trägheitsmoment* des starren Körpers in bezug auf die betreffende Rotationsachse bezeichnet.

Erfolgt die Rotation um eine feste Achse, so ist der Abstand von der Rotationsachse unveränderlich, und somit wird dann die Beschleunigung eines Teilchens $p \cdot \omega$, wenn ω die sogenannte Winkelbeschleunigung ist, nämlich die auf die Zeiteinheit bezogene Änderung der Winkelgeschwindigkeit. Nach dem zweiten Newtonschen Bewegungsgesetz gilt somit für die auf das einzelne Teilchen wirkende Kraft, die K genannt werde, die Beziehung

$$K = m p \omega.$$

Wofern nun die Kraft den Körper um seine feste Achse dreht, ist das Moment der Kraft um die Achse einfach durch das Produkt $p \cdot K$ gegeben. Bezeichnen wir also das Drehmoment, das aus allen, an den einzelnen Teilchen angreifenden Kräften resultiert, mit M ,

¹ Im Bogenmaß ist ein Winkel von 360° gleich 2π .

und summieren wir die letzte Gleichung, nachdem wir sie mit p multipliziert haben, über alle Massenpunkte des starren Körpers, so finden wir

$$M = J \omega.$$

Als einige Beispiele für Trägheitsmomente seien angeführt: Bei einem rechtwinkligen *Parallelepiped* mit den Kantenlängen a, b, c wird das Trägheitsmoment um eine durch den Schwerpunkt gehende, der Kante a parallele Achse

$$J = m \frac{b^2 + c^2}{12},$$

wenn m die Gesamtmasse des Körpers bedeutet. Bei einem *Kreiszylinder* vom Radius r ergibt sich das Trägheitsmoment um die Zylinderachse zu $\frac{1}{2} m r^2$, und bei einer Kugel wird das Trägheitsmoment um eine durch das Zentrum gehende Achse $\frac{2}{5} m r^2$.

In jedem starren Körper gibt es drei zueinander senkrechte, durch den Schwerpunkt gehende Achsen, um die der Körper ohne Einwirkung einer Kraft mit konstanter Winkelgeschwindigkeit zu rotieren vermag. Diese Achsen heißen die *freien Achsen* oder *Hauptträgheitsachsen* des Körpers.

§ 18. Das physische Pendel. Ein um eine horizontale Achse drehbarer starrer Körper, der unter dem Einfluß seiner Schwere schwingende Bewegungen ausführt, stellt ein *physisches Pendel* dar. Für ein solches muß die früher abgeleitete Beziehung gelten, daß das Drehmoment der Kraft, in diesem Falle also des Gewichtes, gleich ist dem Trägheitsmoment um die Achse, multipliziert mit der Winkelbeschleunigung.

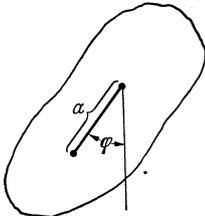


Abb. 17. Das physische Pendel.

Ist nun a der Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse und φ der Winkel, den die Verbindungslinie zwischen der Drehachse und dem Schwerpunkt mit der Vertikalen bildet (Abb. 17), so ist das Drehmoment des Gewichtes

$$M = m g a \sin \varphi$$

(dabei bedeutet m die Masse des Pendels und g die Fallbeschleunigung). Es gilt also, wenn wir wieder mit ω die Winkelbeschleunigung bezeichnen, die Beziehung

$$m g a \sin \varphi = J \omega.$$

Betrachten wir andererseits ein Fadenpendel von der Länge l , so ist die Beschleunigung b nach § 5

$$b = g \sin \varphi.$$

Da

$$b = l \omega$$

ist, finden wir für das Fadenpendel

$$\omega = \frac{g}{l} \sin \varphi.$$

Ein Vergleich mit der viertletzten Formel zeigt, daß das physische Pendel wie ein Fadenpendel schwingt, dessen Länge durch die Formel gegeben ist

$$l^* = \frac{J}{m a}.$$

Die Größe l^* wird als die *reduzierte Pendellänge* bezeichnet.

Wird durch eine geeignete Vorrichtung die für gewöhnlich horizontale Drehachse schief gestellt, so daß sie mit der Horizontalebene einen Winkel ψ einschließt, so ist statt der ganzen Fallbeschleunigung g nur eine Beschleunigung $g \cos \psi$ wirksam. Ein Pendel, das als *Horizontalpendel* um eine fast vertikale Achse drehbar ist, führt daher sehr langsame Schwingungen aus, ist aber andererseits äußerst empfindlich gegen Richtungsänderungen der Drehachse und wird daher als *Erdbebenpendel* verwendet.

§ 19. Der Kreisel. Ein sehr interessanter Sonderfall einer Bewegung eines starren Körpers wird durch die *Kreiselbewegung* dargestellt. Im engeren Sinne des Wortes versteht man darunter eine mit großer Winkelgeschwindigkeit erfolgende Rotation eines starren Körpers um eine freie Achse, wobei ein Punkt der Achse festgehalten ist und der Kreisel dem Einfluß seiner Schwere unterliegt.

Die auffälligste Eigentümlichkeit eines Kreisels ist die scheinbare Stabilität seiner Rotation; bei genügend großer Winkelgeschwindigkeit fällt ein Kreisel nicht um, obwohl sich sein Schwerpunkt oberhalb der Stützfläche befindet, ja auch dann nicht, wenn man Schläge gegen die Achse führt.

Das eigentümliche Beharrungsvermögen des Kreisels, das sich in der Beibehaltung der Rotationsachse gegenüber störenden Einflüssen äußert, kann zur *Stabilisierung* von Systemen dienen, die an sich nur eines labilen Gleichgewichtes oder einer geringen Stabilität

fähig sind; dies ist z. B. bei Fahrrädern, bei der Einschienebahn der Fall. Ein in ein Schiff in Gestalt einer Turbine eingebauter Kreisel verringert die Rollbewegungen des Schiffes. Im Kreiselkompaß dient die Trägheit eines sehr schnell rotierenden Drehstrommotors zur Anzeigung der Nord-Süd-Richtung; unter dem Einfluß eines durch die Erdrotation hervorgerufenen Drehmoments sucht sich nämlich die Figurenachse des Kreisels in die Süd-Nord-Richtung einzustellen und behält sie dann unter der dauernden Einwirkung der Erdrotation auch ständig bei.

§ 20. Die Elastizität. Körper, die durch einwirkende Kräfte *deformiert* werden, jedoch nach Aufhören der Kraftwirkung wieder die ursprüngliche Gestalt annehmen, werden als *elastisch* bezeichnet (im Gegensatz zu „plastischen“ Körpern, bei denen die Rückkehr in die frühere Form unterbleibt). Wie bereits Hooke (1678) fand, sind für nicht allzu große Kräfte die Deformationen den einwirkenden Kräften proportional. Das Hookesche Gesetz gilt bis zu der sogenannten *Elastizitätsgrenze*; wird diese durch die Kraft überschritten, so bleibt eine dauernde Deformation zurück. Die Kraft, die erforderlich ist, um eine Trennung der Teile des elastischen Körpers herbeizuführen, wird als *Festigkeit* bezeichnet.

Ein elastischer Stab oder Draht, der einem Zuge ausgesetzt wird — man spricht dann von *Zugelastizität* und Zugfestigkeit —, erfährt bei einer Länge l und einem Querschnitt q durch eine Zugkraft P eine Verlängerung a , für die die Formel gilt:

$$\frac{a}{l} = \frac{P}{E q};$$

dabei stellt E eine für das Material charakteristische Konstante, den sogenannten *Elastizitätsmodul* dar. Er wird üblicherweise auf Kilogrammgewicht und Quadratmillimeter bezogen und beträgt z. B. für Stahl 24000, so daß ein Stahldraht von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt durch ein Gewicht von 1 kg um $\frac{1}{24}$ mm verlängert wird. Die Elastizitätsgrenze eines solchen Drahtes wird bei einer Belastung von 30 bis 40 kg überschritten, während die Zugfestigkeit für Stahl bei 50 bis 250 kg pro Quadratmillimeter liegt.

Wird ein elastischer Körper einem allseitigen Druck p ausgesetzt, so ist die *Kompression* durch die Formel beschrieben

$$\frac{v}{V} = \frac{p}{B},$$

wobei v die Volumverringerng, V das Volumen und B der so-

genannte *Kompressionsmodul* sind. Unter dem Einfluß tangentialer Kräfte tritt eine sogenannte Scheerung, im Falle eines Fadens oder Drahtes somit eine „*Torsion*“ ein.

§ 21. Der Stoß. Für einen Zusammenstoß zweier elastischer Körper gilt sowohl der Satz von der Erhaltung der gesamten Bewegungsgröße als auch der Satz von der Erhaltung der Bewegungsenergie. Ist der Stoß zentral und geradlinig und sind die Massen m_1 und m_2 und ihre Geschwindigkeiten vor dem Stoße v_1 und v_2 und nach dem Stoße v_1' und v_2' , so müssen also die beiden Gleichungen erfüllt sein

$$m_1 v_1' + m_2 v_2' = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

und

$$m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2.$$

Indem wir diese Gleichungen nach v_1' und v_2' als Unbekannten auflösen, finden wir für die Geschwindigkeiten nach dem elastischen Stoß

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2) v_1 + 2 m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

und

$$v_2' = \frac{(m_2 - m_1) v_2 + 2 m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Wenn im besonderen die beiden Massen gleich sind, so wird

$$v_1' = v_2; \quad v_2' = v_1;$$

die beiden Körper *vertauschen* dann durch den elastischen Stoß ihre Geschwindigkeiten.

Wenn der zweite Körper ruht und seine Masse derart über die des ersten Körpers überwiegt, daß diese daneben vernachlässigt werden kann, so folgt aus den Formeln

$$v_1' = -v_1; \quad v_2' = 0.$$

Ein solcher Fall liegt bei dem Stoße einer Kugel gegen eine feste elastische Wand vor; von einer solchen wird eine elastische Kugel ohne Änderung des Geschwindigkeitsbetrages zurückgeworfen.

Das Gegenstück zu dem vollkommen elastischen Stoß stellt derjenige Sonderfall dar, bei dem sich zwei vollkommen *weiche*, vollkommen *unelastische* Körper nach dem Stoße mit einer gemeinsamen Geschwindigkeit bewegen. Nennen wir diese u , so ist nach dem Satze von der Erhaltung der gesamten Bewegungsgröße

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Bei dem unelastischen Stoße tritt ein Verlust an lebendiger Kraft ein. Er ist durch die Gleichung bestimmt

$$W = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) u^2.$$

Aus der vorletzten und drittletzten Gleichung folgt somit

$$W = \frac{m_1 m_2}{2 (m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2.$$

Der Verlust an lebendiger Kraft, der in Wärme umgewandelt wird, hängt also nur von der relativen Geschwindigkeit ab, die die zusammenstoßenden Körper gegeneinander aufweisen. Die Gesetze des elastischen und unelastischen Stoßes sind bereits von Huygens (um 1670) abgeleitet worden.

§ 22. Die Reibung fester Körper. Bei der wechselseitigen Reibung fester Körper unterscheidet man die *gleitende* und die *rollende Reibung*. Die durch den Widerstand gemessene gleitende Reibung ist dem gegen die Berührungsfläche ausgeübten Normaldruck proportional, hingegen von der Größe der Berührungsfläche unabhängig. Die gleitende Reibung der Ruhe ist im allgemeinen wesentlich größer als die Reibung der Bewegung, die mit wachsender Geschwindigkeit abnimmt. Eine beträchtliche Verminderung erfährt die gleitende Reibung durch Anwendung eines Schmiermittels, das zwischen die einander berührenden Flächen gebracht wird; die Reibung zwischen Eisen sinkt z. B. durch Benutzung von Öl auf ein Drittel. Auffällig klein ist die gleitende Reibung zwischen Eisen oder Holz und Schnee (Schlitten).

Viel geringer als die gleitende ist die rollende Reibung, z. B. bei der Fortbewegung einer Last auf Rädern; sie ist umgekehrt proportional dem Radius des Rades. Bei Eisenbahnen nimmt man den Gesamtwiderstand aller Arten von Reibung zu etwa $\frac{1}{2}$ Prozent der zu befördernden Last (einschließlich des Zuggewichtes) an, bei Automobilen mit guter Bereifung und auf guten Straßen zu ungefähr ein Prozent.

Um auch die sogenannte Zapfenreibung in rollende Reibung zu verwandeln, bedient man sich in der modernen Technik vor allem der *Kugellager*. Umgekehrt findet aber auch die Reibung als solche vielfache technische Anwendungen. Sie wird z. B. bei Treibriemen zur Übertragung von Bewegungen benutzt und bei der Bremsung zur Aufhebung oder Verzögerung von Bewegungen verwendet.

Zweites Kapitel.

Die Flüssigkeiten.

§ 23. Der hydrostatische Druck. Die *Flüssigkeiten* sind im mechanischen Sinne dadurch gekennzeichnet, daß ihre Teilchen sehr leicht gegeneinander *verschiebbar* sind und sie daher keine selbständige Gestalt besitzen, andererseits jedoch einer Verkleinerung ihres Volumens einen sehr großen elastischen Widerstand entgegensetzen. Infolge der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen pflanzt sich, wie zuerst Pascal (um 1650) feststellte, ein auf eine Flüssigkeit ausgeübter *Druck* nach *allen Richtungen* mit *gleicher Stärke* fort (sog. hydrostatisches Grundgesetz); der Druck wird dabei durch die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft gemessen.

Innerhalb einer schweren Flüssigkeit ist der hydrostatische Druck durch die Beziehung bestimmt

$$p = \rho h g,$$

wenn ρ die Dichte der Flüssigkeit ist, h die Höhe des Flüssigkeitsspiegels über der betrachteten Stelle und g die Fallbeschleunigung. Der Druck ist darnach unabhängig von der Richtung, und er hat in einer ruhenden Flüssigkeit denselben Wert an allen Stellen in demselben horizontalen Niveau.

Die hydrostatische Kraft selbst ist gleich dem Produkte aus dem Drucke und der Fläche, auf die sie wirkt. In der *hydraulischen Presse* (Abb. 18) überragt daher die auf den Preßkolben wirkende Kraft die seitens des Pumpenkolbens ausgeübte Kraft in dem Verhältnis der Querschnitte der beiden Kolben; natürlich gilt auch hier das Prinzip, daß das, was an Kraft gewonnen wird, an Weg verloren geht.

Unter dem Einfluß der *Schwere* stellt sich eine in einem offenen Gefäß enthaltene, ruhende Flüssigkeit mit *waagrechter* Oberfläche ein. In zwei miteinander *kommunizierenden* Röhren stellt sich eine Flüssigkeit stets gleich hoch ein (Wasserwaage). In einem Gefäß, das bis auf eine kleine Luftblase mit Flüssigkeit gefüllt ist, nimmt die Blase immer die höchste Stelle ein, so daß eine derartige „Libelle“ zur Horizontaleinstellung verwendet werden kann.

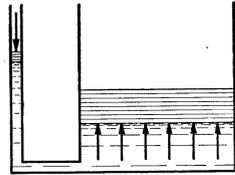


Abb. 18. Die hydraulische Presse.

Der von einer Flüssigkeit ausgeübte *Bodendruck* hängt nur von der Höhe und Dichte der Flüssigkeit ab. Die Gesamtkraft, die auf einen kreisförmigen Boden wirkt, stimmt also nur dann mit dem Gewicht der Flüssigkeit überein, wenn das Gefäß genau zylindrisch ist, ist aber bei gleicher Flüssigkeitshöhe auch ebenso groß, wenn sich das Gefäß nach oben verengt oder erweitert. Dieses sogenannte *hydrostatische Paradoxon* wurde bereits um 1590 von Stevin entdeckt. Ebenso ist natürlich auch der Druck auf eine Seitenwand unabhängig von der Breite des Gefäßes.

Aus dem Gesetze des Bodendruckes folgt ohne weiteres, daß zwei nicht mischbare Flüssigkeiten, wie Wasser und Quecksilber, einander in kommunizierenden Gefäßen dann das Gleichgewicht halten, wenn sich ihre von der Berührungsfläche an gerechneten Höhen umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte verhalten (Abb. 19).

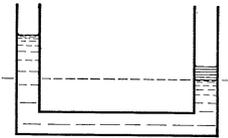


Abb. 19. Zwei Flüssigkeiten in kommunizierenden Gefäßen.

§ 24. Das Archimedische Prinzip. Wird in eine Flüssigkeit ein fester Körper getaucht, den wir uns der Einfachheit wegen als Parallelepiped oder als Zylinder mit zwei kongruenten, parallelen Grundflächen vom Inhalte f denken, so wirkt auf die untere Fläche eine aufwärts gerichtete Kraft in der Größe

$$K_1 = f \rho h_1$$

und auf die obere Fläche eine abwärts gerichtete Kraft

$$K_2 = f \rho h_2,$$

wenn ρ die Flüssigkeitsdichte ist und die beiden Flächen einen vertikalen Abstand h_1 bzw. h_2 von dem Flüssigkeitsspiegel haben.

Es resultiert daher ein aufwärts gerichteter *Auftrieb* im Betrage

$$K = K_1 - K_2 = f h \rho,$$

wenn wir mit h den Unterschied $h_1 - h_2$ bezeichnen. Nun stellt aber das Produkt $f \cdot h$ das Volumen des eingetauchten Körpers und somit das Produkt $f h \rho$ das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit dar. Ein in eine Flüssigkeit getauchter Körper erfährt also einen durch den Auftrieb verursachten *Gewichtsverlust*, der dem Gewichte der von ihm *verdrängten* Flüssigkeitsmenge gleich ist. Dieses wichtige, von Archimedes bereits um 250 v. Chr. aufgestellte Prinzip läßt sich mittels einer sogenannten hydrostatischen Waage leicht experimentell beweisen.

Ein schwimmender Körper taucht so weit ein, daß der Auftrieb gerade sein Gewicht kompensiert. Ein und derselbe Körper taucht daher in Flüssigkeiten von verschiedenem spezifischem Gewicht verschieden tief ein. Auf dieser Tatsache beruhen die *Skalen-Aräometer*, bei denen man durch Ablesen des Skalentheils, bis zu dem das Instrument in einer Flüssigkeit einsinkt, deren spezifisches Gewicht, also bei Lösungen oder Mischungen den Prozentgehalt an einem Bestandteil feststellen kann.

§ 25. **Der Ausfluß.** Wie schon 1644 Torricelli fand, ist die Geschwindigkeit, mit der eine Flüssigkeit aus einer Öffnung eines Gefäßes unter dem Einfluß der Schwere ausfließt, ebenso groß wie die Geschwindigkeit, die ein frei fallender Körper bei der Zurücklegung des Höhenunterschiedes zwischen dem Flüssigkeitsspiegel und der Öffnung erlangt. Die Ausflußgeschwindigkeit ($v = \sqrt{2gh}$) ist also von allen speziellen Eigenschaften der Flüssigkeit unabhängig und durch die Druckhöhe (h) völlig bestimmt.

Die auf die Sekunde bezogene Ausflußmenge beträgt allerdings nur etwa 62% des Produktes aus der Ausflußöffnung und der Ausflußgeschwindigkeit (die man am einfachsten aus den Dimensionen der parabolischen Bahn berechnet). Diese Abweichung ist eine Folge der *Zusammenziehung* des Flüssigkeitsstrahls, der sogenannten *contractio venae*, die ihre Ursache darin hat, daß die Flüssigkeit von allen Seiten zur Öffnung hinströmt.

§ 26. **Strömung und Wirbel.** Die Bewegungsvorgänge innerhalb einer Flüssigkeit, also die sogenannten *hydrodynamischen* Erscheinungen, lassen sich im wesentlichen auf zwei Grundformen solcher Vorgänge zurückführen, die man als Strömung und Wirbelbewegung unterscheidet.

Eine *Strömung* ist dadurch gekennzeichnet, daß die Bahnen der einzelnen Flüssigkeitsteilchen untereinander parallel und kongruent sind und, falls die Flüssigkeit in einer Röhre fließt, auch parallel zu den Röhrenwänden verlaufen. Im besonderen spricht man von einer stationären Strömung, wenn an jeder Stelle die Strömungsgeschwindigkeit ihren Betrag und ihre Richtung unverändert beibehält; doch ist wieder an jeder Stelle die Strömungsgeschwindigkeit dem Querschnitt der Röhre umgekehrt proportional.

Nach einem bereits von Daniel Bernoulli im Jahre 1738 aufgestellten Grundgesetz hat bei einer stationären Strömung in einer horizontalen Röhre für sämtliche Stellen die Summe aus dem Flüssigkeitsdruck und der in der Volumeinheit enthaltenen kinetischen Energie der Flüssigkeit denselben Wert, der gleich ist dem hydrostatischen Druck im Falle der Ruhe. Je rascher die Strömung, desto kleiner daher der Druck. Bei Überschreitung eines bestimmten „kritischen“ Wertes der Strömungsgeschwindigkeit wird daher der Flüssigkeitsdruck, der sogenannte *hydraulische Druck*, negativ und die strömende Flüssigkeit oder das strömende Gas übt dann eine seitliche *Saugwirkung* aus, wie sie jedermann von den Zerstäubern her bekannt ist. Für strömendes Wasser liegt diese kritische Geschwindigkeit bei etwa 14 m/sec. In engen Röhren spielt auch die innere Reibung der Flüssigkeiten eine große Rolle; nach einer von Poiseuille aufgefundenen Beziehung ist die Durchflußmenge in einer sehr engen Röhre der vierten Potenz des Röhrendurchmessers proportional.

In nicht engen Röhren verläuft die Strömung nur bis zu einer bestimmten kritischen Geschwindigkeit derart, daß sich die Flüssigkeitsteilchen parallel zu der Röhrenachse bewegen. Bei Überschreiten der kritischen Geschwindigkeit hört dies auf; es tritt sogenannte *Turbulenz* ein, die sich u. a. darin äußert, daß ein klarer Flüssigkeitsstrahl plötzlich trüb wird. Der Wert der kritischen Geschwindigkeit hängt außer von dem Durchmesser der Röhre von der Zähigkeit und Dichte der Flüssigkeit ab; für Wasser von 10° C beträgt sie z. B. in einer Röhre von 1 cm Durchmesser 26 cm pro Sekunde.

Eine in sich zurücklaufende Strömung wird als *Zirkulation* bezeichnet. Ein bekanntes Beispiel einer Zirkulation stellt die Bewegung des Wassers in einer Zentralheizung dar.

§ 27. Die Wirbel. Im Gegensatz zu der Strömung ist eine *Wirbelbewegung* dadurch gekennzeichnet, daß bei ihr Teile der Flüssigkeit wie ein starrer Körper rotieren. Die Flüssigkeitsteile, für die dies zutrifft, werden als Wirbel bezeichnet, und im besonderen als *Wirbelfäden*, wenn der Querschnitt klein gegen die Länge der Rotationsachse ist.

Ein Wirbelfaden setzt sich, auch wenn er durch die Flüssigkeit wandert, dennoch stets aus den *gleichen* Flüssigkeitsteilchen zusammen. Ein Wirbelfaden kann niemals innerhalb der Flüssig-

keit enden; er erstreckt sich daher entweder bis zu der Begrenzung der Flüssigkeit, oder aber läuft er als *Wirbelring* in sich selbst zurück. Das Produkt aus der Winkelgeschwindigkeit der Wirbelbewegung und dem Fadenquerschnitt stellt, wie zuerst Helmholtz erkannte, eine entlang dem Faden konstante und unveränderliche Größe dar; dort, wo sich der Faden verengt, erfolgt daher die Rotation um so rascher.

§ 28. Wasserrad und Wasserturbine. Bewegtes Wasser vermag sowohl durch sein Gewicht als auch durch seine lebendige Kraft, also seinen Stoß Arbeit zu leisten. Ersteres ist bei den „ober-“, letzteres bei den „unterschlächtigen“ *Wasserrädern* der Fall. Die moderne Technik hat die sich nur langsam drehenden Wasserräder allgemein durch schnell umlaufende *Wasserturbinen* ersetzt. Die Turbinen benutzen zwei Räder, nämlich ein feststehendes Leitrad, das dem strömenden Wasser eine bestimmte Richtung gibt, und ein mit der Welle verbundenes Laufrad, auf das die Energie des strömenden Wassers übertragen wird. In modernen Turbinen werden 75 bis 80% der Energie ausgenutzt.

Zur Fortbewegung der Schiffe im Wasser bediente man sich ursprünglich der Schaufelräder, die aber seit der Mitte des 19. Jahrhunderts durch die von Ressel erfundene *Schiffsschraube* verdrängt wurden. Sie besteht aus zwei bis vier Flügeln, die in ihrer Gesamtheit wie eine Schraube wirken; ihr Hauptvorzug ist, daß sie sich bei jeder Lage des Schiffes unter Wasser befindet und den Fortbewegungswiderstand des Schiffes keineswegs so erhöht wie die Schaufelräder mit den zugehörigen Kästen.

§ 29. Die Kompressibilität. Die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten ist sehr groß. Ihre Messung erfordert besondere Versuchsanordnungen, bei denen, wie bei dem von Örsted erfundenen *Piezometer*, die Deformation des die Flüssigkeit enthaltenden Gefäßes leicht ermittelt werden kann. Im Piezometer wird dies dadurch erreicht, daß die zu untersuchende Flüssigkeit in ein Gefäß gebracht wird, das in eine enge Röhre ausgezogen und durch Quecksilber abgeschlossen ist. Es befindet sich selbst in einem größeren, mit Wasser gefüllten Gefäß, in dem der Druck leicht gesteigert und gemessen werden kann.

Bei einer Vermehrung des Druckes um 1 Atmosphäre wird Wasser um 50 Millionstel seines Volumens zusammengedrückt. Bei Quecksilber ist die Kompressibilität noch etwa 15 mal geringer.

§ 30. **Die Oberflächenspannung.** Zwischen den einzelnen Teilchen einer Flüssigkeit sind wechselseitige *molekulare Anziehungskräfte* wirksam, auf denen die *Kohäsion* der Flüssigkeiten beruht. Man kann sich um jedes Teilchen als „Wirkungssphäre“ eine Kugel konstruiert denken, deren Radius derjenigen Entfernung gleich ist, bis zu der die molekularen Kräfte wirksam sind. Im Innern der Flüssigkeit heben sich die auf ein Teilchen aus allen Richtungen wirkenden molekularen Kräfte wechselseitig auf. Liegt hingegen das Teilchen nahe an der Oberfläche, so daß nicht seine ganze Wirkungssphäre von Flüssigkeitsteilchen erfüllt ist, so kommt ein in das Innere der Flüssigkeit gerichteter Zug zur Geltung. Infolgedessen zeigt jede Flüssigkeit ein Bestreben, ihre Oberfläche so sehr wie möglich zu verkleinern. Dieses Bestreben wird als *Oberflächenspannung* bezeichnet. Eine dem Einfluß der Schwere entzogene Flüssigkeit, die in einer mit ihr nicht mischbaren anderen Flüssigkeit von gleicher Dichte schwebt, nimmt daher Kugelgestalt an; denn unter allen Gebilden gleichen Volumens hat die Kugel die geringste Oberfläche.

Gemessen wird die Oberflächenspannung durch diejenige Arbeit, die erforderlich ist, um die Oberfläche um 1 cm^2 zu vergrößern. Auf der Oberflächenspannung beruhen die bekannten Gleichgewichtsfiguren, die sich an Drahtgerüsten bilden, die in Seifenwasser eingetaucht werden. Auch die *Tropfenbildung* der Flüssigkeiten ist durch die Oberflächenspannung verursacht; man kann sogar deren Größe durch Zählung der Tropfen bestimmen, die aus einem bestimmten Volumen einer Flüssigkeit entstehen.

Treffen *drei Grenzflächen* von verschiedener Oberflächenspannung zusammen, so ist kein Gleichgewicht möglich, wenn eine der drei Grenzflächenspannungen größer ist als die Summe der beiden anderen. Dies trifft z. B. für das System Wasser—Öl—Luft zu. Die Oberflächenspannung zwischen Wasser und Luft ist größer als die Summe der Oberflächenspannungen zwischen Wasser und Öl sowie zwischen Öl und Luft. Infolgedessen breitet sich ein Öltropfen, der auf Wasser gebracht wird, über dessen ganze Oberfläche aus.

§ 31. **Die Kapillarität.** Die molekulare Anziehung, die zwischen verschiedenen Körpern, insbesondere zwischen festen Körpern und Flüssigkeiten wirkt, tritt als sogenannte *Adhäsion* in Erscheinung. Feste Körper, die in eine Flüssigkeit getaucht werden,

benetzen sich, wenn die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und dem festen Körper größer als die Kohäsion innerhalb der Flüssigkeit ist. Glas wird von Wasser, nicht aber von Quecksilber benetzt.

In engen Glasröhren stellt sich eine benetzende Flüssigkeit höher, eine nicht benetzende hingegen tiefer als in einem kommunizierenden weiten Gefäß; diese Erscheinung wird als *Kapillarität* bezeichnet. Die Steighöhe bzw. Depression ist dem Halbmesser der Röhre umgekehrt, hingegen der Oberflächenspannung direkt proportional; letztere kann daher aus Kapillarbeobachtungen ermittelt werden. In einer Röhre von 1 mm Durchmesser steigt Wasser um etwa 3 cm.

Der Winkel, den die Flüssigkeitsoberfläche mit der Röhrenwand bildet, der sogenannte *Randwinkel* (Abb. 20), hängt nur von der stofflichen Natur der Flüssigkeit und der Röhre ab, hat also für ein gegebenes Paar von Stoffen (z. B. Wasser—Glas oder Quecksilber—Glas) einen unveränderlichen Wert. Aus dem Alltagsleben bekannte Beispiele von Kapillarwirkungen sind das Aufsaugen von Tinte durch Löschpapier oder von Wasser durch Schwämme.

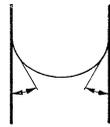


Abb. 20. Die Adhäsion.

Drittes Kapitel.

Die Gase.

§ 32. Der Luftdruck. Von den Flüssigkeiten im engeren Sinne des Wortes unterscheiden sich die *Gase* dadurch, daß sie keine bestimmte Form und kein bestimmtes Volumen haben. Sie sind sehr leicht zusammendrückbar und haben andererseits das Bestreben, jeden Raum völlig auszufüllen. Ein in ein Gefäß eingeschlossenes Gas übt gegen dessen Wände einen Druck aus. Ebenso übt aber auch die die Erde umgebende Atmosphäre, die durch die Anziehungskraft der Erde am Entweichen in den Weltraum verhindert wird, einen Druck aus, der als *Luftdruck* bezeichnet wird.

Experimentell wurde der Luftdruck zuerst von Torricelli im Jahre 1643 nachgewiesen. Er füllte eine an einem Ende zugeschmolzene Glasröhre mit Quecksilber und tauchte sie mit dem offenen Ende in ein weites, mit Quecksilber gefülltes Gefäß. Er stellte fest, daß das Quecksilber in dem Rohre, wie immer auch

dieses geneigt ist, stets so weit sinkt, daß seine Kuppe ungefähr 76 cm über dem Niveau des weiten Gefäßes steht (Abb. 21). Schon früher hatten die Brunnenmacher erkannt, daß durch Wasserpumpen Wasser nicht höher als etwa 10 m gehoben werden kann. Da sich die spezifischen Gewichte von Wasser und Quecksilber wie 76 : 1000 verhalten, schloß Torricelli, daß der Luft ein Druck nach Art der Flüssigkeiten zuzuschreiben sei und dieser einer Quecksilbersäule von 76 cm oder einer Wassersäule von 10 m das Gleichgewicht halte.

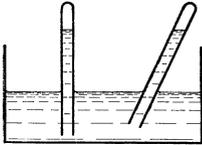


Abb. 21. Der Torricelli'sche Versuch.

Der Druck einer Quecksilbersäule von 76 cm Höhe bei 0° C wird definitionsgemäß als *Atmosphäre* bezeichnet. Es ist also, da das spezifische Gewicht des Quecksilbers bei 0° gleich 13,596 ist,

$$1 \text{ Atm.} = 1,033 \text{ kg pro cm}^2 = 1,013 \cdot 10^6 \text{ Dyn pro cm}^2.$$

Der Luftdruck ist ständigen Schwankungen ausgesetzt, aus deren Beobachtung mittels der *Barometer* Schlüsse auf das kommende Wetter möglich sind. Die beiden Haupttypen der Luftdruckmesser sind das Quecksilber- und das allgemein als Zimmerinstrument benutzte *Aneroid-Barometer*. Dieses besteht im wesentlichen aus einem luftleeren, biegsamen Gehäuse, das bei Änderungen des Luftdrucks seine Gestalt ändert und diese Änderung durch einen Hebel auf einen Zeiger überträgt.

Mit zunehmender Erhebung über das Meeresniveau nimmt, wie bereits Pascal fand, der Luftdruck ab, und zwar in niedrigerer Höhe um 1 mm für je 10,5 m. Das genauere Gesetz, das die Abhängigkeit des Drucks von der Höhe beschreibt, ermöglicht umgekehrt die sogenannte *barometrische Höhenmessung*.

Druckunterschiede von Gasen und Dämpfen, vor allem also Überdrucke, werden mit Hilfe von *Manometern* gemessen, die auf dem Prinzip der kommunizierenden Gefäße beruhen.

Praktische Anwendung findet der Luftdruck z. B. im Heber, der Wassersaugpumpe, dem Heronsball (der Spritzflasche) usw.

§ 33. Das Boylesche Gesetz und das Gewicht der Gase. Wie im Jahre 1660 Boyle (teilweise im Anschluß an Townsend) und etwas später auch Mariotte feststellten, ist bei gegebener Temperatur der *Druck* eines Gases seinem *Volumen umgekehrt* proportional. Die Dichte ist daher dem Druck direkt proportional.

Die Gasdichte wird gewöhnlich auf diejenige der Luft als Einheit bezogen. In diesem Maße hat das leichteste Gas, nämlich Wasserstoff, die Dichte 0,07. Die Dichten verschiedener Gase verhalten sich untereinander wie deren *Molekulargewichte*.

Das tatsächliche Gewicht der Luft kann man nachweisen und messen, indem man ein luftdicht verschließbares Gefäß luftleer und mit Luft gefüllt wiegt. Ein Liter Luft wiegt bei 0° und einem Barometerstand von 76 cm 1,293 g, also etwas mehr als ein Kubikzentimeter Wasser. Die Zahl 0,001 293 stellt demnach die auf Wasser bezogene *Dichte der Luft* dar.

Daß die Luft ein Gewicht hat, äußert sich auch in dem *Auftrieb*, den alle Körper in der Luft erfahren. In der Luft ist jeder Gegenstand leichter als im luftleeren Raum. Zwei Körper, die in der Luft gleiches Gewicht, aber verschiedenes Volumen haben, sind im Vakuum verschieden schwer, weshalb exakte Wägungen „auf den leeren Raum reduziert“ werden müssen.

§ 34. Die Luftpumpe. Unter den Luftpumpen, die der Herstellung eines praktisch luftleeren Raumes, eines sogenannten *Vakuums* dienen, stellen die *Kolbenluftpumpen* den einfachsten Typus dar. Sie wurden bereits um das Jahr 1650 von Otto von Guericke erfunden. Ihr Prinzip besteht darin, daß der „Stiefel“, in dem sich der Pumpenkolben bewegt, abwechselnd mit dem Rezipienten, aus dem die Luft gezogen werden soll, und der freien Luft in Verbindung gesetzt wird; dabei werden Hähne oder Ventile benutzt. Der Grad der erreichten Verdünnung wird durch ein abgekürztes Barometer, eine sogenannte Barometerprobe, bestimmt. Man pflegt den Druck in Millimeter Hg anzugeben, so daß also 1 mm dem 760. Teil einer Atmosphäre entspricht. Der erreichbaren Verdünnung ist indessen eine Grenze durch den bei Kolbenpumpen unvermeidlichen „schädlichen Raum“ zwischen der Kolbenfläche und den Ventilen oder Hähnen gesetzt. Die ursprüngliche Form der Kolbenpumpen ist allerdings im Laufe der Zeiten so verbessert worden, daß gegenwärtig auch mit Kolbenpumpen ein Volumen von einigen Dezilitern in einigen Minuten bis auf 0,001 mm evakuiert werden kann.

Die durch den schädlichen Raum bedingten Schwierigkeiten entfallen bei den *Quecksilberluftpumpen*, die von Geißler um 1850 erfunden wurden. Sie beruhen im wesentlichen darauf,

daß der Rezipient mit dem leeren Raume über dem Quecksilber eines Barometers in Verbindung gesetzt wird.

Die *Flüssigkeitsstrahlpumpen* benutzen die Saugwirkung eines aus einer engen Öffnung austretenden Wasser- oder Quecksilberstrahls. Sie sind durch besondere Schnelligkeit der Wirkung ausgezeichnet. So vermag z. B. die Langmuirsche Quecksilberdampfstrahl-Luftpumpe in der Sekunde einige Kubikmeter Luft abzusaugen. Die *innere Reibung* der Gase wird bei der Gaedeschen Molekularluftpumpe verwertet; sehr wirksame Luftpumpen sind auch solche, die die Diffusionserscheinungen nutzbar machen.

Das durch die Luftpumpen herstellbare Vakuum kann noch mit Hilfe absorbierender Substanzen, wie Holzkohle, Phosphor, erhöht werden. Mittels der besten modernen Luftpumpen sind Vakua von ungefähr 10^{-7} mm herstellbar, was also einer ungefähr 10^{10} fachen Verdünnung entspricht. Technische Anwendung finden die Luftpumpen in großem Maßstabe vor allem in der Glühlampenfabrikation.

Für die Technik sind auch Vorrichtungen von Wichtigkeit, die der Verdichtung von Gasen dienen, also die sogenannten *Kompressoren*; sie beruhen im wesentlichen auf einer Umkehrung des Prinzips der Kolbenluftpumpe. Die höchsten erreichten Gasverdichtungen liegen in der Größenordnung von Zehntausenden von Atmosphären.

§ 35. Der Reibungswiderstand der Luft. Der Widerstand, den die *Luft* infolge ihrer *Reibung* einem in ihr bewegten Körper entgegensetzt, ist für nicht zu kleine Geschwindigkeiten dem Quadrate der Geschwindigkeit, ferner der Dichte der Luft und der Flächenausdehnung des Körpers quer zu der Bewegungsrichtung proportional. Im übrigen hängt aber der Widerstand wesentlich von der Form des bewegten Körpers ab, wobei die Gestalt der rückwärtigen Teile des Körpers besonders wichtig ist. Indem man Luftschiffen die bekannte „Zeppelin“-Form oder Automobilen die sogenannte Stromlinienform gibt, erzielt man eine sehr bedeutende Herabsetzung des Luftwiderstandes.

Werden bei dem *Fall* die Reibungskräfte so groß, daß sie die Schwere des fallenden Körpers überragen, so tritt eine Bewegung mit *konstanter Geschwindigkeit* ein. Dies gilt z. B. für in Luft fallende Regentropfen, deren Radius kleiner als $\frac{1}{50}$ mm ist. Soweit die Bewegung als gleichförmig anzusehen ist, ist

nach einem von Stokes um 1850 aufgefundenen Gesetz die Fallgeschwindigkeit dem Quadrate des Halbmessers proportional.

Mit dem Reibungswiderstande, den ein in einem Gase oder auch in einer Flüssigkeit bewegter Körper erfährt, hängt auch ein merkwürdiger, um das Jahr 1850 von Magnus entdeckter und gewöhnlich nach ihm benannter Effekt zusammen. Er besteht darin, daß ein in strömender Flüssigkeit oder Luft rasch rotierender Zylinder von einer Grenzschicht umhüllt ist, innerhalb deren die Geschwindigkeit von dem Nullwerte am Mantel allmählich bis zu der Strömungsgeschwindigkeit wächst und als eine Folge hiervon ein *Quertrieb* eintritt, der den rotierenden Zylinder zu verschieben vermag. Eine praktische Anwendung hat der Magnus-Effekt in den 1924 erfundenen Flettner-*Rotoren* erhalten, die in der Schifffahrt die Segel ersetzen sollen.

§ 36. Das Flugzeug. Die Konstruktion der Flugzeuge beruht letzten Endes auf der Tatsache, daß ein horizontal bewegter und leicht aufwärts gegen die Horizontale geneigter Flügel einen vertikalen *Auftrieb* erfährt; denn infolge der Bewegung des geneigten Flügels entgegen der Luftströmung erhöht sich auf der Unterseite des Flügels der Druck der Luft, während er sich auf der oberen Seite erniedrigt. Die durch diesen Überdruck erzeugte Kraft kann in zwei zueinander senkrechte Komponenten zerlegt werden, deren eine als Widerstand der Bewegung, deren andere aber als Auftrieb dem Gewichte des Flügels entgegenwirkt.

Das Gewicht, das derart ein Flügel zu tragen vermag, erweist sich als dem Geschwindigkeitsquadrat und dem Flächeninhalt der Tragfläche proportional. Bei Anwendung der in der Flugtechnik üblichen Propeller liegt die *Tragfähigkeit* zwischen 30 und 40 kg pro Quadratmeter der Tragfläche. Von entscheidender Bedeutung ist für die Entwicklung des Flugwesens natürlich die Erfindung genügend leichter Motoren gewesen.

Die Theorie des Fluges gründet sich auf die Tatsache, daß bei Geschwindigkeiten, die klein gegen die Schallgeschwindigkeit, also klein gegen etwa 1000 km pro Stunde sind, die Luft als *inkompressibel* und frei von Zähigkeit angesehen werden kann; dies wurde experimentell vor allem von Prandtl nachgewiesen.

§ 37. Absorption und Adsorption von Gasen. Wie 1803 Henry fand, ist die Menge eines Gases, die eine Flüssigkeit pro Kubikzentimeter zu *lösen* vermag, dem Druck des Gases proportional,

Bei einem Druck von 2 Atm. löst Wasser z. B. doppelt so viel Kohlensäure wie bei einem Druck von 1 Atm. In Verbindung mit dem Boyleschen Gesetz besagt also das Gesetz von Henry, daß in 1 ccm einer gegebenen Flüssigkeit stets, unabhängig vom Druck, das *gleiche Volumen* eines bestimmten Gases gelöst ist.¹ Man nennt dieses Volumen den *Absorptionskoeffizienten*; er beträgt z. B. für Kohlensäure in Wasser bei Zimmertemperatur etwa 0,9. Mit zunehmender Temperatur nehmen die Absorptionskoeffizienten rasch ab. Sauerstoff wird von Wasser etwa doppelt so stark wie Stickstoff absorbiert; darum ist in Wasser gelöste Luft an dem für die Atmung wichtigen Sauerstoff viel reicher als die freie Luft. Wird der Druck erniedrigt, unter dem eine Flüssigkeit steht, die ein Gas gelöst enthält, so muß nach dem Henryschen Gesetz das Gas zum Teile entweichen; dadurch erklärt sich das bekannte Aufbrausen kohlenensäurehaltiger Getränke bei dem Öffnen ihrer Flaschen.

An der Oberfläche fester Körper können Gase verdichtet werden, so daß sie die Oberfläche wie eine Haut überziehen. Besonders stark offenbart sich diese Erscheinung sogenannter *Adsorption* bei porösen Körpern; so vermag Holzkohle fast das 100fache Volumen Ammoniak zu adsorbieren. Auch scheinbar nicht-poröse Stoffe können unter Umständen sehr große Mengen von Gas „okkludieren“, so z. B. geschmiedetes Palladium fast das 400fache Volumen.

Zwischen zwei Gasen, die durch eine *poröse Zwischenwand*, z. B. aus Ton, getrennt sind, findet stets durch sogenannte *Diffusion* ein Austausch statt; dabei durchsetzt das leichtere Gas die Wand rascher als das schwerere. Wie schon Graham fand, ist die Diffusionsgeschwindigkeit der Quadratwurzel aus dem spezifischen Gewicht umgekehrt proportional.

Viertes Kapitel.

Akustik.

§ 38. Allgemeine Eigenschaften von Schwingungen. Eine Bewegung, bei der ein Körper seine Entfernung von einer Ruhelage periodisch ändert, wird eine *Schwingung* genannt. Als ein be-

¹ Denn dem Druck ist ja das Volumen wieder umgekehrt proportional.

sonderer Fall einer Schwingung wurde schon früher eine Pendelbewegung besprochen und hierbei wurden auch die allgemeinen Begriffe der Amplitude und der Schwingungsdauer oder Periode abgeleitet. Eine Schwingung, bei der die Amplitude nicht konstant bleibt, sondern sich mit der Zeit infolge der Reibung oder eines anderen Bewegungshindernisses ständig verringert, wird als eine *gedämpfte* Schwingung bezeichnet.

Ein wichtiger Sonderfall einer Schwingung liegt vor, wenn der Bewegungsvorgang unter dem Einfluß einer äußeren, selbst periodisch veränderlichen Kraft steht. Man spricht dann von einer *erzwungenen* Schwingung. Stimmt im besonderen die Schwingungsdauer, die der Bewegungsvorgang bei dem Fehlen einer äußeren Ursache hätte, also die Periode einer *Eigenschwingung*, mit der Periode der einwirkenden äußeren Ursache überein, so wird die Amplitude der erzwungenen Schwingung sehr groß; es tritt dann sogenannte *Resonanz* ein.

§ 39. Allgemeine Eigenschaften von Wellen. Schwingungen können sich in Form von *Wellen* fortpflanzen. Jedes von einer Welle ergriffene Teilchen führt eine vollständige Schwingung aus, aber der Beginn der Schwingung, also das Passieren der Ruhelage, setzt für jeden Punkt etwas später ein als für den Nachbarpunkt, der von der Welle früher erreicht wird.

Längs einer Welle kehrt an einer und derselben Stelle ein bestimmter Zustand periodisch wieder. Er wiederholt sich aber auch für einen und denselben Augenblick längs der Fortpflanzungsrichtung der Welle in regelmäßigem Abstand, der *Wellenlänge* genannt wird. Bezeichnen wir sie mit λ und die Periode mit τ , so gilt für die Wellengeschwindigkeit v die Beziehung

$$v = \frac{\lambda}{\tau} \text{ bzw. } v = \lambda \nu,$$

wenn ν die Frequenz ist.

Man unterscheidet als zwei Hauptformen von Wellen *longitudinale* und *transversale*, je nachdem, ob die schwingenden Bewegungen der einzelnen Teilchen in der Fortpflanzungsrichtung der Welle oder senkrecht zu ihr erfolgen. Bei den Longitudinal- oder Längswellen wechseln Verdichtung und Verdünnung, bei den Transversal- oder Querwellen hingegen Wellenberg und Wellental miteinander ab.

Treffen in einem Punkte zwei oder mehr Wellenzüge zusammen, so ergibt sich die resultierende Bewegung an dieser Stelle nach dem Prinzip des Bewegungsparallelogramms. Haben zwei sich übereinander lagernde Wellenzüge gleiche Amplitude und Periode, sind sie jedoch in ihrem Schwingungszustand, also in der „Phase“ um eine halbe Periode verschieden, so heben sich ihre Wirkungen wechselseitig auf; es kommt zu sogenannter *Interferenz*.

Wird ein Wellenzug reflektiert, so entsteht durch Interferenz zwischen dem direkten und dem reflektierten Wellenzug eine *stehende Welle*. In Abständen von einer halben Wellenlänge folgen *Schwingungsknoten* aufeinander, in denen keine Schwingungen erfolgen; in der Mitte zwischen je zwei Schwingungsknoten liegen Schwingungsbäuche als Stellen größter Amplitude, die dort doppelt so groß wie in der direkten Welle ist.

§ 40. Die Schallwellen. In Flüssigkeiten und Gasen sind ausschließlich Längswellen möglich; nur in festen Körpern können neben den Längswellen auch Querwellen auftreten.

Wellen, die sich in der Luft mit einer Schwingungszahl (Frequenz) zwischen etwa 20 und 20000 pro Sekunde ausbreiten, vermögen bei dem Auftreffen auf unser Ohr Gehörsempfindungen hervorzurufen und werden als *Schallwellen* bezeichnet. Versuche in dem Rezipienten einer Luftpumpe zeigen, daß sich im leeren Raum der Schall nicht fortpflanzt; wohl aber breitet er sich in Flüssigkeiten, z. B. unter Wasser, und in festen Körpern aus.

Von einer Schallquelle erfolgt die Fortpflanzung zunächst kugelförmig, so daß im freien Raum die Energie der Schall-schwingungen und somit die Schallstärke im umgekehrt quadratischen Verhältnis mit der Entfernung abnimmt. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwellen beträgt bei 0° in Luft 331,6 m pro Sekunde. Mit der Temperatur nimmt sie zu und erreicht z. B. bei 15° C 340 m. Wesentlich größer ist die Schallgeschwindigkeit in Wasser (zirka 1400 m) und in festen Körpern (z. B. gegen 4000 m pro Sekunde in Eisen).

Die Schallgeschwindigkeit in Gasen läßt sich ziemlich genau mittels der von Kundt ersonnenen Methode der *Staubfiguren* ermitteln. Hierbei wird in einem durch einen verschiebbaren Kork verschlossenen Glasrohr ein feines Pulver verstreut; von der anderen Seite ragt in die Röhre das mit einem Korkscheibchen versehene Ende eines in seiner Mitte festgeklemmten Glasstabes

(Abb. 22). Der Glasstab kann durch Reiben mit einem Lappen in Längsschwingungen versetzt werden; dadurch werden in der Röhre bei geeigneter Stellung des verschiebbaren Korkes stehende Wellen erzeugt, die den Staub in periodische Figuren mit Knoten ordnen. Aus dem Abstand benachbarter Knoten kann dann die Wellenlänge ermittelt werden. Nach verschiedenen Methoden kann auch die Schwingungszahl des Glasstabes und somit auch der stehenden Schwingungen gefunden werden. Auf Grund der ermittelten Wellenlänge ist damit auch die Wellengeschwindigkeit in dem Gas gegeben, das die Kundtsche Röhre erfüllt.

§ 41. Die Tonhöhe. Eine unregelmäßige Aufeinanderfolge von Luftstößen wird von unserem Ohr nur als *Geräusch* empfunden; regelmäßig schwingende Bewegungen rufen hingegen bei entsprechender Frequenz (zwischen 40 und 4000) die Empfindung von *Tönen* hervor. Die *Tonhöhe* ist unmittelbar durch die Schwingungszahl gegeben. Daß den musikalischen Intervallen



Abb. 22. Messung der Schallgeschwindigkeit in Gasen.

einfache zahlenmäßige Beziehungen zugrunde liegen, war schon seit dem Altertum bekannt; die absolute genaue Bestimmung akustischer Schwingungszahlen ist jedoch erst im Beginn des 19. Jahrhunderts gelungen.

Unter den dazu benutzten Apparaten war die *Lochsirene* am wichtigsten. In ihrer einfachsten Form besteht sie aus einer kreisförmigen Scheibe mit mehreren konzentrischen Lochreihen, in deren jeder die einzelnen Löcher untereinander gleich weit abstehen. Wird die Scheibe in rasche Umdrehung versetzt und dann durch eine Röhre ein Luftstrom gegen eine Lochreihe geblasen, so wird ein Ton hörbar; seine Schwingungszahl kann man ganz einfach berechnen, indem man die Zahl der Öffnungen der Lochreihe mit der Zahl der Umdrehungen pro Sekunde multipliziert. Umgekehrt kann man die Schwingungszahl eines bekannten Tones ermitteln, indem man die Sirene so rasch umlaufen läßt, daß der von ihr gelieferte Ton mit dem zu untersuchenden in der Höhe übereinstimmt.

Die Schwingungszahl eines tönenden Körpers kann auch direkt bestimmt werden, indem man an dem Körper einen Schreibstift

befestigt und diesen die Schwingungen auf einen Zylinder aufschreiben läßt, der mit bekannter Tourenzahl gedreht wird. Statt des Schreibstiftes kann auch ein kleiner Spiegel benutzt werden, der einen Lichtstrahl auf lichtempfindliches Papier reflektiert, das um den Zylinder gewickelt ist. Nachdem man gefunden hatte, daß dem „einfach gestrichenen“ *a*-Ton der Musik etwa 435 Schwingungen pro Sekunde entsprechen, wurde in der Wiener Stimmtonkonferenz von 1885 als Normalton, sogenannter *Kammerton*, der Ton einer Stimmgabel festgelegt, die in der Sekunde 435 Schwingungen ausführt.

Die Schwingungszahl eines Tones, der um eine *Oktave* höher als ein gegebener liegt, ist *doppelt* so groß wie dessen Frequenz. Der Dur-Tonleiter entsprechen die Frequenzverhältnisse

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8} : 2.$$

In der Moll-Tonleiter sind es die Verhältnisse

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{6}{5} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{8}{5} : \frac{9}{5} : 2.$$

In der modernen Physik gibt man die Schwingungszahl gewöhnlich in Hertz (Hz) an, so benannt nach dem Entdecker der elektrischen Wellen; 1 Hz ist eine Schwingung pro Sekunde, so daß also z. B. der Kammerton 435 Hz hat. Die in der Musik verwendeten Töne reichen von etwa 40 bis 5000 Hz. Die untere Grenze der Gehörsempfindung liegt bei etwa 20 Hz, die obere im Kindesalter bei ungefähr 20000 Hz und sinkt dann mit zunehmendem Alter bis etwa 10000 Hz im Greisenalter.

§ 42. Die Klangfarbe. Eine Tonquelle erzeugt meist eine Mannigfaltigkeit von Schwingungen, die mit verschiedenen Frequenzen gleichzeitig erfolgen, und zwar derart, daß die Frequenzen *ganzzahlige Vielfache* einer Grundfrequenz sind; es erscheint somit ein *Grundton* von *Obertönen* begleitet. Die relativen Anteile der Obertöne an der gesamten Schwingungsenergie, also der Gesamttonstärke, bestimmen die sogenannte *Klangfarbe* der Tonmischung.

Von Obertönen freie, „reine“ Töne lassen sich am besten mittels einer Stimmgabel erzeugen. Hingegen sind die Klänge der Musik- und insbesondere der Streichinstrumente sehr reich an Obertönen. Klanganalysen wurden früher (nach Helmholtz) mit Resonatoren durchgeführt, während man sich gegenwärtig vor allem elektrischer Methoden bedient.

§ 43. Die Tonstärke. Als Maß der Schallstärke dient der von den Schallwellen ausgeübte Druck. Er wird in Dyn pro Quadratcentimeter, in sogenannten *Bar*, angegeben.¹ Zum Vergleich der Stärke zweier Töne gibt man ihren Unterschied in *Phon* oder *Decibel*² an und versteht darunter den mit 10 multiplizierten Logarithmus³ des Verhältnisses der Energien der beiden Töne. Die Energie ist proportional dem Quadrate des Schalldruckes. Ein Unterschied von 1 Phon ist ungefähr der kleinste Tonstärkenunterschied, den das Ohr noch deutlich wahrzunehmen vermag.

Absolute Schallstärken gibt man durch die Anzahl der Phon an, um die der Schall die kleinste, von einem normalen Ohr wahrnehmbare Schallstärke übertrifft. In diesem Maß liegt das Rauschen von Blättern im Walde bei schwachem Wind bei 10 Phon, leisere Radiomusik in einem Zimmer bei 30 bis 40 Phon, das lauteste Fortissimo der Musik bei 70 Phon. Bei 110 Phon hört die Gehörsempfindung auf und geht in eine Schmerzempfindung über.

§ 44. Die Sprachtöne. Der Frequenzbereich der *Sprache* erstreckt sich von ungefähr 30 bis zu 4000 Hz. Der Grundton der Stimme liegt bei dem Mann durchschnittlich etwa bei 130 Hz, bei der Frau und dem Kinde bei ungefähr 250 Hz. Für jeden Sprachlaut ist ein bestimmter Frequenzbereich charakteristisch, der sein *Formant* genannt wird und auf den stets der Hauptanteil der Intensität der Oberschwingungen entfällt. Der Formant des Vokals *a* erstreckt sich z. B. von etwa 850 bis 950 Hz. Bei den Vokalen herrscht strenge Periodizität; bei den Konsonanten ist sie nur unvollständig gewahrt.

§ 45. Die Erregung der Töne. Unter den Instrumenten, die der Erzeugung von Tönen dienen, sind zwei Haupttypen unterscheidbar: solche, die auf transversalen Schwingungen von *Saiten*, und solche, die auf longitudinalen Schwingungen von *Luftsäulen* beruhen. Die Schwingungszahl einer Saite ist, wie teilweise schon Galilei fand, der Länge und dem Durchmesser der

¹ In der Meteorologie versteht man unter dem Bar das Millionenfache; darum wird oft auch das akustische Bar als Mikrobar bezeichnet.

² So benannt nach Bell, dem Erfinder des Telephons.

³ Es ist hierbei der auf die Basis 10 bezogene Logarithmus gemeint.

Saite sowie der Quadratwurzel ihres spezifischen Gewichtes umgekehrt, hingegen der Quadratwurzel aus dem spannenden Gewicht oder Zug direkt proportional. Zur Verstärkung der erzeugten Töne werden die Saiten über Resonanzböden gespannt.

Zu den transversal schwingenden Tonerregern gehören auch gespannte *Membranen*, Metallplatten und Glocken. Der Schwingungszustand einer Metallplatte läßt sich mittels eines aufgestreuten Pulvers veranschaulichen, das sich zu den sogenannten Chladnischen *Klangfiguren* (Abb. 23) entlang den Knotenlinien anordnet. Zu den membranhaften Tonerregern gehören auch die menschlichen Stimmbänder.



Abb. 23. Klangfiguren.

Auf den longitudinalen Schwingungen von Luftsäulen beruhen die *Pfeifen*. Der Ton einer Pfeife ist um so höher, je kürzer die Pfeife ist. Eine offene Pfeife (Abb. 24) hat an beiden Enden Schwingungsbäuche und gibt alle Obertöne. Die gedeckte Pfeife (Abb. 25) hat nur an einem Ende einen Schwingungsbauch, am anderen hingegen einen Schwingungsknoten. Sie ist in ihrem Grundton infolgedessen um eine Oktave tiefer als eine gleich lange offene Pfeife; im Gegensatz zu dieser gibt sie auch nur die ungeraden Obertöne.

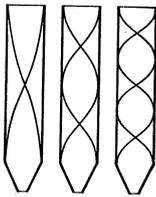


Abb. 24. Die offene Pfeife.

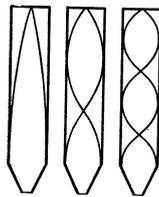


Abb. 25. Die gedeckte Pfeife.

Bei den *Lippenpfeifen* strömt die Luft in einen hohlen Raum und aus diesem durch einen Spalt in die freie Luft, wobei sie gegen die Lippe stößt und dadurch die Luftschwingungen erzeugt. Bei den *Zungenpfeifen* wird ein eingeblasener Luftstrom ähnlich wie bei einer Sirene regelmäßig unterbrochen. Zu den Zungenpfeifen gehört auch der menschliche Kehlkopf mit den Stimmbändern.

§ 46. **Reflexion von Schallwellen.** Die Reflexion des Schalles äußert sich in der Erscheinung des *Echos*. Da unser Ohr Schalleindrücke nur dann als getrennt empfindet, wenn zwischen ihnen eine Zeit von wenigstens $\frac{1}{5}$ Sekunde vergeht, so ist zum Zustandekommen eines Echos eine Mindestentfernung erforderlich, zu

deren doppelter Zurücklegung der Schall $\frac{1}{5}$ Sekunde benötigt, also ein Abstand von etwa 30 m. Von Hohlspiegeln werden Schallwellen nach denselben Gesetzen wie Lichtstrahlen reflektiert (Flüstergewölbe).

Eine praktische Anwendung findet die Schallreflexion seit etwa 1920 in der akustischen *Tiefenmessung* von Gewässern. Das von Behm erfundene *Echolot* mißt mittels eines Apparates, der den zehntausendsten Teil einer Sekunde abzulesen gestattet, die Zeit zwischen der Abgabe eines Knallsignals unter Wasser und der Ankunft des vom Meeresboden zurückgeworfenen Echos; aus der bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Wasser kann derart die Meerestiefe ermittelt werden.

§ 47. Die Raumakustik. Befindet sich eine Schallquelle in einem geschlossenen Raum, so bildet sich wegen der zu geringen Entfernung zwar kein Echo aus, wohl aber ein *Nachhall* infolge der fortwährenden Reflexionen an den einander gegenüberstehenden Wänden. Der Nachhall bewirkt, daß auch nach dem Verstummen der Schallquelle der den Raum erfüllende Schall nur allmählich abklingt. Die Zeit, in der die von dem Nachhall beeinflusste Schallintensität auf den millionten Teil sinkt, wird nach Sabine, der am Ende des 19. Jahrhunderts die Raumakustik begründete, als Nachhallperiode bezeichnet. In Theatern und Konzertsälen ist ein gewisser Nachhall erwünscht, weil er Sprache, Gesang und Musik voller erscheinen läßt. Die günstigste („optimale“) Nachhallperiode liegt je nach der Größe des Saales zwischen etwa 1 und 2 Sekunden.

Ist J_a die auf eine Fläche auftreffende und J_r die von ihr reflektierte Schallenergie, so wird der Quotient $\frac{(J_a - J_r)}{J_a}$ als das *Dämpfungsvermögen* der Substanz bezeichnet, von der die Fläche gebildet wird. Es beträgt z. B. für Vorhänge $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$, für Holz $\frac{1}{20}$. Für ein offenes Fenster wird es definitionsgemäß gleich 1 gesetzt, weil ein solches überhaupt keinen Schall reflektiert. Ein erwachsener Mensch absorbiert aus einem Saale ungefähr ebensoviel Schall wie ein offenes Fenster von $\frac{1}{2}$ m².

Multipliziert man alle Flächen eines Saales mit den zugehörigen Werten des Dämpfungsvermögens, addiert man und fügt man dann noch die Dämpfungsäquivalente aller in dem Saale enthaltenen Objekte hinzu (Sessel, Menschen usw.), so erhält man

den Gesamtdämpfungswert des Saales. Das Produkt aus ihm und der Nachhallperiode hat nach einer von Sabine aufgefundenen, für die Raumakustik fundamentalen Beziehung einen ganz bestimmten, von dem Rauminhalt abhängigen Wert. Jede Vergrößerung des Gesamtdämpfungswertes verkleinert also im umgekehrten Verhältnis die Nachhallperiode. Dabei ist es gleichgültig, wo innerhalb des Saales die dämpfenden Objekte angebracht werden; auch kommt bei den einzelnen Objekten nur das *Produkt* aus dem Dämpfungsvermögen und der Fläche in Betracht.

Das akustische *Isolationsvermögen* von Substanzen drückt man durch die Zahl von Phon aus, um die der Schall bei dem Durchgang durch die isolierende Schicht geschwächt wird. Eine bessere Isolation als durch eine einzelne, besonders dicke Wand wird durch eine Kombination von zwei, durch eine Luftschicht getrennten Wänden erzielt; daraus erklärt sich der Nutzen von Doppeltüren.

§ 48. Interferenzen und Schwebungen von Tönen. Die Interferenz des Schalles läßt sich am besten derart nachweisen, daß man den von einer bestimmten Quelle kommenden Schall durch Verzweigung auf zwei verschiedenen Wegen zum Ohr gelangen läßt, wobei die Länge des einen Weges durch Verschieben von Röhren variiert werden kann. Beträgt der Unterschied der beiden Wege gerade ein *ungerades* Vielfaches einer *halben* Wellenlänge, so nimmt man in der Tat trotz der Schallquelle Stille wahr.

Gelangen an das Ohr gleichzeitig zwei Töne, die in der Schwingungszahl nur wenig verschieden sind, so nimmt man *Schwebungen* wahr; man hört einen Ton, der periodisch seine Stärke ändert. Die Zahl der Schwebungen ist dabei gleich der *Differenz* der Schwingungszahlen der beiden zusammentreffenden Töne.

Bei gleichzeitigem Erklingen von verschiedenen hohen Tönen kann man ganz allgemein *Kombinationstöne* hören, die der Summe oder Differenz der Schwingungszahlen der beiden Töne gleich sind.

§ 49. Schallempfänger. Die den Schallwellen eigentümlichen periodischen Schwankungen können auf einen von den Wellen getroffenen festen und selbst schwingungsfähigen Körper übertragen werden, der dann als *Schallempfänger* wirkt. Zu den Schallempfängern gehört auch das menschliche *Ohr*. In seinem Innern, in der sogenannten Schnecke, befindet sich, auf der Basilar-

Membrane aufsitzend, das nach seinem Entdecker so bezeichnete Cortische Organ. Es ist eine Membrane aus Tausenden von Fasern, von denen jede für sich schwingen kann.

§ 50. Das Grammophon. Ein Schallempfänger kann auch als Schallaufzeichner verwendet werden, indem mit dem schwingenden Teil in geeigneter Weise ein Schreibstift verbunden wird. Auf diesem Gedanken beruht der von Edison 1877 erfundene *Phonograph*, der später zu dem Grammophon ausgestaltet wurde. Die Aufzeichnung erfolgt mittels einer Edelsteinspitze in einer gleichmäßig gedrehten Wachsplatte, während sich der Schreibstift selbst langsam in radialer Richtung vorwärtsschiebt.

Unter dem Einfluß der Schwingungen des Schallempfängers führt der Schreibstift kleine seitliche Bewegungen aus, wofür auf der Platte eine Breite von 0,1 mm zur Verfügung steht. In der Weite der seitlichen Bewegung kommt die Tonstärke, in dem periodischen Abstand zweier benachbarter Ausschläge die Tonhöhe zum Ausdruck.

Wird nun umgekehrt in die bei der Aufzeichnung entstandene Tonfurche später eine mit einer Membrane verbundene Nadelspitze eingesetzt und die Platte in Drehung versetzt, so folgt die Spitze der Furche und versetzt dadurch die Membrane in hörbare Schwingungen, die die aufgezeichneten Töne wiedergeben.

Zweiter Teil.

Wärmelehre.

Fünftes Kapitel.

Allgemeine Wärmelehre.

§ 51. **Die Temperatur.** Die Entwicklung der exakten Wärmelehre begann im 18. Jahrhundert mit der Schaffung einer genauen *Temperaturskala*, die durch die Einführung zweier fester *Fundamentalpunkte* ermöglicht wurde. Die in der Wissenschaft übliche Celsius-Skala benutzt als solche den Gefrierpunkt und den Siedepunkt des Wassers unter normalem Druck und teilt die Ausdehnung einer Flüssigkeit zwischen diesen beiden Fundamentaltpunkten in hundert gleiche Teile, die den Temperaturgraden entsprechen. Die Réaumurische Skala teilt denselben Abstand in 80 und diejenige von Fahrenheit in 180 Teile. Letztere ordnet dem Eispunkt die Zahl 32 zu, die beiden anderen Skalen hingegen die Zahl Null.

Die Temperaturmessung oder Thermometrie gründet sich im wesentlichen auf die beiden Erfahrungstatsachen, daß mit zunehmender Temperatur die Körper ihr Volumen und im besonderen die Gase ihren Druck vergrößern. Die Beobachtungen zeigen, daß sich der Druck eines Gases bei einer Temperaturänderung um einen Grad bei *jeder* Temperatur um den *gleichen* Bruchteil eines Normaldruckes ändert; z. B. um $p_0/273,2$, wenn p_0 der Druck bei 0° C ist. Daraus kann geschlossen werden, daß bei $-273,2^\circ$ der *absolute Nullpunkt* der Temperatur liegt; man erhält somit die absolute Temperatur, indem man zu den von dem Gefrierpunkt des Wassers aus gezählten Celsiusgraden noch $273,2$ hinzuaddiert.

§ 52. **Das Thermometer.** Unter den Instrumenten, die der Temperaturmessung dienen, ist aus dem Alltagsleben das *Queck-*

silberthermometer am bekanntesten. Quecksilber hat die Vorzüge, daß es erst bei großer Kälte gefriert und erst bei sehr hoher Temperatur siedet, daß es ferner undurchsichtig ist, das Glas nicht benetzt, leicht chemisch rein hergestellt werden kann und daß seine Ausdehnung beträchtlich die des Glases überragt. Vor der Füllung werden das Quecksilber und die Innenwand des Thermometerglases sorgfältig von Luft befreit. Zur Vermeidung der störenden Nachwirkungseffekte des Glases werden in der Thermometrie besondere Glassorten, sogenannte Jenaer Gläser, verwendet, die von diesen Effekten ziemlich frei sind. Zur Fixierung der beiden Fundamentalpunkte wird das Thermometer mit schmelzendem, salzfreiem Eis bedeckt, bzw. von den Dämpfen umgeben, die siedendem Wasser entweichen.

Der Meßbereich der Quecksilberthermometer ist nach unten durch den Gefrierpunkt des Quecksilbers, bei etwa -38°C , begrenzt. Zur Messung tieferer Temperaturen benutzt man Alkohol, Toluol und vor allem Pentan, das bis -200°C verwendbar ist. Unter gewöhnlichem Druck können Quecksilberthermometer bis 357° benutzt werden, bei welcher Temperatur das Quecksilber siedet. Da aber der Siedepunkt durch Druckerhöhung hinaufgesetzt werden kann, lassen sich Quecksilberthermometer aus schwer schmelzbarem Glas, die mit Gas unter sehr hohem Druck gefüllt worden sind, bis zu 500, ja bis zu 700° verwenden.

Eine besondere Form des Flüssigkeitsthermometers ist das Maximum- und Minimumthermometer, bei dem durch einen zurückbleibenden geeigneten Zeiger die höchste und tiefste Temperatur während einer Beobachtungszeit fixiert werden. Auch das allgemein bekannte Fieberthermometer ist ein Maximumthermometer, bei dem das obere Stück des Quecksilbers durch eine Luftblase von dem übrigen Quecksilber getrennt ist. Bei dem Steigen wird der abgetrennte Faden vorgeschoben, während er bei der Abkühlung an einer Verengung der Röhre steckenbleibt.

§ 53. Die Gasthermometer. An Genauigkeit sind den Flüssigkeitsthermometern weitaus die Gasthermometer überlegen, die auf der Veränderung des *Gasdrucks* bei konstantem Volumen beruhen. Dadurch, daß die Ausdehnung der Gase diejenige des Glases mehr als hundertfach übertrifft, werden wesentliche Fehlerquellen, die den Flüssigkeitsthermometern anhaften, ausgeschaltet. Vor allem aber dehnen sich die Gase viel regelmäßiger

als die Flüssigkeiten aus; dies zeigt sich darin, daß bei genügender Verdünnung mit verschiedenen Gasen gefüllte Thermometer untereinander übereinstimmen.

Man pflegt durch die Temperaturskala eines *Wasserstoffthermometers* zunächst die Skalen von „Normal-Quecksilberthermometern“ zu eichen; mit diesen werden dann erst die zu eichenden, für den Handel bestimmten Thermometer in besonderen Prüfanstalten verglichen. Für sehr genaue Messungen sowie für die Messung extrem hoher und tiefer Temperaturen bedient man sich, wovon noch die Rede sein wird, elektrischer Methoden.

§ 54. Die Wärmeausdehnung. Die Länge eines *festen* Stabes bei einer Temperatur t kann gleichgesetzt werden

$$l = l_0 (1 + \gamma t),$$

wobei l_0 die Länge bei 0° bedeutet und γ als der lineare *Ausdehnungskoeffizient* bezeichnet wird. Er kann für nicht zu hohe Temperaturen als konstant angesehen werden; für hohe Temperaturen wächst er aber selbst mit t . γ ist für alle Metalle sehr gering; so ist z. B. ein Meterstab aus Kupfer bei 100° nur um etwa $1\frac{1}{2}$ mm länger als bei 0° . Manche Legierungen zeigen einen negativen Ausdehnungskoeffizienten. Unter Benutzung dieser Tatsache ist Guillaume die Herstellung einer *Invar* genannten Nickel-Stahllegierung gelungen, für die der lineare Ausdehnungskoeffizient kleiner als ein Millionstel ist.

Die Volumeinheit eines festen Körpers von dem linearen Ausdehnungskoeffizienten γ dehnt sich bei einer Erwärmung um 1° C auf $(1 + \gamma)^3$ ccm aus. Nun ist aber

$$(1 + \gamma)^3 = 1 + 3\gamma + 3\gamma^2 + \gamma^3$$

und somit, wenn wegen der Kleinheit von γ höhere Potenzen dieser Größe vernachlässigt werden können, näherungsweise gleich $1 + 3\gamma$. Die Volumeinheit vergrößert sich somit bei einer Erwärmung um 1° C um 3γ , oder es ist der sogenannte *kubische Ausdehnungskoeffizient* dreimal so groß wie der lineare.

Auf die Wärmeausdehnung der festen Körper muß bei der Legung von Eisenbahnschienen und bei der Konstruktion von Brücken Rücksicht genommen werden. Um eine Beeinflussung des Ganges eines Uhrpendels durch die Temperaturschwankungen zu verhindern, werden sogenannte Kompensationspendel benutzt,

die aus Metallen von verschiedenem Ausdehnungsvermögen zusammengesetzt sind. Andererseits wird die ungleiche Ausdehnung der Metalle bei den Metallthermometern verwertet.

Die Ausdehnung der Flüssigkeiten ist wesentlich größer als die der festen Körper. Quecksilber dehnt sich pro Grad um den ungefähr 5000. Teil seines Volumens aus. *Wasser* zeigt die merkwürdige Anomalie, daß sich sein Volumen bei Erwärmung von 0° bis nahezu 4° verringert, dann aber sich bei weiterer Erwärmung vergrößert. Bei 4° weist also Wasser die größte Dichte auf. Eine ähnliche Anomalie weist auch das schwere Wasser (D_2O) auf, das aber die höchste Dichte bei $+11^\circ$ besitzt.

Für die Ausdehnung der Gase gilt das von Gay-Lussac 1802, teilweise schon früher von Charles aufgefundene Gesetz, wonach

$$pV = p_0V_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right)$$

ist; dabei bedeuten p und V Druck und Volumen bei der Temperatur t , p_0 und V_0 hingegen bei der Temperatur von 0° . Es wächst also nicht nur, wie schon früher erwähnt, bei konstantem Volumen der Druck um $\frac{1}{273}$ pro Grad, sondern ebenso auch bei konstantem Druck das Volumen.

§ 55. Die spezifische Wärme. Die Wärme, die man einem Gramm Wasser zuführen muß, um es um 1° , genauer von $14\frac{1}{2}$ auf $15\frac{1}{2}^\circ$ zu erwärmen, gilt als Einheit der *Wärmemenge*, als sogenannte *Kalorie*¹. Die Zahl der Kalorien, die man einem Gramm eines Stoffes zuführen muß, um eine Erwärmung um 1° zu erreichen, wird als die *spezifische Wärme* des betreffenden Körpers bezeichnet. Daß sie für verschiedene Stoffe verschieden ist, hat zuerst Black um 1760 festgestellt.

Wasser weist unter allen festen und flüssigen Stoffen die größte spezifische Wärme auf (definitionsgemäß = 1). Alle anderen Stoffe haben eine kleinere spezifische Wärme, Alkohol z. B. etwa 0,5, Quecksilber gar nur 0,03. Für die meisten Metalle liegt die spezifische Wärme zwischen $\frac{1}{5}$ und $\frac{1}{30}$. Für Eis und Wasserdampf ist die spezifische Wärme nur etwa halb so groß wie für flüssiges Wasser.

¹ Das Tausendfache hiervon ist eine Kilogrammkalorie oder „große Kalorie“.

Das Produkt aus spezifischer Wärme und Atomgewicht wird als *Atomwärme* bezeichnet. Wie 1818 Dulong und Petit fanden, haben im *festen* Zustand alle chemischen Elemente ungefähr die gleiche Atomwärme, nämlich 6,4.

Namentlich bei den Gasen ist es notwendig, zwischen spezifischer Wärme bei konstantem Druck und spezifischer Wärme bei konstantem Volumen zu unterscheiden. Erstere überragt stets letztere. Das Verhältnis beider ist $\frac{7}{5}$ für einatomige und $\frac{5}{3}$ für zweiatomige Gase.

§ 56. Die Kalorimeter. Zur Messung der spezifischen Wärme und überhaupt zur Bestimmung von Wärmemengen bedient man sich sogenannter *Kalorimeter*, deren beide Haupttypen das Wasser- und das Eis-Kalorimeter sind. Bei ersterem bringt man den Körper, der aus der zu untersuchenden Substanz besteht und dessen Masse (m) und Temperatur (t) gegeben seien, in ein dünnwandiges, mit Wasser von der Masse m' und der Temperatur t' gefülltes Gefäß. Man mißt dann die Temperatur t^* , auf die das Wasser infolge der Wärmeabgabe durch den hineingebrachten Körper steigt. Ist c die spezifische Wärme des zu untersuchenden Körpers und c' diejenige des Wassers, so gilt die Beziehung

$$mc(t - t^*) = m'c'(t^* - t'),$$

woraus c ermittelt werden kann.

Bei dem *Eiskalorimeter* werden Wärmemengen durch die Masse von Eis bestimmt, die sie zu schmelzen vermögen. Dabei wird entweder das gebildete Schmelzwasser abgewägt oder aber wird, was genauere Bestimmungen ermöglicht, die Volumverringerung gemessen, die durch das Schmelzen eintritt; denn Eis weist ein geringeres Volumen als Wasser auf.

Die Wärmekapazität eines Kalorimeters muß so groß gewählt werden, daß Temperaturänderungen der Umgebung ohne merklichen Einfluß bleiben; darum gibt man dem Kalorimeter den Inhalt von etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Liter. Ferner muß der Wärmeaustausch des Kalorimeters mit seiner Umgebung so sehr wie möglich verhindert werden. Bei genauen Messungen muß auch darauf Rücksicht genommen werden, daß nicht nur die zu untersuchende Substanz, sondern auch das Kalorimeter selbst durch die Wärmezufuhr erwärmt wird. Die Wassermenge, die in kalorimetrischer Hinsicht dem Kalorimetergefäß äquivalent ist, wird als dessen *Wasserwert* bezeichnet; er

ist, wenn größere Genauigkeit verlangt wird, ebenso in Rechnung zu stellen wie der meßbare Wärmeaustausch mit der Umgebung.

§ 57. Die Wärmeleitung. Eine Übertragung von Wärme ist durch Leitung, durch Konvektion und durch Strahlung möglich. Als Maß der *Wärmeleitfähigkeit* eines Stoffes dient die Zahl von Kalorien, die in 1 Sekunde durch 1 cm² einer aus dem Stoffe gebildeten Platte hindurchgehen, wenn die beiden Grenzflächen eine Temperaturdifferenz von 1° C aufweisen. Die geleitete Wärmemenge ist der Temperaturdifferenz proportional. Die höchste Leitfähigkeit weist unter den reinen Metallen Silber auf, nämlich 1 (genauer 1,01); dann folgen Kupfer und Gold. Silber leitet die Wärme etwa 50mal besser als die am schlechtesten leitenden Metalle, ungefähr 300mal besser als Porzellan und ungefähr 10000mal besser als Watte. Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit schneidet ein in eine Flamme gehaltenes Drahtnetz die Flamme ab; auf dieser Tatsache beruht die Davysche *Sicherheitslampe*, die in Bergwerken in Gebrauch ist.

Das Wärmeleitvermögen der Flüssigkeiten und Gase ist durchwegs sehr gering; bei Wasser ist es etwa 700mal, bei Luft etwa 20000mal kleiner als bei Silber. Schlechte Wärmeleiter werden zum Wärmeschutz verwendet. Ein besonders guter *Wärmeisolator* ist eine ruhende Luftschicht, wie sie z. B. in Doppelfenstern oder in den kleinen Zwischenräumen von Kleidern und Pelzen eingeschlossen ist. Den besten Wärmeschutz bietet das Vakuum; die bekannte „Thermosflasche“ hat eine doppelte Glaswand, deren Zwischenraum luftleer gemacht ist.

§ 58. Die Konvektion der Wärme. Obwohl Flüssigkeiten und Gase sehr schlechte Wärmeleiter sind, können sie dennoch durch ihre *Strömungen* Wärme auf dem Wege sogenannter *Konvektion* übertragen. Wird nämlich eine Flüssigkeit oder ein Gas von unten erwärmt, so steigen die durch die Ausdehnung spezifisch leichter gewordenen Partien aufwärts, während an ihre Stelle kältere, niedersinkende Partien rücken.

In größtem Maßstab findet eine Wärmekonvektion in der irdischen Atmosphäre durch die *Passatwinde* statt. Sie entstehen dadurch, daß in den Äquatorialgegenden die warme Luft aufsteigt und an der Erdoberfläche die kältere Luft von den Polargegenden zum Äquator strömt. (Dabei wird eine Ablenkung durch die Erdrotation herbeigeführt.)

Eine praktische Anwendung findet die Wärmekonvektion des Wassers in der Zentralwasserheizung; ein System von Parallelschaltungen ermöglicht es hierbei, einzelne Heizkörper auszuschalten, ohne die Zirkulation in den anderen Heizkörpern unterbrechen zu müssen.

§ 59. Das mechanische Wärmeäquivalent. In allen Fällen, in denen durch mechanische Vorgänge Wärme oder umgekehrt durch Wärme Bewegung erzeugt wird, besteht ein *konstantes Umwandlungsverhältnis* zwischen der aufgewandten oder erzeugten mechanischen *Arbeit* und der entstandenen oder verbrauchten *Wärmemenge*. Dies wurde im Jahre 1842 von Joule auf experimentellem Wege und von Robert Mayer durch theoretische Überlegungen festgestellt.

Die Zahl der Arbeitseinheiten, die einer Kalorie entsprechen, wird als *mechanisches Wärmeäquivalent* bezeichnet. Es beträgt 426,9 Gramm-Meter oder $4,186 \cdot 10^7$ Erg. Mayer berechnete das Wärmeäquivalent indirekt auf Grund von Daten, die die spezifische Wärme der Gase betrafen. Joule bestimmte das Äquivalent direkt, indem er in einer Flüssigkeit ein Schaufelrad laufen ließ, das durch ein fallendes Gewicht betrieben wurde, und die hervorgerufene Temperaturerhöhung der Flüssigkeit maß.

Das Prinzip der Äquivalenz zwischen Arbeit und Wärme wurde von Robert Mayer im Jahre 1845 zu dem allgemeinen Prinzip der *Erhaltung der Energie* erweitert, das außer der mechanischen und thermischen auch die elektrische, magnetische, optische und chemische Form der Energie umfaßt. Unabhängig von Mayer, hat den Satz von der Erhaltung der Energie als ein für die Physik fundamentales Prinzip Helmholtz im Jahre 1847 aufgestellt.

Mechanische und thermische Energie sind indessen keineswegs die einzigen bekannten Formen der Energie; wir kennen auch elektrische, magnetische, optische und chemische Energie. Energie kann sich aus jeder dieser Formen in jede andere *verwandeln*, aber der *Gesamtbetrag* der Energie bleibt bei all diesen Umwandlungen, wie die Erfahrung zeigt, ungeändert. Was in der einen Form verschwindet, erscheint in der anderen Form wieder.

§ 60. Anwendungen des ersten Hauptsatzes. Das Prinzip der Äquivalenz zwischen Wärme und mechanischer Arbeit wird auch

erster Hauptsatz der Wärmelehre genannt. Aus ihm ergeben sich unmittelbar wichtige Folgerungen für zwei spezielle Arten von Prozessen, die als *adiabatisch* und *isotherm* bezeichnet werden. Unter einem adiabatischen Prozeß versteht man einen Vorgang, bei dem weder von außen her Wärme zugeführt noch auch nach außen hin Wärme abgegeben wird. Bei einem adiabatischen Prozeß muß nach dem ersten Hauptsatz eine äußere Arbeitsleistung eine äquivalente Verminderung des Wärmeinhalts des Systems zur Folge haben. Es muß sich also z. B. ein Gas, das sich adiabatisch ausdehnt und dabei gegen den äußeren Druck Arbeit leistet, abkühlen. Umgekehrt muß sich ein Gas bei adiabatischer Kompression erwärmen. Isotherme Vorgänge sind solche, die bei konstanter Temperatur verlaufen. Bei ihnen muß die zugeführte oder abgegebene Wärmemenge der geleisteten oder verbrauchten Arbeit gleich sein.

§ 61. Der zweite Hauptsatz. Der erste Hauptsatz findet eine wesentliche Ergänzung durch ein von Clausius im Jahre 1851 aufgestelltes, als zweiter Hauptsatz bezeichnetes Prinzip, wonach Wärme nicht von selbst von einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen kann. In einer anderen, gleichbedeutenden Fassung sprach William Thomson 1852 den zweiten Hauptsatz aus. Nach ihm ist eine periodisch funktionierende Maschine unmöglich, die lediglich durch Abkühlung eines Wärmereservoirs ständig Arbeit schaffen würde. Es scheint in der Tat undenkbar, einen Körper dadurch, daß man ihn unter die Temperatur seiner Umgebung abkühlt, als Energiequelle, etwa zum Betrieb eines Motors auszunutzen.

Eine exaktere Fassung erhielt das Clausius-Thomsonsche Prinzip durch den von Clausius geschaffenen Begriff der *Entropie*. Die Entropie erscheint für einen Vorgang, bei dem jeder Temperatureausgleich (durch Leitung oder Strahlung) und jede Reibung vermieden sind, dadurch definiert, daß sie sich bei einem Umsatz von Wärme um einen Betrag ändert, der dem Quotienten aus dieser Wärmemenge und der absoluten Temperatur gleich ist.

Für die Änderung der Entropie (S) gilt somit die Beziehung

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T},$$

wenn ΔQ die bei der Temperatur T aufgenommene bzw. (im Falle eines negativen Vorzeichens) abgegebene Wärmemenge ist. Die

Gesamtentropie eines Systems ist gleich der Summe der Einzelentropien. Betrachten wir z. B. zwei Körper, zwischen denen ein Wärmeaustausch erfolgt, indem die Wärmemenge ΔQ von dem Körper von der Temperatur T_1 zu dem Körper von der Temperatur T_2 übergeht, so ist die durch den Wärmeübergang hervorgerufene Änderung der Gesamtentropie

$$\Delta S = -\frac{\Delta Q}{T_1} + \frac{\Delta Q}{T_2}.$$

Da aber nach dem zweiten Hauptsatz Wärme nur von dem wärmeren zu dem kälteren Körper übergeht und wir den Index 1 demjenigen Körper zugeordnet haben, der die Wärmemenge ΔQ abgibt, so muß

$$T_1 > T_2$$

und somit

$$\Delta S > 0$$

sein.

Die Erfahrung zeigt nun ganz allgemein, daß Vorgänge, die die Entropie *vermehrten*, wie ein Temperatenausgleich oder die Entstehung von Reibungswärme, in der Natur ständig und ganz *von selbst* vor sich gehen. Alle die Entropie vermindernenden Vorgänge, wie die Schaffung von Arbeit aus Wärme, sind hingegen nur in Verknüpfung mit Entropie vermehrenden Vorgängen möglich, durch die sie mehr als kompensiert werden müssen. Infolge der ständigen Vermehrung der Entropie erfährt die in der Welt vorhandene Energie eine ständige *Entwertung*, ohne in ihrem Gesamtbetrage vermindert zu werden, denn es kann zwar jede beliebige Energieform in Wärme verwandelt werden, während die Umwandlung von Wärme in andere Energie durch den zweiten Hauptsatz beschränkt ist.

§ 62. Der thermodynamische Kreisprozeß. Der Idealtypus eines Prozesses, bei dem periodisch Wärme in Arbeit verwandelt wird, ist der von Carnot im Jahre 1824 untersuchte und nach ihm benannte sogenannte thermodynamische *Kreisprozeß*; er setzt sich aus zwei isothermen und zwei adiabatischen Teilvorgängen zusammen, wobei als wesentlich vorausgesetzt wird, daß jeder Wärmeverlust durch Fortleitung oder Strahlung vermieden sein muß.

Der Körper, der als „Träger“ des Kreisprozesses oder, wie man auch sagt, als „arbeitende Substanz“ dient (man denke an

ein Gas oder einen Dampf), wird zunächst, während er mit einem Wärmereservoir verbunden bleibt, also bei konstanter Temperatur (T_1 in absolutem Maß) ausgedehnt. Dann wird die Verbindung mit dem Reservoir gelöst und der Körper adiabatisch bis zu einem bestimmten Volumen ausgedehnt. Hernach wird der Körper mit einem zweiten Reservoir von der absoluten Temperatur T_2 verbunden und nun bis zu einem Volumen komprimiert, das so beschaffen ist, daß eine anschließende adiabatische Kompression wieder zu dem ursprünglichen Zustand zurückführt (charakterisiert durch ein Wertepaar von Druck und Volumen). Graphisch ist ein solcher Kreisprozeß, der sich zwischen vier Zuständen (I, II, III, IV) abspielt, in einer Volumen-Druck-Ebene durch ein Diagramm von der Art der Abb. 26 darstellbar.

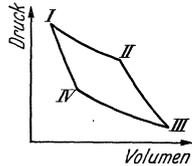


Abb. 26. Thermodynamischer Kreisprozeß.

Es sei Q_1 die Wärmemenge, die dem heißeren Reservoir entnommen, und Q_2 diejenige, die an das kältere Reservoir abgegeben wird. Die hiermit verbundene Entropieänderung ist (weil die aufgenommene Wärme positiv und die abgegebene negativ zu rechnen ist)

$$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2}.$$

Da ΔS nie negativ und nur im günstigsten Fall gleich Null sein kann, ist also im idealen, günstigsten Fall

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}.$$

In Arbeit wird der Unterschied der beiden Wärmemengen, also $Q_1 - Q_2$ umgewandelt. Setzen wir

$$Q_1 - Q_2 = \eta Q_1,$$

wobei η der *Wirkungsgrad* genannt wird, so finden wir somit aus der vorletzten Gleichung

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Sind also beispielsweise die Temperaturen der beiden Reservoirs 100° und 20° , ist also $T_1 - T_2 = 80$ und $T_1 = 373$, so beträgt der ideale Wirkungsgrad ungefähr 21%. Der Wirkungsgrad ist dabei völlig unabhängig von der Natur der arbeitenden Substanz.

§ 63. Der Nernstsche Wärmesatz. Die beiden thermodynamischen Hauptsätze fanden im Jahre 1906 eine bedeutungsvolle Ergänzung durch ein von Nernst aufgestelltes und oft auch als dritter Hauptsatz bezeichnetes Prinzip. Es lehrt im wesentlichen die Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes. Als eine notwendige Folgerung ergibt sich aus dem Nernstschen Wärmesatz, daß die spezifische Wärme aller festen oder flüssigen Körper gegen Null abfallen muß, wenn sich die Temperatur dem absoluten Nullpunkt nähert. Dies zeigt in der Tat das Experiment (vgl. auch § 79).

Sechstes Kapitel.

Die Umwandlungen des Aggregatzustandes.

§ 64. Das Schmelzen. Für jeden chemischen Stoff läßt sich eine für ihn charakteristische, als *Schmelzpunkt* bezeichnete Temperatur angeben, bei der er im Falle der Erhitzung aus dem festen in den flüssigen Zustand übergeht. Der *Gefrierpunkt*, bei dem der flüssige Stoff im Falle der Abkühlung erstarrt, fällt im allgemeinen mit dem Schmelzpunkt zusammen.

Black machte um das Jahr 1760 die wichtige Entdeckung, daß bei dem Schmelzen eine bestimmte Wärmemenge verbraucht wird, die man, indem man sie auf die Masseneinheit bezieht, als *Schmelzwärme* bezeichnet. Umgekehrt wird diese Wärme, von der man sagt, daß sie in der Flüssigkeit *latent* sei, bei dem Gefrieren wieder frei. Die Tatsache der latenten Wärme erklärt es, warum ein in eine Flüssigkeit gestecktes Thermometer bei der Abkühlung an dem Schmelzpunkt stehen bleibt, bis die ganze Substanz gefroren ist.

Den tiefsten Schmelzpunkt hat unter allen Stoffen Helium (-272°), den zweitniedrigsten Wasserstoff (-257°). Hoch liegt im allgemeinen der Schmelzpunkt der Metalle. Sehr hoch ist er bei Platin, Iridium, Tantal und vor allem bei *Wolfram* (3300°), das deshalb zur Herstellung der Glühfäden in elektrischen Lampen verwendet wird. Unter den Stoffen, die bei gewöhnlicher Temperatur flüssig sind, ist durch einen besonders tiefen Gefrierpunkt (-200°) das Pentan ausgezeichnet.

Die Schmelzwärme ist für Wasser recht groß und beträgt 80 cal. Bringt man 1 kg Eis mit 1 kg siedenden Wassers zu-

sammen, so erhält man 2 kg Wasser von nur 10°. Für Quecksilber beläuft sich die Schmelzwärme auf 3 cal. Bei den meisten Stoffen tritt durch das Schmelzen eine Vergrößerung des Volumens ein. Da hiebei Arbeit gegen den äußeren Druck zu verrichten ist, wird bei den meisten Stoffen der Schmelzpunkt durch Druck erhöht. Zu den wenigen Ausnahmen gehört das *Wasser*. Das Schmelzen des Eises ist mit einer Volumverringern verbunden, weshalb auch Eis auf Wasser als spezifisch leichter schwimmt. Durch Druck wird daher der Schmelzpunkt von Eis erniedrigt, und zwar um 0,0075° bei einer Steigerung des Drucks um je eine Atmosphäre. Eis, das unter der Einwirkung eines Drucks schmilzt, gefriert wieder, wenn der Druck aufhört. Dadurch erklärt es sich, daß eine durch ein Gewicht belastete Drahtschlinge, die um einen Eisblock gelegt wird, durch diesen hindurchwandert. Das Gefrieren des Wassers kann mit so gewaltigen Druckkräften verbunden sein, daß eine mit Wasser gefüllte gußeiserne Bombe beim Gefrieren gesprengt wird.

§ 65. Die Verdampfung. Ebenso wie dem Übergang aus dem festen in den flüssigen Zustand entspricht bei gegebenem Druck auch dem Übergang aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand, also der Verdampfung, eine charakteristische Temperatur, die als *Siedepunkt* bezeichnet wird und die mit dem Kondensationspunkt übereinstimmt. Am tiefsten ist der Siedepunkt bei Helium, am höchsten bei den Metallen. Alkohol siedet bei 78°, Quecksilber bei 360°.

In sehr hohem Grade ist der Siedepunkt von dem Druck abhängig. Da alle Flüssigkeiten bei der Verdampfung ihr Volumen sehr beträchtlich vergrößern, so bewirkt ganz allgemein (auch bei Wasser) eine Druckerhöhung eine Erhöhung des Siedepunktes, hingegen eine Herabsetzung des Druckes eine Erniedrigung. Wasser siedet z. B. bereits bei 50° bei einem Druck von 0,12 Atm., jedoch erst bei 121° bei einem Druck von 2 Atm. Auf der Siedepunkterhöhung beruht der von Papin um 1680 erfundene Dampfkochtopf, in dem Speisen höher erhitzt werden können, als dies in offenen Kochgefäßen möglich ist. Auf Bergen siedet Wasser bei tieferer Temperatur als in der Ebene.

Die *Verdampfungswärme* ist wesentlich größer als die Schmelzwärme; für Wasser von 100° beträgt sie z. B. 539 cal. Umgekehrt wird diese Wärmemenge bei der Kondensation frei.

Ein Prozeß, bei dem eine Flüssigkeit zum Verdampfen gebracht und sodann der Dampf kondensiert wird, wird als *Destillation* bezeichnet. Wird ein Gemisch von zwei Flüssigkeiten destilliert, so enthält der gebildete Dampf stets einen größeren Bruchteil an der Substanz mit niedrigerem Siedepunkt; durch Wiederholung des Vorganges kann somit die Substanz von der anderen mit höherem Siedepunkt abgetrennt werden. Auf diesem Wege sogenannter fraktionierter Destillation wird z. B. Benzin aus Rohöl gewonnen.

§ 66. Verdunstung und Sublimation. Der Übergang von Flüssigkeiten in den dampfförmigen Zustand erfolgt nicht nur durch Sieden, sondern auch bei Temperaturen unterhalb des Siedepunktes durch langsame *Verdunstung*. Auch diese erfordert einen entsprechenden Wärmeverbrauch; hierdurch erklären sich die starken Abkühlungen, die rasch verdunstende Flüssigkeiten, wie Äther, hervorrufen, aber auch der bekannte Temperaturfall, der auf einen Regen an einem heißen Sommertage folgt.

Zwischen festem und dampfförmigem Zustand sind auch direkte Übergänge möglich; man spricht dann von *Sublimation*. Bekannte Beispiele bieten die „Verdunstung“ von Eis und die rasche Verbreitung des Duftes fester Riechstoffe. Die Sublimationswärme ist gleich der Summe aus der Schmelz- und der Verdampfungswärme.

§ 67. Der gesättigte Dampf. Wenn Dampf neben der Flüssigkeit besteht, aus der er sich bildet, so bewirkt eine Zufuhr von Wärme durch Verdampfung eine Vergrößerung der Dampfmenge; umgekehrt führt eine Abkühlung auf dem Wege der Kondensation eine Verringerung der Dampfmenge herbei. Dampf, der auf solche Art mit seiner Flüssigkeit „koexistiert“, wird als *gesättigt* bezeichnet. Hingegen nennt man Dampf, der für sich allein besteht, *überhitzt*.

Überhitzter Dampf befolgt das Boylesche Gesetz, so daß bei gegebener Temperatur gleichwohl der Druck oder das Volumen beliebig verändert werden können. Für gesättigten Dampf, der mit seiner Flüssigkeit im Gleichgewichte ist, entspricht hingegen einer gegebenen Temperatur auch ein ganz bestimmter Druck; er wird der *Dampfdruck* oder Sättigungsdruck bei dieser Temperatur genannt. Da zu einer gegebenen Temperatur und

einem gegebenen Druck auch eine ganz bestimmte Dichte gehört, so entfällt im Zustande der Sättigung auf 1 Kubikmeter bei jeder Temperatur eine ganz bestimmte Dampfmenge, z. B. 17 g bei 20° C und 30 g bei 30° C. Es ist dies zugleich die *Maximalmenge* von Dampf, die bei diesen Temperaturen in 1 Kubikmeter enthalten sein kann. Ist nicht genügend Flüssigkeit vorhanden, um bei der Erwärmung so viel Dampf pro Kubikzentimeter zu liefern, so wird der Dampf bei fortgesetzter Wärmezufuhr überhitzt. Umgekehrt kann überhitzter Dampf dadurch in den gesättigten Zustand gebracht werden, daß entweder durch Abkühlung oder durch Volumverringern Kondensation herbeigeführt wird.

Mit der Temperatur wächst der Dampfdruck; bei ungefähr 100° C erhöht er sich für Wasser um 27 mm Quecksilber für eine Temperaturvermehrung um 1° C. Eine Flüssigkeit siedet bei derjenigen Temperatur, bei der ihr Dampfdruck dem auf der Oberfläche lastenden Druck gleich ist. Darum siedet Wasser auf hohen Bergen bei tieferen Temperaturen als in der Ebene.

Bei einem ganz bestimmten Wertepaar von Druck und Temperatur können auch alle drei Aggregatzustände nebeneinander bestehen; bei Wasser liegt dieser sogenannte Tripelpunkt bei + 0,0075° und 0,006 Atm.

§ 68. Die Luftfeuchtigkeit. Die in Gramm ausgedrückte Menge von Wasserdampf, die Luft in 1 Kubikmeter — und zwar in der Regel im ungesättigten Zustande — enthält, wird als die *absolute Feuchtigkeit* der Luft bezeichnet. Das Verhältnis zwischen ihr und derjenigen Menge, die bei der gegebenen Temperatur in 1 Kubikmeter im Zustande der Sättigung vorhanden wäre, nennt man die *relative Feuchtigkeit*; sie wird in Prozenten ausgedrückt. Diejenige Temperatur, bis zu der die Luft abgekühlt werden müßte, um mit dem tatsächlich in ihr vorhandenen Wasserdampf gesättigt zu sein, und bei der somit Kondensation einsetzen würde, wird der *Taupunkt* genannt. Er liegt demnach um so tiefer unterhalb der tatsächlichen Temperatur, je trockener die Luft ist. Bei Abkühlung erfolgt die Kondensation als Taubildung, vor allem an der Oberfläche fester Körper. Vom hygienischen Standpunkte aus erscheint in Wohnräumen eine Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 75% als das Richtige.

§ 69. **Die Hygrometrie.** Die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit ist Aufgabe der sogenannten Hygrometrie; ihre wichtigsten Meßinstrumente sind das Taupunkthygrometer, das Psychrometer und das Haarhygrometer. Bei dem *Taupunkthygrometer*, das im 18. Jahrhundert von Daniell erfunden wurde, wird ein Gefäß durch Ätherverdunstung in seinem Inneren abgekühlt, bis seine Oberfläche sich mit Tau beschlägt und dadurch ihr Aussehen verändert. Ein eingetauchtes Thermometer zeigt den Taupunkt an.

Das *Psychrometer* von August benutzt zwei nebeneinanderstehende Thermometer; das eine gibt die Lufttemperatur an, das andere ist mit einem Lämpchen umhüllt, das durch einen Docht feucht erhalten wird. Das Wasser des Lämpchens verdunstet und verbraucht dadurch Wärme, die dem Thermometer entzogen wird, so daß dieses einen tieferen Stand als das andere Thermometer anzeigt. Die Differenz ist aber um so größer, je stärker die Verdunstung ist, und diese ist wieder um so lebhafter, je trockener die Luft ist. Aus der Temperaturdifferenz der beiden Thermometer kann so die Luftfeuchtigkeit bestimmt werden.

Eine dritte Gruppe von Hygrometern benutzt die Tatsache, daß die Länge oder Torsion (Verdrehung) eines hyroskopischen Körpers, wie einer Darmsaite oder eines Haares, von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt. Die Längen- oder Gestaltänderung wird durch einen Hebel auf einen Zeiger übertragen; die Eichung erfolgt auf empirischem Wege.

§ 70. **Der kritische Zustand.** Im Jahre 1869 entdeckte Andrews, daß es für jedes Gas eine *kritische Temperatur* gibt, oberhalb deren auch bei noch so starkem Druck eine *Verflüssigung* nicht herbeigeführt werden kann. Erst bei der kritischen Temperatur wird es überhaupt möglich, daß das Gas als Dampf neben dem verflüssigten Gase im Gleichgewicht bestehen kann. Der kritischen Temperatur entspricht daher auch ein bestimmter kritischer Druck.

Besonders tief, bei -268° , liegt die kritische Temperatur des Heliums; diejenige des Wasserstoffes beträgt -240° , auch diejenige des Sauerstoffes und Stickstoffes liegt unterhalb von -100° . Nur bei *Kohlensäure* liegt die kritische Temperatur recht hoch, nämlich bei $+31^{\circ}$, so daß Kohlensäure durch Anwendung genügend starken Druckes schon bei Zimmertemperatur verflüssigt

werden kann. Für Wasserdampf beträgt die kritische Temperatur 374° ; oberhalb dieser Grenze verschwindet die Verschiedenheit im thermischen Verhalten, die für gewöhnlich Wasserdampf von einem „permanenten“ Gase unterscheidet.

Der durch bestimmte Werte der Temperatur und des Druckes gekennzeichnete kritische Zustand wurde bereits 1822 von Cagniard de la Tour experimentell verwirklicht. Im kritischen Zustande geht die Flüssigkeit ohne Aufkochen unmittelbar in Dampf über, und somit auch Wasser bei der schon erwähnten Temperatur von 374° und einem kritischen Druck von 224 Atm.; von dieser Tatsache macht das sogenannte Benson-Verfahren praktischen technischen Gebrauch.

§ 71. Die Verflüssigung der Luft. Die Verflüssigung des Sauerstoffes und damit auch der Luft gelang zuerst im Jahre 1877 Cailletet, indem er mittels besonderer Pumpen Sauerstoff auf 200 bis 300 Atm. komprimierte, ihn zugleich mit fester Kohlensäure kühlte und dann den enormen Druck plötzlich auf die Größe des gewöhnlichen Luftdruckes herabsetzte; durch die Expansion kühlte sich das komprimierte Gas so stark ab, daß es dabei flüssig wurde.

Zur Verflüssigung der Luft in großem technischen Maßstab dient der von Linde 1896 erfundene *Gegenstromapparat*. Er gründet sich auf die schon viel früher von Joule und Thomson entdeckte Erscheinung, daß sich im allgemeinen ein Gas abkühlt, wenn es langsam und unter Vermeidung von Wärmeaustausch mit seiner Umgebung durch eine poröse Öffnung von höherem zu tieferem Druck strömt.

In dem Lindeschen Apparat strömt ständig Luft, die bereits auf tieferen Druck gebracht, also „entspannt“ und dadurch abgekühlt ist, der erst zu entspannenden Luft entgegen und entzieht dieser Wärme. Dadurch sinkt die Temperatur immer tiefer, bis schließlich die Luft flüssig wird.

Aus flüssiger Luft verdampft wegen des niedrigeren Siedepunktes zuerst der Stickstoff und dann erst der Sauerstoff; auf Grund dieser Tatsache läßt sich, auf dem Wege über die Verflüssigung aus der Luft, Sauerstoff technisch in großem Maßstab gewinnen. Verflüssigte Luft wird in sogenannten Dewarschen Gefäßen aufbewahrt; sie haben eine doppelte Wandung mit evakuiertem Zwischenraum und überdies sind die Wände ver-

spiegelt, um einen Wärmeaustausch mit der Umgebung durch Strahlung tunlichst zu verhindern.

§ 72. Die Herstellung tiefster Temperaturen. Im Gegensatz zu Sauerstoff und Stickstoff werden Wasserstoff und Helium durch den Joule-Thomsonschen Prozeß nicht abgekühlt, sondern erwärmt, und erst bei außerordentlich tiefer Temperatur verhalten sich die beiden Gase in thermischer Hinsicht so wie Luft. Aus diesem Grunde müssen Wasserstoff und Helium zum Zwecke ihrer Verflüssigung vorgekühlt werden, bis diejenige Temperatur erreicht ist, bei der der Joule-Thomson-Effekt die Temperatur erniedrigt. Derart ist in der Tat Dewar die *Verflüssigung des Wasserstoffes* gelungen, indem er ihn nach der Kompression und vor der Entspannung durch flüssige Luft vorkühlte.

Wasserstoff siedet unter normalem Druck bei -253° ; doch kann man, indem man den Druck vermindert, die Siedetemperatur um weitere 6° herabsetzen und bei -259° Wasserstoff in den *festen* Aggregatzustand überführen.

Kamerlingh Onnes ist schließlich im Gegenstromapparat auch die Verflüssigung von *Helium* gelungen, indem er es mit flüssigem Wasserstoff vorkühlte. Bei normalem Druck siedet Helium bei -269° , also 3° abs. Keesom konnte durch Herabsetzen des Druckes Helium zum Gefrieren bringen, und zwar bei $0,8^{\circ}$ abs. Im Jahre 1933 vermochte dann de Haas durch Magnetisieren und rasches Entmagnetisieren bestimmter Substanzen bis auf $0,1^{\circ}$ vorzudringen, und 1935 konnte er auf diesem Wege sogar eine Temperatur von nur $0,0001^{\circ}$ abs. erreichen, die also nicht einmal den millionten Teil der Zimmertemperatur darstellt.

§ 73. Die Zustandsgleichung der Gase. Aus der schon in § 54 besprochenen Beziehung folgt, da $\alpha = \frac{1}{273,2}$ ist,

$$pV = p_0V_0 \frac{273,2 + t}{273,2}$$

oder

$$pV = p_0V_0 \alpha T,$$

wenn T die absolute Temperatur bedeutet. Bezeichnen wir nun mit v_0 dasjenige Volumen, das bei der Temperatur von 0° C und normalem Druck von der Masseneinheit des Gases erfüllt wird, und mit m die Masse des Gases, so wird V_0 gleich mv_0 , und wenn wir zur Abkürzung $p_0v_0 \alpha$ gleich R' setzen, wird also pV gleich $mR'T$.

Nun verhalten sich aber, wie schon erwähnt, nach der Feststellung von Avogadro die Dichten verschiedener Gase bei gegebenem Druck und gegebener Temperatur wie ihre Molekulargewichte. Dies ist, da $pV = mR'T$ ist, nur möglich, wenn sich wieder für verschiedene Gase die Konstanten R' umgekehrt wie die Molekulargewichte (μ) verhalten. Man kann also $R' = \frac{R}{\mu}$ setzen und somit schreiben

$$pV = m \frac{R}{\mu} T.$$

Wenn wir schließlich beachten, daß der Quotient aus Masse und Molekulargewicht die sogenannte *Molzahl* (n) darstellt, so läßt sich die *Zustandsgleichung* der idealen Gase in der Form ausdrücken

$$pV = nRT.$$

Die Größe R wird als die absolute *Gaskonstante* bezeichnet. Das von einem Mol eines beliebigen Gases bei 0°C und 1 Atm. erfüllte Volumen erscheint somit ebenfalls als eine universelle Konstante. In der Tat zeigt die Beobachtung, daß bei 0° und normalem Druck alle Gase ein Volumen von 22,414 Liter aufweisen. Daraus folgt, indem wir diese Zahl durch 273,2 dividieren,

$$R = 0,08204 \text{ Liter-Atm./grad} = 8,313 \cdot 10^7 \text{ erg/grad} = 1,986 \text{ cal/grad.}$$

Aus den zuletzt abgeleiteten Formeln ergibt sich auch, daß man das Molekulargewicht eines Stoffes unmittelbar finden kann, indem man seine *Dampfdichte* bestimmt; wenn man diese mit 22414 multipliziert, erhält man μ .

Wie 1802 Dalton fand, ist der *Partialdruck*, den ein jeder Bestandteil eines *Gemisches* von Gasen oder Dämpfen ausübt, ebenso groß wie der Druck, den er ausüben würde, wenn er allein das ganze Volumen erfüllen würde, das tatsächlich von dem Gemisch eingenommen wird.

Die Abweichungen von dem idealen Gasgesetz erweisen sich als um so beträchtlicher, je höher die kritische Temperatur des Gases liegt. Verhältnismäßig gut werden die Abweichungen durch das von van der Waals 1873 aufgestellte Gasgesetz beschrieben:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT;$$

dabei bedeutet v jetzt das Volumen pro Mol, a und b aber sind Konstanten. Aus der van der Waals'schen Gleichung lassen sich durch einfache theoretische Überlegungen in Übereinstimmung mit der Erfahrung die Gesetzmäßigkeiten des kritischen Zustandes ableiten.

§ 74. Die Lösungen. Ebenso wie der Übergang eines festen Stoffes in den flüssigen Aggregatzustand, so ist auch die *Auflösung* eines festen Stoffes in einem Lösungsmittel mit einem Wärmeumsatz verbunden. In der Regel wird dabei Wärme verbraucht, so daß bei der Auflösung *Abkühlung* eintritt. Eine Ausnahme stellt Gips dar, der bei seiner Lösung in Wasser Wärme entwickelt. Die Lösungswärme, die man auf die Masseneinheit des gelösten Stoffes bezieht, ist besonders groß für die Auflösung von Rhodankalium in Wasser; bei der Auflösung in gleicher Gewichtsmenge tritt eine Abkühlung um 34° ein. Sehr wirksame *Kältemischungen* gewinnt man, indem man Stoffe, die eine große Lösungswärme aufweisen, mit Eis oder Schnee vermennt.

Der *Gefrierpunkt* einer Lösung ist, wie schon um 1790 Blagden feststellte, gegenüber dem Gefrierpunkt des reinen Lösungsmittels *erniedrigt*. Meerwasser gefriert z. B. wegen seines Salzgehaltes erst bei einigen Graden unter Null. Der Siedepunkt einer Lösung erscheint hingegen gegenüber demjenigen des Lösungsmittels erhöht. Falls es sich um verdünnte, also nicht zu konzentrierte Lösungen handelt, ist sowohl die Gefrierpunktserniedrigung als auch die Siedepunktserhöhung der *Konzentration*, d. h. der in der Volumeneinheit enthaltenen Menge an gelöstem Stoff direkt, hingegen dem *Molekulargewicht* des gelösten Stoffes umgekehrt proportional. Auf diese Gesetzmäßigkeit gründen sich die für die Chemie sehr wichtigen thermometrischen Bestimmungen des Molekulargewichtes.

§ 75. Der osmotische Druck. Ein in einer Flüssigkeit aufgelöster Stoff zeigt ein ähnliches Expansionsbestreben wie ein in einem Gefäß eingeschlossenes Gas. Das Streben nach Ausdehnung ruft den sogenannten *osmotischen Druck* hervor, dessen Feststellung und Messung mittels *halbdurchlässiger* Substanzen gelungen ist; solche gestatten zwar dem Lösungsmittel, nicht aber dem gelösten Stoff den Durchgang. Ein Beispiel hierfür stellt eine mit Ferrosyankupfer überzogene feine Membrane dar, die zwar Wasser, nicht aber in Wasser gelösten Zucker durchläßt.

Wird nun ein mit einer Lösung gefülltes Gefäß, das oben mit einem Steigrohr versehen und unten durch eine halbdurchlässige Membrane abgeschlossen ist, in ein größeres, mit reinem Lösungsmittel gefülltes Gefäß getaucht, so steigt (Abb. 27) infolge des Eindringens des Lösungsmittels die Lösung in dem Steigrohr; sie steigt so hoch, daß der hydrostatische Überdruck gerade dem osmotischen Druck gleich ist. Derart sind Messungen des osmotischen Druckes möglich.

Wie 1885 van't Hoff feststellte, gilt für den osmotischen Druck (P) verdünnter Lösungen angenähert das *Gasgesetz*. Es ist nämlich, wenn wir mit V das Volumen der Lösung und mit m die Masse des gelösten Stoffes vom Molekulargewicht μ bezeichnen,

$$P V = \frac{m}{\mu} R T$$

oder

$$P = \frac{\rho}{\mu} R T,$$

wenn ρ die Dichte des gelösten Stoffes in der Lösung ist. Bei großer Verdünnung ist also der osmotische Druck sowohl der Konzentration als auch der absoluten Temperatur proportional.

§ 76. Die Dampfmaschine. Die Entwicklung der Wärmetechnik begann im Jahre 1769 mit der Erfindung der Dampfmaschine durch Watt; ihr Ziel ist die Umsetzung von Verbrennungswärme in mechanische Arbeit. In der Dampfmaschine wird der in einem *Kessel* erzeugte Wasserdampf unter seinem hohen Druck in den Zylinder geleitet, wo er durch seine Ausdehnung Arbeit leistet, indem er einen *Kolben* vor sich hinschiebt. Bei der Zurückbewegung des Kolbens entweicht der Dampf entweder in den *Kondensator*, wo er unter Wärmeentwicklung verflüssigt wird, oder aber gelangt er, was unter Umständen wegen der Raumersparnis vorteilhafter ist, unmittelbar in die freie Luft.

Durch eine automatische Steuerung wird abwechselnd der Dampf jeder der beiden Seiten des Kolbens zugeführt. Der Kolben gerät dadurch in eine hin- und hergehende Bewegung, die durch geeignete Vorrichtungen in eine rotierende verwandelt und auf die eigentlichen Arbeitsmaschinen übertragen wird. Der *praktische Nutzeffekt* der Dampfmaschine erreichte bis vor wenigen Jahr-

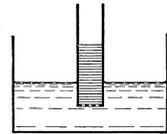


Abb. 27. Messung des osmotischen Drucks.

zehnten kaum 10%, konnte aber in den modernen Höchstdruckdampfmaschinen bis auf ungefähr 20% erhöht werden. Selbst wenn alle Wärmeverluste vermieden wären, könnte er jedoch bei der Dampfmaschine auf Grund des Carnotschen Prinzips etwa 35% nicht überschreiten.

In der *Dampfturbine*, die 1884 gleichzeitig von Parsons und de Laval erfunden wurde, treibt der Dampf durch seine Strömungsenergie die Schaufeln umlaufender Räder. Bei Spannungen von bloß 10 Atm. beträgt die Geschwindigkeit des ausströmenden Dampfes bereits über 1000 m pro Sekunde.

§ 77. **Der Verbrennungsmotor.** In den Verbrennungskraftmaschinen wird die Verbrennungswärme unmittelbar im Zylinder der arbeitenden Maschine produziert und dadurch ein viel höheres Temperaturgefälle und somit auch ein höherer Carnotscher Wirkungsgrad erzielt als in den Dampfmaschinen. Die Entwicklung der Verbrennungskraftmaschinen begann mit der Erfindung des *Viertaktmotors* durch Otto im Jahre 1876. Der Arbeitsvorgang eines solchen Motors setzt sich aus vier Stufen zusammen, deren jede einer halben Umdrehung der Kurbel des Motors entspricht. In der ersten Stufe saugt der Kolben das explosive Gemisch an, das von dem Brennstoff unter Beimengung von Luft geliefert wird. In der zweiten Stufe bewegt sich der Kolben entgegengesetzt und komprimiert das Gemisch. In dem Augenblick, in dem sich der Kolben dem Punkte stärkster Kompression nähert, wird das Gemisch entzündet, und zwar gegenwärtig gewöhnlich durch einen elektromagnetisch erzeugten Funken. Durch die explosionsartige Verbrennung wird ein starker Druck hervorgebracht, der in der dritten Stufe zur Ausdehnung des sehr heißen Gases führt; infolge der hierbei verrichteten Arbeit sinkt die Temperatur. In der vierten Stufe werden die verbrannten Gase ins Freie gelassen, worauf der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt ist.

Unter den *Explosionsmotoren*, die nach dem Prinzip von Otto arbeiten, sind am wichtigsten die *Gasmotoren* und die *Benzinmotoren*, die wegen ihres geringen Gewichtes vor allem zum Betrieb von Automobilen und in besonders leichter Bauart zum Betrieb von Flugzeugen verwendet werden.

Im Gegensatz zu den Explosionsmotoren haben die *Dieselmotoren* keine Zündvorrichtung; bei ihnen gelangt Schweröl durch

Spritzdüsen in die kurz vorher bis über die Entzündungstemperatur des Öls erhitzte Luft. Diesel-Motoren weisen einen praktischen Nutzeffekt bis zu 38% auf.

§ 78. Die Kältemaschine. Auf einer Umkehrung des Kreisprozesses, der den Wärmekraftmaschinen zugrunde liegt, beruhen die *Kältemaschinen*, die der Erzeugung tiefer Temperaturen dienen. Bei ihnen wird Energie verbraucht, um den Arbeitsstoff, gewöhnlich *Ammoniak*, zu veranlassen, aus einem kälteren Reservoir Wärme zu entnehmen und sie an ein Reservoir von höherer Temperatur abzugeben. Man unterscheidet bei den Kältemaschinen *Kompressions-* und *Absorptionsmaschinen*. Letztere benutzen bei ihrem Kreisprozeß die Absorption von Ammoniak durch Wasser und haben den Vorteil, daß sie keine mechanisch bewegten Teile besitzen.

§ 79. Die kinetische Auffassung der Wärme. Im Beginne des 19. Jahrhunderts begründete Rumford die Auffassung, daß die Wärme *mechanischer* Natur sei und auf Bewegungen kleinster Materieteilchen innerhalb der Körper beruhe. Aus dieser Vorstellung entwickelte sich zwischen 1850 und 1860 die sogenannte *kinetische Gastheorie*; sie nahm an, daß — im Gegensatz zu festen und flüssigen Körpern — in den Gasen die Molekeln an keine bestimmte Gleichgewichtslage gebunden sind, und daher im wesentlichen die Wärmeerscheinungen in Gasen auf sehr raschen *Translationsbewegungen* beruhen. Der Gasdruck erscheint darnach durch die unaufhörlichen Stöße der Gasmolekeln gegen die Wände des Gefäßes begründet.

Aus dieser Auffassung, die vor allem durch Clausius ausgebildet wurde, ergeben sich die *Geschwindigkeiten* der Molekeln zu Hunderten von Metern in der Sekunde; z. B. für Stickstoff zu etwa 500 m pro Sekunde bei Zimmertemperatur. Die molekulare Geschwindigkeit ist proportional zu den Quadratwurzeln aus dem Molekulargewicht und der absoluten Temperatur. Im Jahre 1920 ist es Stern gelungen, direkt die Geschwindigkeit der Molekeln zu messen, die von verdampfendem Metall, wie Silber, in Form sogenannter *Atomstrahlen* fortfliegen; er fand in der Tat dieselben Werte, wie sie sich bei der Temperatur des Dampfes aus der kinetischen Gastheorie ergeben.

Nach den Ergebnissen der Theorie ist anzunehmen, daß die Gasmolekeln bei gewöhnlichem Druck und gewöhnlicher

Temperatur einige milliardenmal in der Sekunde zusammenstoßen und daß die Strecke zwischen zwei Zusammenstößen, die sogenannte *freie Weglänge*, nur etwa 10^{-5} cm beträgt.

Die Ursache der Wärme *fester Körper* wird in der Energie der von den Atomen des Körpers ausgeführten *Schwingungen* erblickt. Durch diese Vorstellung fand das Gesetz von Dulong und Petit (s. § 55) eine einfache Begründung. Die zunächst schwer deutbaren Abweichungen von diesem Gesetz, die sich bei sehr tiefen Temperaturen bei allen Körpern, aber auch schon bei Zimmertemperatur bei einigen, wie vor allem dem Diamanten, zeigen, fanden eine befriedigende Erklärung, als Einstein 1907 die Quantenvorstellung in die kinetische Wärmelehre einfügte. Einstein nahm nämlich an, daß sich die Schwingungsenergie aus Elementen von der Größe $h\nu$ zusammensetze, wobei ν eine charakteristische atomare Frequenz ist, h aber das von Planck in die Physik eingeführte *elementare Wirkungsquantum* bedeutet, von dem noch oft die Rede sein wird, nämlich

$$h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \times \text{sec.}$$

Am überzeugendsten offenbart sich der innere Bewegungszustand der Materie in der sogenannten Brownschen Bewegung. Ganz kleine Körperchen, die in Flüssigkeiten oder Gasen schweben, führen, wie zuerst an dem Beispiel von Pflanzenpollenkörnern 1827 mikroskopisch der Botaniker Brown entdeckte, lebhaft, unregelmäßige Zickzackbewegungen aus. Diese stellen allerdings, wie man später erkannte, nicht die eigentlichen, durch die Wärme verursachten Lagenschwankungen dar, sondern die Verschiebungen, die in solchen Intervallen *resultieren*, die das Auge oder der photographische Apparat noch zu unterscheiden vermag.

Die Theorie der Brownschen Bewegung gestattet es, aus diesen resultierenden Verschiebungen mit sehr großer Genauigkeit eine sehr wichtige universelle Konstante zu berechnen, nämlich diejenige Zahl, durch die man die in den Atomgewichtstabellen verzeichneten Atomgewichte dividieren muß, um die absoluten Massen der Atome zu erhalten. Für diese Zahl, die man die *Loschmidtsche Zahl* nennt, weil 1865 Loschmidt zuerst ihren ungefähren Wert ableitete, ergibt sich der Wert

$$L = 6,06 \cdot 10^{23}.$$

§ 80. Das Gesetz von Avogadro. Da für ein Gas (nach der vierten Gleichung von § 73) bei gegebenen Werten des Druckes, der Temperatur und des Volumens auch die Molzahl festgelegt ist, so müssen wegen der universellen Proportionalität zwischen Mol- und Molekelzahl *alle Gase* bei gleichem Druck und gleicher Temperatur in einem Kubikzentimeter die *gleiche Anzahl von Molekeln* enthalten. Dieses wichtige Gesetz wurde bereits 1811 von Avogadro entdeckt und wird gewöhnlich nach ihm benannt. Die sogenannte Avogadrosche Konstante pro Kubikzentimeter beträgt, wie man nun genau weiß,

$$A = 2,705 \cdot 10^{19}.$$

Dritter Teil.

Optik.

Siebentes Kapitel.

Strahlenoptik.

§ 81. **Die geradlinige Ausbreitung der Lichtstrahlen.** Die von einer Lichtquelle oder einem beleuchteten Gegenstande kommenden *Lichtstrahlen* breiten sich, wie die alltägliche Erfahrung zeigt, *geradlinig* aus. Ein in den Weg der Strahlen gestellter undurchsichtiger Körper verhindert das Eindringen der Lichtstrahlen in den hinter ihm liegenden Raum und wirft infolgedessen auf Flächen, die sich in diesem Raum befinden, einen *Schatten*. Ist die Lichtquelle punktförmig, so hat der dunkle Raum die Form eines Kegels. Wird ein undurchsichtiger Körper von *zwei* punktförmigen Lichtquellen beleuchtet, so entsteht hinter ihm ein als Kernschatten bezeichneter dunkler Raum, in den von keiner der beiden Lichtquellen Strahlen einzudringen vermögen, und ferner zwei als Halbschatten bezeichnete Räume, von denen die Strahlen je einer Lichtquelle abgehalten werden. Ist die Lichtquelle räumlich ausgedehnt, so bleibt der Kernschatten als solcher scharf begrenzt, während im Halbschatten die Helligkeit allmählich gegen den Rand hin zunimmt.

Als Beispiele der Schattenbildung sind *Sonnen-* und *Mondfinsternisse* anzusehen. Erstere entstehen, wenn auf die Erde der Schatten des Mondes fällt, letztere, wenn der Mond als Vollmond in den durch die Sonne hervorgerufenen Schatten der Erde gelangt.

§ 82. **Die Dunkelkammer.** Befindet sich in der Wand eines verdunkelten Raumes eine kleine Öffnung, so entsteht infolge der geradlinigen Fortpflanzung der Lichtstrahlen auf einer der Öffnung gegenüberliegenden Wand eine verkleinerte Abbildung

der vor der Öffnung befindlichen Gegenstände (Abb. 28). Die Bilder sind allerdings nur dann kleiner als die Gegenstände, wenn diese von der Öffnung weiter als die Wand entfernt sind.

Da die Öffnung selbst eine endliche Ausdehnung haben muß, so entspricht auch jedem Punkte des Objekts eine Abbildung von endlicher Größe. Eine



Abb. 28. Die Dunkelkammer.

genügende Schärfe in der Abbildung ist daher nur bei Verwendung kleiner Öffnungen, aber auf Kosten der Helligkeit möglich. Die auf dieser Tatsache beruhende *Dunkelkammer* wurde 1589 von Porta erfunden. Dasselbe Prinzip wie der Dunkelkammer liegt auch der bekannten Erscheinung der Sonnenbildchen zugrunde, die man auf dem Boden dichter Waldungen wahrnimmt; die Bildchen erscheinen oval, weil die Sonnenstrahlen schräg gegen den Boden auftreffen.

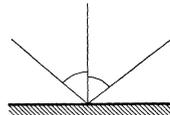


Abb. 29. Die Reflexion eines Lichtstrahls.

§ 83. **Das Reflexionsgesetz.** Seitens einer glatten Fläche wird, wie man schon im Altertum wußte, ein Lichtstrahl derart zurückgeworfen, daß der *Reflexionswinkel* (nämlich der Winkel, den der zurückgeworfene Strahl mit dem Einfallslot bildet) gleich ist dem *Einfallswinkel* (nämlich demjenigen Winkel, den der einfallende Strahl mit dem Einfallslot bildet). Die Richtung des reflektierten Strahles liegt dabei in der durch die Einfallrichtung und das Einfallslot bestimmten *Einfallsebene* (vgl. Abb. 29).

Wird vor einen *ebenen Spiegel* ein punktförmig leuchtendes Objekt gebracht, so schneiden, wie aus dem Reflexionsgesetz folgt, die rückwärtigen Verlängerungen aller von dem Spiegel zurückgeworfenen Strahlen einander in einem und demselben Punkt. Dieser wird als das *Spiegelbild* des betreffenden Punktes bezeichnet und liegt in der von dem leuchtenden

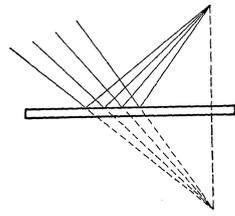


Abb. 30. Der ebene Spiegel.

Punkt auf den Spiegel gefällten Senkrechten ebenso weit hinter dem Spiegel, als sich der Punkt vor dem Spiegel befindet (Abb. 30). Das Spiegelbild stellt somit eine „virtuelle“ Lichtquelle dar, da sich die reflektierten Strahlen ebenso ausbreiten, als ob sie von dem Spiegelbild kämen. Die gewöhnlichen Spiegel des täglichen Lebens sind Glasflächen, deren Rückseiten mit Amalgam belegt sind.

§ 84. Die Methode der Spiegelablesung. Mit großem Vorteil wird der Planspiegel in der messenden Physik verwendet, wenn sehr kleine Ablenkungen festgestellt und genau gemessen werden sollen. Das Prinzip der Spiegelablesung ist aus Abb. 31 ersichtlich. Es sei S ein kleiner drehbarer Spiegel, der in seiner Ruhelage den von P kommenden Lichtstrahl auf einen

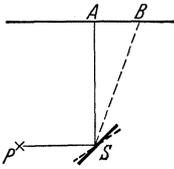


Abb. 31. Die Spiegelablesung.

Punkt A einer Skala zurückwerfe. Der Spiegel werde aus irgendeiner Ursache um den kleinen Winkel φ gedreht. Der von P kommende Strahl wird nunmehr derart auf einen Punkt B der Skala reflektiert, daß der Winkel ASB gleich ist 2φ , und somit, wenn s der Abstand des Spiegels von der Skala ist, die Strecke AB gleich $s \operatorname{tg}(2\varphi)$ wird. Derart kann aus der Ablesung an der Skala der Ablenkungswinkel ohne weiteres ermittelt werden. Die Methode der *Spiegelablesung* wurde 1826 von Poggendorff erfunden und wird darum gewöhnlich nach ihm benannt.

§ 85. Der Hohlspiegel. Die wichtigste Form eines nicht ebenen Spiegels wird durch ein kleines Stück einer spiegelnden konkaven Kugelfläche dargestellt. Die Mitte eines solchen „Hohlspiegels“ (S in Abb. 32) heißt der Scheitel, das Zentrum der Kugelfläche (O) der Krümmungsmittelpunkt, und die Verbindung der beiden Punkte die Achse. Der Winkel, unter dem der Spiegel von dem Krümmungsmittelpunkt aus erscheint, heißt die Öffnung des Spiegels.

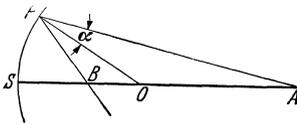


Abb. 32. Der Hohlspiegel.

Wir betrachten nun auf der Achse einen punktförmigen Gegenstand A , von dem ein Strahl den Hohlspiegel in dem Punkt P treffe. Nach dem Reflexionsgesetz finden wir den reflektierten Strahl, indem wir von P den Radius zu dem Kugelmittelpunkt O ziehen; denn der Punkt B , in dem der reflektierte Strahl die Achse schneidet, ist nach dem Reflexionsgesetz durch die Forderung bestimmt, daß

$$\sphericalangle APO = \sphericalangle OPB$$

ist.

Bezeichnen wir den Einfallswinkel mit α , so ist aber nun

$$\sphericalangle POS = \alpha + \sphericalangle PAS$$

und anderseits

$$\sphericalangle PBS = 2\alpha + \sphericalangle PAS.$$

Multiplizieren wir die vorletzte Gleichung mit zwei und subtrahieren wir sodann von ihr die letzte Gleichung, so finden wir

$$2 \sphericalangle POS - \sphericalangle PBS = \sphericalangle PAS$$

oder näherungsweise, wenn der Öffnungswinkel klein ist und a und b den Abstand des Gegenstandes und des Bildpunktes vom Scheitel des Spiegels bedeuten,

$$2 \frac{\widehat{PS}}{r} - \frac{\widehat{PS}}{b} = \frac{\widehat{PS}}{a}$$

oder

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r}.$$

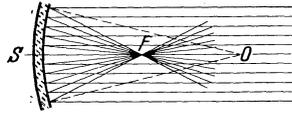


Abb. 33. Der Brennpunkt eines Hohlspiegels.

Rückt der Gegenstand in unendliche Ferne, fällt also der Strahl parallel zur Achse ein, so wird wegen des Verschwindens von $\frac{1}{a}$

$$b = \frac{1}{2} r.$$

Achsenparallele Strahlen werden also in einem Punkt (F) vereinigt, der die Achse in der Mitte zwischen Scheitel und Zentrum halbiert und der *Brennpunkt* genannt wird (Abb. 33).

Sein Abstand vom Scheitel heißt die *Brennweite* (f), und somit gilt allgemein die Beziehung, daß die Summe aus den reziproken Abständen von Gegenstand und Bild der reziproken Brennweite gleich ist oder

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

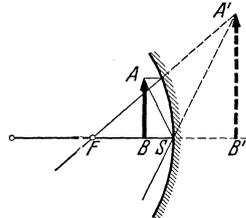


Abb. 34. Virtuelles Bild bei dem Hohlspiegel.

Von einem Gegenstand, dessen Entfernung von dem Scheitel kleiner als die Brennweite ist, liefert ein Hohlspiegel ein virtuelles (hinter dem Spiegel liegendes), aufrechtes, vergrößertes Bild (Abb. 34; Rasierspiegel!). Ist die Entfernung des Gegenstandes zwar größer als die einfache, jedoch kleiner als die doppelte Brennweite, so entsteht ein reelles, vergrößertes Bild (Abb. 35). Übertrifft die Entfernung die doppelte Brennweite, also den Krümmungsradius, so ist das Bild reell

und verkleinert (Abb. 36). In dem reellen Bild kommt es stets zu einer tatsächlichen Vereinigung der reflektierten Strahlen.

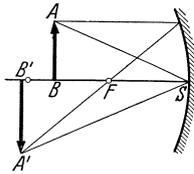


Abb. 35. Reelles, vergrößertes Bild bei dem Hohlspiegel.

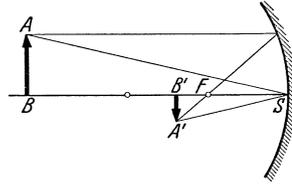


Abb. 36. Reelles, verkleinertes Bild bei dem Hohlspiegel.

Im Gegensatz zu den Hohlspiegeln liefern *konvexe* Spiegel stets verkleinerte und aufrechte virtuelle Bilder (Abb. 37; man denke an die bekannten bunten Glaskugeln in Gärten!). *Parabolische* Hohlspiegel werden bei astronomischen Teleskopen verwendet und im umgekehrten Richtungssinn der Strahlen als Scheinwerfer benutzt.

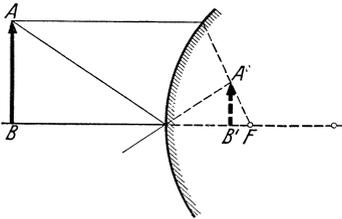


Abb. 37. Der Konvexspiegel.

§ 86. Das Brechungsgesetz. Ein Strahl, der aus einem Mittel in ein zweites dringt, erleidet, außer bei senkrechtem Einfall, stets eine als *Brechung* bezeichnete Richtungsänderung;

der Winkel, den der gebrochene Strahl mit der Richtung des Einfallslotes einschließt, wird als der Brechungswinkel bezeichnet. Nach dem von Snellius um 1620 aufgefundenen Brechungsgesetz ist das Verhältnis der Sinus von

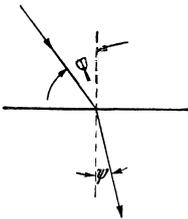


Abb. 38. Die Brechung des Lichtstrahls.

Einfalls- und Brechungswinkel eine für die beiden Medien charakteristische, vom Einfallswinkel unabhängige Konstante; sie wird als der *Brechungsexponent* oder Brechungsindex (n) von dem ersten zu dem zweiten Mittel bezeichnet. Es ist also (Abb. 38)

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n.$$

Das Brechungsverhältnis gegen Luft, oder genauer gesagt, gegen den leeren Raum wird der Brechungsexponent schlechthin genannt.

Je nachdem, ob der Brechungswinkel größer oder kleiner als der Einfallswinkel ist, heißt das zweite Mittel optisch dünner oder

optisch dichter als das erste; im optisch dichteren Mittel wird also der Lichtstrahl dem Einfallslotte genähert. Der größeren Massendichte muß keineswegs größere optische Dichte entsprechen. So bricht z. B. das Benzol das Licht stärker als Wasser, obwohl sein spezifisches Gewicht geringer ist. Der Brechungsexponent von einem Mittel zu einem zweiten ist immer reziprok zu dem Exponenten von dem zweiten zu dem ersten Medium oder symbolisch $n_{ab} \times n_{ba} = 1$; auch gilt die Beziehung

$$n_{ac} = n_{ab} \times n_{bc}.$$

Ein Strahl, der eine *planparallele Platte* durchsetzt, erfährt daher lediglich eine Parallelverschiebung (Abb. 39); der Betrag der Verschiebung ergibt sich zu $\frac{a \sin(\varphi - \psi)}{\sin \psi}$, wenn a die Dicke der Platte ist, φ der Einfallswinkel und ψ der Brechungswinkel.

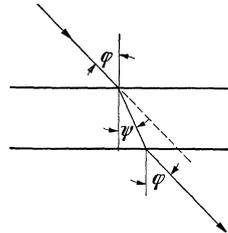


Abb. 39. Parallelverschiebung eines Lichtstrahls.

§ 87. Die totale Reflexion. Aus dem Brechungsgesetz ($\sin \varphi = n \sin \psi$) folgt, daß bei dem Übergang aus einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Mittel ($n < 1$) der Sinus des Brechungswinkels (ψ) größer als 1, also der Brechungswinkel selbst imaginär werden muß, wenn der Einfallswinkel (φ) größer als ein bestimmter *Grenzwinkel* ist. Wird dieser Grenzwinkel, dessen Sinus gleich dem Brechungsindex vom ersten zum zweiten Mittel ist, überschritten, so tritt *Totalreflexion* ein; der Strahl vermag dann überhaupt nicht in das optisch dünnere Mittel einzudringen. Für den Übergang in Luft aus Wasser beträgt beispielsweise der Grenzwinkel 49° , für den Übergang in Luft aus Glas 42° .

Die Totalreflexion erklärt den bekannten quecksilberartigen Metallglanz, den unter Wasser Luftblasen oder eingetauchte leere Gläser zeigen. Auf dem Prinzip der Totalreflexion beruhen auch die Leuchtbrunnen; man gibt den Wasserstrahlen eine solche Form, daß die in sie gesandten Lichtstrahlen aus ihnen nicht austreten können.

§ 88. Die Brechung durch ein Prisma. Durch zweimalige Anwendung des Brechungsgesetzes läßt sich der Gang eines Lichtstrahls durch ein *Prisma* leicht ermitteln. Die erste Brechung

(Abb. 40) erfolgt bei einem Glasprisma von Luft in Glas, die zweite von Glas in Luft, aber im allgemeinen in den beiden Fällen bei verschiedenen Werten des Einfallswinkels und somit auch des Brechungswinkels.

Es sei der Prismenwinkel φ , und n sei der Brechungsindex der das Prisma bildenden Substanz. Ferner sei α der Einfallswinkel, und β der zugehörige Brechungswinkel innerhalb des Prismas; bei dem Austritt aus dem Prisma sei der Einfallswinkel γ und der Austrittswinkel selbst δ . Sind, wie wir voraussetzen wollen, die

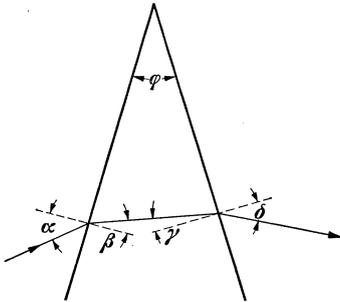


Abb. 40. Brechung eines Lichtstrahls durch ein Prisma.

Winkel α und δ klein, so können wir in dem Brechungsgesetz die Sinus der Winkel durch die Winkel selbst ersetzen; wir haben dann

$$\alpha = n \beta, \quad \delta = n \gamma.$$

Die gesamte *Ablenkung*, die durch das Prisma hervorgerufen wird, ist nun

$$\Theta = \alpha - \beta - (\gamma - \delta),$$

also

$$\Theta = \beta (n - 1) + \gamma (n - 1).$$

Da andererseits ein Dreieck von den Winkeln β , γ und $(180^\circ - \varphi)$ gebildet wird, ist

$$\beta + \gamma = \varphi$$

und somit

$$\Theta = (n - 1) \varphi.$$

Diese Formel verknüpft für kleine Einfallswinkel den Winkel der Ablenkung mit dem Prismenwinkel.

Wird der Einfallswinkel durch Drehen des Prismas variiert, so findet man eine ausgezeichnete Stellung, bei der die resultierende Ablenkung kleiner als bei jeder anderen Stellung ist. Der Winkel der *kleinsten Ablenkung* hängt dabei von dem Brechungsindex ab.

§ 89. Die Dispersion. Sendet man ein Bündel von Lichtstrahlen, das von einem schmalen Spalt kommt, durch ein Prisma hindurch, so ergibt sich auf einem Schirm als sogenanntes *Spektrum* die Aufeinanderfolge der Farben des Regenbogens; auf Rot mit der geringsten Ablenkung folgen Orange, Gelb, Grün, Blau und schließlich Violett, das die größte Ablenkung aufweist. Newton brachte nun in einem Schirm, auf dem ein Spektrum aufgefangen

wurde, eine kleine Öffnung an und ließ durch sie Strahlen einer bestimmten Farbe austreten und auf ein zweites Prisma fallen (Abb. 41). Newton stellte fest, daß das zweite Prisma keine Farbenänderung mehr hervorbringt und wies damit 1666 nach, daß das als *weiß* bezeichnete Licht eine zerlegbare *Mischung* von selbst nicht weiter zerlegbaren Strahlen der verschiedenen Regenbogenfarben darstellt. Die Zerlegung des Lichtes durch Brechung wird als *Dispersion* bezeichnet; durch den Unterschied der Brechungsexponenten für das äußerste Rot und äußerste Violett ist die sogenannte Totaldispersion eines Stoffes bestimmt.

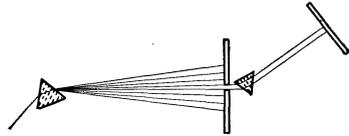


Abb. 41. Newton's Dispersionsversuch.

§ 90. Die Messung des Brechungs-

exponenten. Zur Bestimmung des Brechungsindex einer Substanz mißt man am einfachsten mittels eines Mikroskops die *Parallelverschiebung* des Lichtes an einer ebenen Platte aus diesem Stoff. Eine andere Methode, die sich auf die *Totalreflexion* gründet und in sogenannten Refraktometern benutzt wird, hat den Vorzug, daß man bei ihr nur geringe Mengen zur Untersuchung braucht; sie wird vor allem bei kleinen Kristallen und Flüssigkeiten angewendet. Der Brechungsindex kann auch mittels eines Prismas bestimmt werden; es ist dann zunächst durch Fernrohrbeobachtung der Winkel des Prismas zu ermitteln und sodann diejenige Stellung herbeizuführen, für die die Ablenkung ein Minimum wird. Die Prismenmethode eignet sich nicht nur für feste Körper, sondern auch für Flüssigkeiten, indem man diese in Hohlprismen gießt.

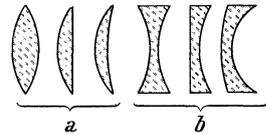


Abb. 42. Optische Linsen.

§ 91. Die Linsen. Ein von zwei Kugelflächen begrenzter durchsichtiger Körper stellt eine *optische Linse* dar. Die Linie, die die Mittelpunkte der beiden Kugelflächen verbindet, heißt die *Achse* der Linse. Nach der Form unterscheidet man (vgl. Abb. 42) Konvexlinsen, die in der Mitte breiter als an den Rändern sind, und Konkavlinsen, bei denen das Umgekehrte der Fall ist. Konvexlinsen können bikonvex oder plankonvex oder konkav-konvex sein, und Analoges gilt auch für Konkavlinsen. Konvexlinsen brechen auffallende Strahlen stets zueinander hin, machen sie also

konvergent, während Konkavlinsen die auffallenden Strahlen divergent machen. Darum werden Konvexlinsen als *Sammellinsen*, Konkavlinsen hingegen als *Zerstreuungslinsen* bezeichnet.

Wir betrachten nun in der Achse einer Linse einen punktförmigen Gegenstand *A*. Ein Strahl, der von *A* ausgehe, treffe die Linse, die wir als sehr dünn und von kleiner Öffnung voraussetzen, in dem Punkt *P* (Abb. 43). Es ist dann die Ablenkung des nach *B* gelangenden Strahles

$$\Theta = \sphericalangle PAO + \sphericalangle PBO.$$

Andererseits ist, wenn wir mit φ den Winkel bezeichnen, den die Tangenten an die Linsenflächen miteinander einschließen, der also dem Brechungswinkel eines Prismas entspricht,

$$OP = r \sin \frac{\varphi}{2},$$

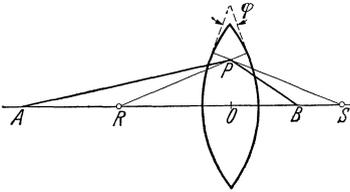


Abb. 43. Brechung eines Lichtstrahls durch eine Linse.

wenn *r* der Radius der beiden Linsenflächen ist. (Bezeichnen wir nämlich die Mittelpunkte der beiden Kreise, die die Linsen bilden, mit *R* und *S*, so ist wegen der beiden rechten Winkel zwischen Radius und Tangente der Winkel *RPS* gleich $180^\circ - \varphi$, und daher ist der Winkel *PRS* gleich $\frac{\varphi}{2}$).

Bezeichnen wir nun Gegenstands- und Bildweite (gemessen von *O*) mit *a* und *b*, so können wir näherungsweise setzen

$$\sphericalangle PAO = \frac{OP}{a}, \quad \sphericalangle PBO = \frac{OP}{b}.$$

Daher wird

$$\Theta = \frac{OP}{a} + \frac{OP}{b} = r \sin \frac{\varphi}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right).$$

Andererseits fanden wir aber nun bei der Betrachtung des Prismas, daß

$$\Theta = (n - 1) \varphi$$

ist. Somit ist wegen der vorausgesetzten Kleinheit des Winkels φ

$$(n - 1) \varphi = r \frac{\varphi}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$$

oder

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2(n - 1)}{r}.$$

Liegt der Gegenstand in unendlicher Ferne, so daß die Strahlen parallel zur Achse verlaufen, so wird

$$\frac{1}{b} = \frac{2(n-1)}{r}$$

und somit, da in diesem Sonderfalle b die *Brennweite* f darstellt,

$$f = \frac{r}{2(n-1)}.$$

Es gilt infolgedessen wieder wie bei dem Hohlspiegel die allgemeine Beziehung, daß die Summe aus den reziproken Abständen des Gegenstandes und des Bildes gleich der reziproken Brennweite ist, oder

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

Die reziproke, auf das Meter als Einheit bezogene Brennweite wird als die *Dioptrienzahl* der Linse bezeichnet; sie beträgt also z. B. 4 bei einer Brennweite von 25 cm. Bei Zerstreuungslinsen wird die Brennweite und daher auch die Dioptrienzahl negativ gerechnet. Für Kombinationen von Linsen addieren sich die Dioptrienzahlen unter Berücksichtigung des Vorzeichens.

Eine Sammellinse liefert, wenn sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite befindet, ein aufrechtes und vergrößertes, jedoch virtuelles Bild; befindet sich hingegen der Gegenstand außerhalb der Brennweite, so ist das Bild reell und verkehrt. Zerstreuungslinsen ergeben stets virtuelle und verkleinerte, aufrechte Bilder. Ganz allgemein ist die Summe aus der reziproken Gegenstands- und der reziproken Bildweite bei Berücksichtigung des Vorzeichens gleich der reziproken Brennweite.

Wird bei Linsen auch ihre endliche Breite berücksichtigt, werden also statt „unendlich dünner“ sogenannte dicke Linsen betrachtet, so folgt aus geometrischen Überlegungen das Vorhandensein von zwei zu der Achse senkrechten *Hauptebenen* (Abb. 44). Sie haben die Eigentümlichkeit, daß, wenn wir mit A und B zwei Punkte der Hauptebenen auf einer zu der Achse parallelen Geraden bezeichnen, jedem Strahl, der in dem einen Raum nach A hinzieht, im anderen Raum ein Strahl entspricht, dessen rückwärtige Verlängerung durch B hindurchgeht. In symmetrischen

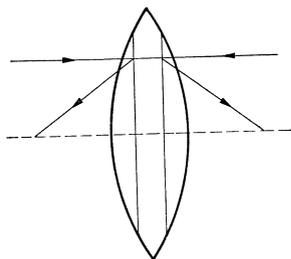


Abb. 44. Die Hauptebenen einer Linse.

bikonvexen Glaslinsen teilen die Hauptpunkte, nämlich die Schnittpunkte der Hauptebenen mit der Achse, die Linsendicke in drei ungefähr gleiche Teile.

§ 92. Die sphärische Abweichung. Nur Linsen von sehr kleiner Öffnung liefern punktförmige Bilder punktförmiger Gegenstände. Bei Linsen mit größerer Öffnung entsteht eine sogenannte *sphärische Abweichung* dadurch, daß die am Rande der Linse hindurchgehenden Strahlen sich in einem näher liegenden Punkte vereinigen als solche Strahlen, die die Linse in der

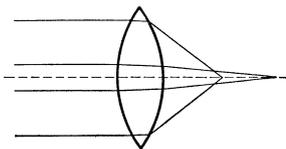


Abb. 45. Sphärische Abweichung von Lichtstrahlen.

Nähe der Achse durchsetzen (Abb. 45). An die Stelle des Brennpunktes tritt bei endlicher Linsenöffnung eine *Brennlinie*, deren Länge ein Maß der sphärischen Abweichung darstellt. Zur Verminderung der Abweichung verwendet man Linsenkombinationen auf Grund

der schon erwähnten Dioptrienregel. Ein Linsensystem, bei dem die sphärische Abweichung gut korrigiert ist, wird ein *aplanatisches* System genannt. Die Schärfe der Abbildung wird auch durch Verwendung von *Blenden* erhöht, die die Randstrahlen abhalten.

§ 93. Die chromatische Abweichung. Während die durch die sphärische Abweichung bedingten optischen Fehler den Linsen und Spiegeln gemeinsam sind, ergibt sich als eine nur den Linsen eigentümliche Fehlerquelle die *chromatische Abweichung*. Sie beruht



Abb. 46. Die achromatische Linse.

darauf, daß der Brennpunkt der stärker brechbaren, also gegen das Violett zu liegenden Strahlen näher zur Linse liegt als der Brennpunkt der schwächer brechbaren roten und gelben Strahlen. Die Folge davon ist das Auftreten farbiger Säume um die Bilder. Die chromatische Aberration hängt von der totalen Dispersion des Mittels ab, aus dem die Linse besteht, nämlich von dem Unterschied der Brechungsexponenten für das äußerste Rot und das äußerste Violett. Die Totaldispersion ist nun keineswegs für alle Glassorten gleich groß, sondern z. B. für sogenanntes Flintglas etwa doppelt so groß wie für Kronglas, obwohl beide Glasarten nahezu denselben Brechungsindex haben.

Auf diese Tatsache gründete sich die Erfindung der *achromatischen* Linsen durch Dollond um das Jahr 1750. Er kombinierte (vgl. Abb. 46) eine Hohl linse aus Flintglas mit einer in der Mitte

doppelt so dicken Sammellinse aus Kronglas. Dadurch erreichte er es, daß sich die Dispersionen der beiden Linsen wechselseitig aufhoben, während die Brechkraft, also die Dioptrienzahl, nur auf die Hälfte verringert wurde. Die Vereinigung der beiden Linsen wirkt demnach wie eine einzige achromatische Linse, deren Brechkraft halb so groß wie bei der Konvexlinse ist. In neuerer Zeit benutzt man statt Kron- und Flintglas ausgewählte „Jenaer Gläser“; unter diesen, die nach einem Verfahren von Abbe und Schott für optische Zwecke hergestellt werden, gibt es sowohl solche, die bei geringen Brechungsexponenten eine große Dispersion aufweisen, als auch solche, bei denen das Umgekehrte der Fall ist.

§ 94. Das Auge. In dem *Auge* stellt der mit der dunklen Aderhaut innen überzogene Augapfel eine Dunkelkammer dar, in der die Öffnung durch die Pupille gebildet wird. Die *Kristalllinse* wirkt als Sammellinse; vor ihr befindet sich (vgl. Abb. 47) in der vorderen Augenkammer eine wässrige Flüssigkeit, hinter ihr der feste Glaskörper. Flüssigkeit, Linse und Glaskörper stellen zusammen das brechende

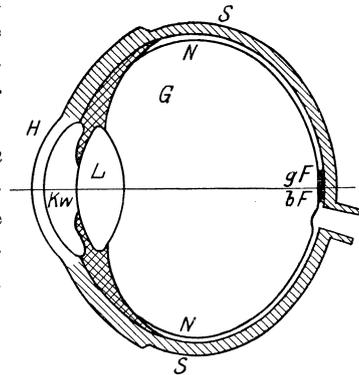


Abb. 47. Das Auge.
S Sehnhaut, *H* Hornhaut, *N* Netzhaut, *Kw* Kristallwasser, *L* Kristalllinse, *G* Glaskörper, *gF* gelber Fleck, *bF* blinder Fleck.

System des Auges dar. Die Kristalllinse entwirft ein verkehrtes, verkleinertes Bild auf der *Netzhaut*, die als eine Ausbreitung des Sehnervs zwischen der Aderhaut und dem Glaskörper eingebettet ist. An der Mündung des Nervs liegt der gelbe Fleck; nur der auf ihn fallende Teil des Netzhautbildes wird scharf wahrgenommen. Die Netzhaut enthält als äußerst lichtempfindlichen Stoff den Sehpurpur, auf den das Licht wie auf eine photographische Platte wirkt. Die entstehenden Bilder verschwinden jedoch stets sogleich wieder, während sich gleichzeitig der Sehpurpur ständig erneuert.

Daß das Auge sowohl ferne als auch nahe Gegenstände scharf sehen kann, beruht auf seinem *Akkomodationsvermögen*; man versteht darunter seine Fähigkeit, die Brennweite der Kristalllinse zu verändern und dem jeweiligen Erfordernis anzupassen.

Ein normales Auge sieht in der Nähe bis hinab zu 10 cm, aber es sieht auch bis in „unendliche Ferne“ scharf. Im *kurzsichtigen* Auge vereinigen sich hingegen die von fernen Gegenständen kommenden Strahlen bereits vor der Netzhaut; solche Augen sehen in Entfernungen von mehr als 30 cm nur unscharf und müssen durch

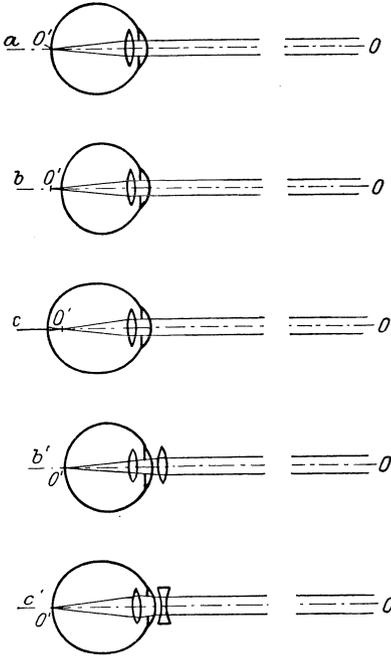


Abb. 48. Wirkung von Brillengläsern.
a normales, b weitsichtiges, c kurzsichtiges
Auge.

ein zerstreues, also konkaves Augenglas korrigiert werden (vgl. Abb. 48). Übersichtigen Augen, die die Strahlen erst in ihren Verlängerungen hinter der Netzhaut vereinigen, müssen umgekehrt konvexe Sammellinsen vorgesetzt werden. Mit zunehmendem Alter verlieren die Augen infolge Nachlassens des Akkomodationsvermögens die Möglichkeit, in der Nähe scharf zu sehen, weshalb „alterssichtige“ Augen durch konvexe Gläser verbessert werden.

Das *räumliche Sehen* und die Tiefenwahrnehmung werden durch die Verschiedenheit der von den beiden Augen gelieferten Bilder ermöglicht. In dem Stereoskop sieht jedes der beiden Augen für sich eine Photographie eines Gegenstandes so,

wie sich dieser dem betreffenden, rechten oder linken, Auge darbietet.

§ 95. Das Mikroskop. Um den *Schinkel*, unter dem ein kleiner Gegenstand erscheint, zu vergrößern, bedient man sich des *Mikroskops*. Seine einfachste Form wird durch eine *Lupe* dargestellt, nämlich eine Sammellinse, die unmittelbar vor das Auge gebracht wird; mittels einer Lupe sind jedoch keine höheren als etwa 30fache Vergrößerungen erreichbar, weil sonst zu starke Verzeichnungen auftreten.

Das zusammengesetzte Mikroskop, das um 1590 von Jansen erfunden wurde, besteht im wesentlichen aus zwei Sammellinsen,

deren eine als *Objektiv* ein stark vergrößertes Bild des Gegenstandes entwirft, während durch die andere Linse, das *Okular*, das von dem Objektiv gelieferte Bild wie durch eine Lupe betrachtet wird (Abb. 49).

Die moderne feinere Mikroskopie wurde um 1880 von Abbe begründet. Er ersetzte das Objektiv durch ein besonderes Linsensystem, einen sogenannten *Apochromaten*, der die Brennpunkte von drei Farben in einen einzigen Punkt bringt. Zur Erhöhung der Vergrößerung wird zwischen

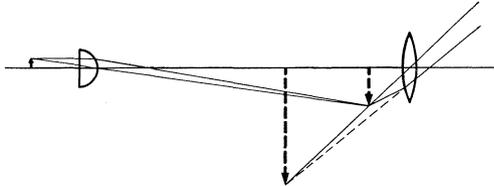


Abb. 49. Das zusammengesetzte Mikroskop.

das Deckglas des Objektes und das Objektiv eine sogenannte *Immersionsflüssigkeit* gebracht, die denselben Brechungsindex wie das Deckglas und das Objektiv aufweist.

§ 96. **Das Fernrohr.** Die Vergrößerung des Sehwinkels, unter dem sehr weit entfernte Gegenstände erscheinen, ist die Aufgabe der *Fernrohre*. Das 1611 von Kepler erfundene „*astronomische*“ Fernrohr (Abb. 50) setzt sich aus zwei Sammellinsen zusammen, von denen eine als Objektiv von großer Brennweite ein verkehrtes Bild entwirft; dieses wird dann durch die zweite, als



Abb. 50. Das astronomische Fernrohr.

Okular dienende Sammellinse wie durch eine Lupe betrachtet.

Bei dem sogenannten *terrestrischen* Fernrohr kommt noch eine dritte Linse hinzu, die den Zweck hat, das verkehrte Bild wieder aufzurichten. Das gleiche Ziel wird bei dem sogenannten *holländischen* oder *Galileischen* Fernrohr dadurch erreicht, daß zwar als Objektiv eine Sammellinse, hingegen als Okular eine *Zerstreuungslinse* verwendet wird. Das *holländische* Fernrohr hat zwar den Vorzug geringer Länge, aber den Nachteil, daß es nur mäßige Vergrößerungen zuläßt. Bei dem modernen, nur *terrestrischen* Zwecken dienenden *Prismenfernrohr*, erfolgt

schließlich die Umkehrung des Bildes durch viermalige Totalreflexion an Glasprismen (Abb. 51), und zwar zwischen Objektiv und Okular.

Gegenüber den Linsenfernrohren oder Refraktoren haben die *Spiegelteleskope* oder Reflektoren den Vorzug, daß wegen des Fortfalles des Objektivs bei ihnen eine Quelle chromatischer Aberration vermieden ist, da bei der Reflexion Dispersion nicht auftritt. Sie finden darum, trotz anderweitiger Nachteile, für astrophysikalische Forschungen Anwendung. Das größte Teleskop der Welt (1935 konstruiert) hat einen Durchmesser von rund 5 m. Die Erfindung des Teleskops geht auf Newton, seine Verbesserung vor allem auf Herschel (um 1800) zurück.

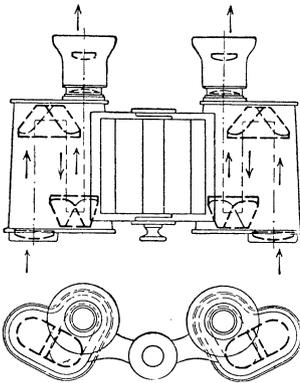


Abb. 51. Das Prismenfernrohr.

§ 97. Die Photographie. Die in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts von dem Halleschen Arzte Schulze entdeckte Lichtempfindlichkeit der Silbersalze bildet die Grundlage der *Photographie*, die um 1830 von Niepce und Daguerre begründet wurde. Bei der Photographie wird mittels des Objektivs der Kammer ein Bild auf einer

Platte oder auf einem Film entworfen, der mit einer Silbersalz enthaltenden Gelatineschicht überzogen ist. Durch die Belichtung wird die chemische Zersetzung des Silbersalzes eingeleitet; sie wird bei der folgenden „Entwicklung“ durch eine reduzierende Lösung vollendet. An den vom Lichte am stärksten getroffenen Stellen wird das Silbersalz am meisten geschwärzt, an den Stellen, an die nur wenig Licht gelangt, ist auch die Zersetzung nur gering. Das so gewonnene Negativ wird durch einen geeigneten chemischen Prozeß „fixiert“. Indem man sodann das fixierte Negativ auf lichtempfindliches Papier legt und dieses belichtet, erhält man eine positive Kopie, die ebenfalls fixiert werden muß.

Da Silbersalze für gelbe und rote Strahlen an sich nur sehr wenig empfindlich sind, werden ihnen „Sensibilisatoren“ beigemischt, die diese Strahlen stark absorbieren. Seit um 1930 die Herstellung von Ultrarotsensibilisatoren gelang, sind Landschaftsaufnahmen in Ultrarotphotographie und auch Aufnahmen im Dunkeln möglich.

Die *Kinematographie* beruht auf der Tatsache, daß ein vom Auge empfangener Lichteindruck etwa $\frac{1}{7}$ Sekunde anhält. Nimmt man daher einen Bewegungsvorgang in Momentphotographien auf, die in Intervallen von etwa $\frac{1}{20}$ Sekunde aufeinanderfolgen und führt man in ungefähr demselben Tempo die Serie von Aufnahmen einem Zuschauer vor, so empfängt er den Eindruck der Bewegung. Die moderne Filmtechnik nimmt pro Sekunde 24 Bildchen von je 19 mm Höhe auf, wobei die Belichtungsdauer eines einzelnen Bildchens $\frac{1}{48}$ sec beträgt. Wenn man das Aufnahmetempo unter Beibehaltung des Vorführungstempos variiert, gewinnt man entweder eine „Zeitlupe“ oder einen „Zeitraffer“.

§ 98. Die lichttechnischen Einheiten. Als Einheit der *Lichtstärke* gilt eine mit Amylazetat gespeiste Flamme von 40 mm Höhe, wobei natürlich genaue Abmessungen und eine bestimmte Herstellungsart für die Lampe vorgeschrieben sind; diese Einheit wird als „*Kerze*“ oder „Hefner-Kerze“ (HK) bezeichnet. Die *Beleuchtungsstärke*, die durch eine punktförmige Lichtquelle von einer Kerze in einer Entfernung von 1 m hervorgerufen wird, stellt als „*Lux*“ die Einheit der Beleuchtungsstärke dar. Als Einheit des *Lichtstroms* gilt das „*Lumen*“; es ist dies derjenige Lichtstrom, der bei einer Beleuchtungsstärke von 1 Lux auf 1 m² fällt. Die stärksten Scheinwerfer wirken in der Richtung, in der sie die Strahlen der Lichtquelle konzentrieren, wie Lichtquellen von einigen Milliarden Kerzen.

§ 99. Die Photometrie. Die Beleuchtungsstärke, die durch eine Lichtquelle hervorgebracht wird, ist, wie schon Kepler feststellte, dem *Quadrate der Entfernung* von der Lichtquelle *umgekehrt proportional*. Man kann daher eine Lichtquelle mit einer anderen, als Standard dienenden hinsichtlich der Lichtstärke vergleichen, indem man die Entfernungen vergleicht, aus denen die beiden Quellen gleiche Beleuchtungsstärke hervorrufen. Apparate, die auf Grund dieses Prinzips der Messung von Lichtstärken dienen, heißen *Photometer*.

Bei dem Photometer von Rumford entwirft jede der beiden verschiebbaren Lichtquellen auf einem Schirme den Schatten eines Stabes; ist Gleichheit der Beleuchtungsstärken erreicht, so erscheinen die beiden Schatten gleich dunkel. Bei dem Photometer von Bunsen stehen die zu vergleichenden Lichtquellen fest, und zwischen ihnen wird ein Papierblatt verschoben, das in

seiner Mitte einen kreisförmigen, durch Fett oder Stearin erzeugten Fleck trägt. Dieser erscheint hell auf dunklem Grund oder dunkel auf hellem Grund, je nachdem, ob die Beleuchtung von der Rückseite oder der Vorderseite stärker ist.

Lichtströme werden am häufigsten durch die von ihnen hervorgerufene Schwärzung einer photographischen Platte gemessen. Eine besondere Rolle spielt in der objektiven Photometrie die lichtelektrische Zelle, von der später noch die Rede sein wird.

§ 100. Die astronomische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Die erste exakte Berechnung der Lichtgeschwindigkeit erfolgte auf Grund astronomischer Beobachtungen im 17. Jahrhundert. Der dänische Astronom Römer fand, daß sich die Verfinsterungen der Monde des Planeten Jupiter scheinbar verspäten oder verfrühen, je nachdem, ob sich die Erde vom Jupiter entfernt oder ihm nähert. Indem Römer diese Unregelmäßigkeit auf die endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes zurückführte, vermochte er diese im Jahre 1676 bereits mit einiger Genauigkeit zu berechnen.

Etwa ein halbes Jahrhundert später fand Bradley eine zweite Methode zur Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit, die sich auf die von ihm entdeckte *Aberration* des Lichtes gründete. Wie Bradley erkannte, muß ein von einem Sterne in ein Fernrohr eindringender Lichtstrahl infolge der Translationsbewegung der Erde eine Ablenkung erfahren, und als eine Folge hiervon muß jeder Stern am Himmel eine scheinbare, alljährliche elliptische Bahn beschreiben. Dies zeigen in der Tat die astronomischen Beobachtungen, aus denen Bradley die Lichtgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von 2% berechnen konnte.

§ 101. Die terrestrische Messung der Lichtgeschwindigkeit. Weit genauer als die astronomischen Methoden zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit haben sich jedoch die späteren „*terrestrischen*“ Methoden erwiesen; die wichtigsten unter ihnen wurden von Fizeau und von Foucault um 1850 ersonnen. Bei der Fizeauschen Methode des „*rotierenden Zahnrads*“ blickt ein Beobachter durch ein Fernrohr nach einem weit entfernten Spiegel, der von dem Fernrohr kommende Lichtstrahlen in dieses zurückwirft. In dem Fernrohr befindet sich eine gegen die Blickrichtung unter einem Winkel von 45° geneigte Glasplatte, die auf sie auftreffende Lichtstrahlen teils durchläßt

und teils zurückwirft. Auf diese Platte fallen durch ein seitliches Rohr von einer starken Lichtquelle kommende Strahlen. Sie werden somit nach dem weit entfernten Spiegel reflektiert und von diesem nach dem Fernrohr zurückgeworfen, wobei sie teilweise die Glasplatte durchsetzen, so daß durch das Fernrohr das Spiegelbild der Lichtquelle sichtbar wird. Zwischen Fernrohr und Spiegel wird ein rasch rotierendes *Zahnrad* gebracht, dessen Zähne den Lichtstrahlen den Weg versperren.

Wird nun das Zahnrad in sehr rasche Umdrehung versetzt, so verschwindet das Spiegelbild bei einer bestimmten kritischen Umdrehungszahl (ebenso bei der drei- und fünffachen usw.). Bei dieser kritischen Tourenzahl muß offenbar die Zeit, die das Licht zur Zurücklegung des Weges vom Zahnrad bis zu dem Spiegel und zurück braucht, mit derjenigen Zeit übereinstimmen, in der sich das Zahnrad um den halben Abstand zweier benachbarter Zähne weitergedreht hat. Denn dann findet eben das Licht bei seiner Rückkehr den Weg versperrt, der ihm auf dem Hinweg offenstand. Mittels der beschriebenen Methode konnte Fizeau die Lichtgeschwindigkeit bereits sehr genau berechnen.

Die andere, von Foucault begründete Methode des „*rotierenden Spiegels*“ ist in neuerer Zeit vor allem durch Michelson vervollkommen worden, der mittels ihrer von 1921 bis 1926 in Kalifornien die bisher genaueste Messung der Lichtgeschwindigkeit durchführte. Michelson benutzte ein vollkommen symmetrisches Glasprisma, das um seine vertikal gestellte Symmetrieachse sehr rasch rotieren konnte und dessen Seitenflächen vollkommen spiegelten. In einer Entfernung von ungefähr 35 km war auf einem hohen Berge ein Spiegel angebracht, auf den ein Fernrohr gerichtet wurde. Infolge der Symmetrie des Prismas gab es acht Stellungen, die das rotierende Prisma in Intervallen von je einer Achteldrehung hintereinander einnahm und bei denen es möglich war, daß ein von einer Lichtquelle auf das Prisma fallender Strahl seinen Weg zu dem fernen Spiegel, von diesem zurück zu dem Prisma und nach Reflexion an diesem in das Auge des Beobachters nahm. Infolgedessen war nur dann die Lichtquelle dauernd sichtbar, wenn das Prisma in demselben Zeitintervall eine Achteldrehung ausführte, in dem das Licht von dem Prisma zu dem fernen Spiegel und zurück gelangte.

Michelson fand auf Grund von vielen Hunderten von Messungen für die Lichtgeschwindigkeit den Wert von 299796 km pro Sekunde, wobei der mögliche Fehler nicht mehr als 4 km pro Sekunde beträgt.

§ 102. Die Lichtgeschwindigkeit als obere Grenze mechanischer Geschwindigkeiten. Die moderne Physik hat zu der Erkenntnis geführt, daß der Lichtgeschwindigkeit eine fundamentale Bedeutung weit über das Gebiet der eigentlichen Optik zukommt. Zunächst ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit als die obere *Grenze* der bei der Bewegung *materieller* Teilchen möglichen Geschwindigkeiten; es hängt dies damit zusammen, daß für Bewegungen, deren Schnelligkeit von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit ist, mit der Geschwindigkeit auch die *Masse* in merklicher Weise *zunimmt*.

Bezeichnen wir mit m_0 die sogenannte Ruhmasse, nämlich den Wert, den die Masse bei Bewegungen hat, die langsam gegen die Lichtausbreitung sind, und mit c die Lichtgeschwindigkeit, so gilt für den Zusammenhang zwischen Masse (m) und Geschwindigkeit (v) die Beziehung

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Für $v = c$ würde also m unendlich.

Die Gültigkeit dieser von Lorentz und Einstein abgeleiteten Formel ist in der Tat durch Beobachtungen an sehr schnellen Elektronen bestätigt worden, bei denen Geschwindigkeiten bis zu 99,8% der Lichtgeschwindigkeit festgestellt wurden.

§ 103. Das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit als Proportionalitätsfaktor zwischen Energie und Masse. Die fundamentale Bedeutung, die in dem modernen System der Physik der Lichtgeschwindigkeit zukommt, äußert sich vor allem darin, daß ihr *Quadrat* den universellen Proportionalitätsfaktor zwischen *Energie* und *Masse* darstellt. Diese beiden wichtigsten physikalischen Begriffe haben sich als *äquivalent* erwiesen; sie sind ganz allgemein durch die von Einstein und Planck (1905) aufgefundene Beziehung verknüpft

$$E = mc^2.$$

Da, in Zentimetern pro Sekunde, $c = 3 \cdot 10^{10}$ ist, entspricht also

$$1 \text{ Gramm} \sim 9 \cdot 10^{20} \text{ Erg} \text{ bzw. } 1 \text{ Erg} \sim 1,1 \cdot 10^{-21} \text{ Gramm.}$$

Jeder Körper, der Energie im Betrage E aufnimmt oder abgibt, vergrößert oder verringert dadurch seine Masse im Betrage $\frac{E}{c^2}$. Zu einer Produktion von Materie im Betrage m ist ein Energieaufwand im Werte mc^2 erforderlich, und umgekehrt wird, wenn Materie von der Masse m vernichtet wird, die in ihr enthalten gewesene „Eigenenergie“ im Betrage mc^2 frei. In der Tat sind diese Beziehungen, wovon noch später die Rede sein wird, durch die modernste Atomphysik experimentell bestätigt worden.

§ 104. Die Lichtausbreitung in bewegten Medien. Der für die Lichtgeschwindigkeit angegebene Wert bezieht sich auf die Ausbreitung der Lichtstrahlen im *leeren Raum*. In einem materiellen Medium ist die Strahlengeschwindigkeit stets kleiner, und zwar gleich $\frac{c}{n}$, wenn n der Brechungsindex des Mittels ist.

Breitet sich Licht in einem selbst bewegten Medium, z. B. in *strömendem* Wasser aus, so nimmt, wie im Jahre 1851 Fizeau nachwies, das Licht an der Strömungsgeschwindigkeit v nur mit einem Bruchteil αv teil, wobei für den sogenannten *Mitführungskoeffizienten* α die Beziehung gilt

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}.$$

In Gasen, für die n sehr wenig von 1 verschieden ist, ist auch die Mitführung unmerklich.

§ 105. Der Michelsonsche Versuch. Den Gegenstand mannigfacher experimenteller Untersuchungen hat die Frage gebildet, ob und inwieweit die Ausbreitung der von einer irdischen Lichtquelle entsandten Strahlen durch die *Bewegung der Erde* beeinflusst ist. Unter diesen Untersuchungen ist am wichtigsten der berühmte Versuch von Michelson geworden; er wurde zuerst im Jahre 1881 durchgeführt und dann mehrmals, so auch von Michelson selbst 1929, mit wachsender Genauigkeit wiederholt.

Michelson sandte die von einer Lichtquelle L ausgehenden Strahlen (Abb. 52) unter einem Winkel von 45° auf einen halbdurchlässigen Spiegel S , so daß sie sich in zwei zu einander senkrechte Strahlengruppen teilten, die von zwei weiteren Spiegeln S_1 und S_2 reflektiert wurden, die beide

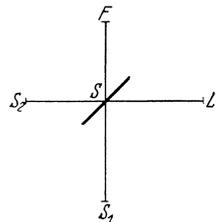


Abb. 52. Der Michelsonsche Versuch.

von S um die gleiche Länge entfernt waren. An der Stelle F wurden mittels eines Fernrohrs die eigenartigen, auf Interferenz beruhenden Streifen beobachtet, die durch Überlagerung der von den Spiegeln S_1 und S_2 kommenden Strahlen hervorgerufen wurden.

Aus theoretischen Überlegungen folgt nun, daß, woferne die Bewegung der Erde auf die irdische Lichtausbreitung einen Einfluß hat, die Streifen sich merklich verschieben müßten, wenn der Apparat in seiner Ebene um 90° gedreht wird. Von einem solchen Effekt war aber nicht das geringste zu erkennen, und damit erschien es erwiesen, daß sich trotz der Erdbewegung gleichwohl für einen irdischen Beobachter das Licht *nach allen Richtungen* mit *derselben* konstanten *Geschwindigkeit* fortpflanzt.

Diese Erkenntnis wurde von ungemein weittragender Bedeutung. Denn durch sie wurde nicht nur die Vorstellung hinfällig, daß sich das Licht in einem besonderen „Lichtäther“ ausbreite, sondern auch die von Newton begründete Auffassung einer absoluten Zeit.

Achtes Kapitel.

Wellenoptik.

§ 106. **Die Interferenz des Lichtes.** Schon seit der Mitte des 17. Jahrhunderts kannten die Physiker Erscheinungen, die es bewiesen, daß unter Umständen das Hinzukommen von Licht zu Licht stellenweise Dunkelheit zu erzeugen vermag. Wenn man z. B. eine schwach gekrümmte Linse auf eine Glasplatte legt und die Berührungsstelle in einfarbigem Licht im Mikroskop betrachtet, so sieht man um diese abwechselnd schwarze und helle Ringe, die nach ihrem Entdecker als *Newton'sche Ringe* bezeichnet werden.

Nachdem bereits Huygens um das Jahr 1670 die Auffassung begründet hatte, daß das Licht von *wellenartiger* Natur sei, hat dann im Beginne des 19. Jahrhunderts Young in Erneuerung dieser Vorstellung das Phänomen der Newton'schen Ringe richtig dahin gedeutet, daß die von der ebenen Glasplatte zurückgeworfenen Lichtstrahlen mit den von der Glaslinse reflektierten *interferieren*. Eine Schwierigkeit entstand allerdings durch die Tatsache, daß an der Stelle, wo die Linse die Glasplatte berührt, im reflektierten einfarbigen Lichte Dunkelheit herrscht. Um

auch dies zu erklären, mußte Young noch die besondere Annahme machen, daß bei der Reflexion an der Glasplatte eine halbe Wellenlänge „verloren“ geht. Diese Annahme, die an sich zunächst gekünstelt erschien, ergab sich in der Tat später als eine notwendige Folge der elektromagnetischen Lichttheorie.

Bei senkrechtem Einfall des Lichtes muß somit bei Verwendung von einfarbigem Licht überall dort Dunkelheit herrschen, wo die Summe aus der doppelten Dicke der Luftschicht und der bei der Reflexion verlorengegangenen halben Wellenlänge gleich ist einem ungeraden Vielfachen einer halben Wellenlänge. Durch Ausmessung der Radien der Ringe konnte daher auf Grund einer ganz einfachen geometrischen Beziehung Young die *Wellenlänge* des benutzten Lichtes berechnen. Er fand, daß die Wellenlänge des roten Lichtes ungefähr $8 \cdot 10^{-5}$ cm beträgt, diejenige des violetten Lichtes halb so groß ist und die Wellenlängen der Regenbogenfarben in derselben Aufeinanderfolge wie im Regenbogen zwischen diesen Grenzwerten liegen. Da ganz allgemein die Wellengeschwindigkeit dem Produkte aus der Wellenlänge und der Frequenz gleich ist, ergab sich derart für das rote Licht eine Schwingungszahl von 400 und für das violette Licht von 800 Billionen pro Sekunde.

Werden die Newtonschen Ringe anstatt mit einfarbigem Licht mit weißem Licht, also mit Sonnenlicht erzeugt, so erhält man nicht helle und dunkle, sondern farbige Ringe. Dies erklärt sich daraus, daß an jeder Stelle durch Interferenz eine bestimmte Farbe ausgelöscht wird und deren Entfernung die ursprüngliche, weiße Farbenmischung in eine *komplementäre* bunte verwandelt. Auf dieselbe Weise erklären sich auch die Farben dünner Häutchen, wie z. B. von Seifenblasen oder öligem Schmutz in Wasserpfützen.

§ 107. Der Fresnelsche Spiegelversuch. Der unmittelbare experimentelle Nachweis der Interferenz des Lichtes begegnete deshalb großen Schwierigkeiten, weil eine notwendige Voraussetzung der Interferenzfähigkeit von Lichtstrahlen deren *Kohärenz* ist; d. h. der Phasenunterschied der zusammentreffenden Strahlen muß durch eine Zeit konstant sein, die hinreichend groß ist, um einen bestimmten Lichteindruck hervorzurufen. Die Erfahrung zeigt, daß Kohärenz nie bei Lichtstrahlen besteht, die von verschiedenen Lichtquellen stammen.

Es war der glückliche Gedanke von Fresnel, die Interferenz des Lichtes dadurch nachzuweisen, daß er eine Lichtquelle vor zwei unter einem sehr geringen Winkel gegeneinander geneigte *Spiegel* brachte. Infolge der kleinen Neigung sind die beiden Spiegelbilder einander sehr nahe, und sie verhalten sich wie zwei verschiedene Lichtquellen, die jedoch kohärente Strahlen aussenden. Auf einem Schirme, den Fresnel vor den beiden Spiegeln aufstellte, konnte er in der Tat bei Verwendung von einfarbigem Licht deutlich schwarze Interferenzstreifen wahrnehmen. Sie stellen die geometrischen Orte aller derjenigen Punkte auf dem Schirme dar, für die der Unterschied der Entfernungen von den beiden Spiegeln ein bestimmtes ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt.

Besonders schön offenbart sich die Interferenz des Lichtes in der Erscheinung *stehender Lichtwellen*, die im Jahre 1889 Otto Wiener auf photographischem Wege nachzuweisen vermochte. Er stellte eine mit einem Häutchen von Chlorsilberkollodium überzogene Glasplatte unter geringer Neigung vor einen Metallspiegel, auf den er senkrecht das Licht einer elektrischen Bogenlampe fallen ließ. Das Häutchen war so dünn, daß seine Dicke nur etwa $\frac{1}{30}$ einer Wellenlänge betrug. In der Tat konnte dann Wiener das Vorhandensein von Schwingungsknoten und Schwingungsbäuchen durch die photographische Wirkung in der Chlorsilberschicht nachweisen.

§ 108. Die Beugung des Lichtes. Schon im Jahre 1660 entdeckte Grimaldi, daß Lichtstrahlen bei dem Vorübergehen an Kanten aus ihrer geraden Richtung abgelenkt werden und daß in der Umgebung einer derart das Licht „*beugenden*“ Kante abwechselnd dunkle und helle Streifen auftreten.

Die Erklärung der Beugungserscheinungen auf Grund der Vorstellung der Lichtwellen ist jedoch erst Fresnel um das Jahr 1820 gelungen. Im wesentlichen beruht die Fresnelsche Erklärung auf zwei Erkenntnissen: daß nämlich, wie schon viel früher Huygens gefunden hatte, jeder von einer Welle erreichte Punkt selbst wieder das Ausgangszentrum von neuen Wellen, von sogenannten *Elementarwellen* wird und daß diese durch Interferenz einander verstärken und schwächen. Diese Deutung erklärt es auch, warum in gebeugtem weißen Licht vielfarbige Bänder auftreten.

§ 109. **Die Beugungsgitter.** Eine Reihe paralleler schmaler Spalte, die in genau gleichen, kleinen Abständen aufeinander folgen, stellt ein *Beugungsgitter* dar. Gewöhnlich werden mittels eines Diamanten in eine Glasplatte oder einen Metallspiegel parallele Striche eingeritzt, wobei die Zwischenräume zwischen zwei benachbarten Ritzen als Spalte erscheinen. Bei den vollkommensten Gittern vermochte man etwa 2000 Striche pro Millimeter zu ziehen.

Es seien nun bei einem derartigen Gitter BC , DE usw. benachbarte Ritze (Abb. 53) und somit AB , CD und so fort benachbarte Spalte. Geht nun ein Bündel von Lichtstrahlen durch das Gitter hindurch, so folgt aus der Theorie der Interferenz, daß die von A und C kommenden Lichtstrahlen

einander dann verstärken, wenn die Strecke AA' einem ganzzahligen Vielfachen einer Wellenlänge gleich ist; dabei ist A' der Fußpunkt des Lotes, das von C auf die Richtung des durch A gehenden Strahls gefällt wird. Die Ablenkungswinkel (φ), für die das zutrifft, werden als *Beugungswinkel* bezeichnet;

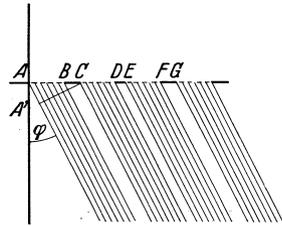


Abb. 53. Das Beugungsgitter.

je nach dem Werte der ganzen Zahl unterscheidet man Beugung und somit auch Beugungswinkel erster, zweiter, dritter *Ordnung* und so fort. Durch Messung eines Beugungswinkels bestimmter, und zwar in der Regel erster Ordnung, kann somit bei bekannter Breite der Spalte die Wellenlänge des abgebeugten Lichtes genau ermittelt werden.

Weißes Licht, das auf ein Beugungsgitter fällt, wird durch die Beugung derart *spektral zerlegt*, daß die Farben nach den Wellenlängen aufeinander folgen; dabei wird Rot wegen der größeren Wellenlänge stärker als Violett abgebeugt. Das Spektrum zweiter Ordnung ist, soweit es sich um die für das Auge sichtbaren Strahlen handelt, von dem Spektrum erster Ordnung noch völlig getrennt. Hingegen überdeckt der blau-violette Teil dritter Ordnung bereits den roten Teil zweiter Ordnung. In den höheren Ordnungen überlagern sich die Beugungsspektren immer mehr übereinander, wodurch sie Mischfarben hervorrufen, die dem Weiß immer näher kommen.

Ebenso wie im durchgehenden zeigen sich die Beugungs-

erscheinungen auch im zurückgeworfenen Licht. Das schöne Farbenspiel, das im reflektierten Lichte fein gestreifte Oberflächen darbieten und für das das bekannte „Irisieren“ der Perlmutter ein Beispiel darstellt, beruht ebenso auf Gitterwirkung wie die Beugungserscheinungen, die man wahrnimmt, wenn man durch ein feines Gewebe gegen eine Lichtquelle blickt.

§ 110. Die Doppelbrechung. Im Jahre 1669 entdeckte Bartholinus, daß Gegenstände, die durch ein Stück isländischen *Kalkspates* betrachtet werden, doppelt erscheinen. Huygens, der die Erscheinung näher untersuchte, fand, daß ein auf Kalkspat fallender Lichtstrahl sich infolge von Doppelbrechung in zwei Strahlen spaltet (Abb. 54), wobei der sogenannte *ordentliche Strahl* das gewöhnliche Brechungsgesetz befolgt, während der Brechungsexponent des anderen, des „außerordentlichen“ Strahles von der Richtung abhängt, in der der Strahl den Kristall durchsetzt. Es zeigte sich auch bald, daß dieselbe Eigentümlichkeit wie dem isländischen Kalkspat überhaupt allen Kristallen zukommt, soferne

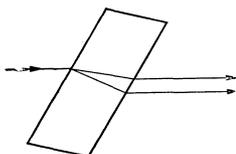


Abb. 54. Die Doppelbrechung.

sie nicht im besonderen dem regulären Kristallsystem angehören.

§ 111. Die Polarisation des Lichtes. Im Jahre 1816 machten Fresnel und Arago die sehr überraschende Entdeckung, daß die beiden Strahlen, in die sich ein Lichtstrahl bei der Doppelbrechung spaltet, trotz der zweifellos vorhandenen Kohärenz unter keinen Umständen zur Interferenz gebracht werden können. Es erweist sich vielmehr die Gesamtintensität des Lichtes stets genau gleich der Summe der Intensitäten der beiden Einzelstrahlen. Aus diesem Versuchsergebnis von Fresnel und Arago zog im Jahre 1817 Young den Schluß, daß die Lichtwellen nicht, wie man bis dahin angenommen hatte, longitudinaler, sondern *transversaler* Natur sein müßten; denn nur dann erscheint es möglich, daß die Schwingungen der beiden miteinander nie interferierenden Strahlen zueinander senkrecht erfolgen.

Durch die Erkenntnis der Transversalität der Lichtwellen fand auch die schon früher bekannt gewesene Tatsache eine einfache Erklärung, daß ein Lichtstrahl nach verschiedenen Richtungen quer zu seiner Fortpflanzungsrichtung verschiedene Eigen-

schaften besitzen kann. Solche seitliche Verschiedenheiten hat bereits Huygens an doppelt gebrochenen Lichtstrahlen, und im Jahre 1808 Malus auch an Strahlen reflektierten und einfach gebrochenen Lichtes festgestellt. Malus erkannte auch, daß solche seitliche Verschiedenheiten nur an Strahlen erkennbar sind, die irgendwelchem optischen Prozeß unterworfen waren, daß sie hingegen bei Lichtstrahlen fehlen, die direkt von einer Lichtquelle kommen.

Diese wichtige Erfahrungstatsache führte Malus zu der Unterscheidung von *natürlichem*, nämlich unmittelbar von der Quelle kommendem, und *polarisiertem* Lichte, nämlich solchem, das auf dem Wege von der Quelle seitliche Verschiedenheiten angenommen hat. Daß sich natürliches Licht „polarisieren“ läßt, erklärt man nach einer von Fresnel begründeten Hypothese damit, daß auch das natürliche Licht in jedem Augenblick polarisiert ist, der Schwingungszustand aber innerhalb eines für die Beobachtung kleinen Zeitraums so häufig wechselt, daß im Mittel keine Richtung vor einer anderen irgendwie ausgezeichnet ist.

Natürliches Licht kann man, wie aus der Theorie folgt, in polarisiertes dadurch verwandeln, daß man es von einem Mittel vom Brechungsindex n bei einem Einfallswinkel reflektieren läßt, dessen Tangente gleich n ist (Gesetz von Brewster). Für Glas beträgt z. B. dieser sogenannte *Polarisationswinkel* 56° . In dem reflektierten polarisierten Lichtstrahl erfolgen die Schwingungen *senkrecht* zu der Einfallsebene, die auch die Polarisationssebene genannt wird. Fällt Licht unter einem anderen Winkel als dem Polarisationswinkel ein, so wird doch stets die Schwingungsebene des Lichtes von der Einfallsebene weggedreht.

Umgekehrt erscheint die Schwingungsebene des gebrochenen Lichtstrahls stets zu der Einfallsebene hin gedreht. Durch einen einmaligen Brechungsvorgang kann man zwar nie (wie durch einmalige Reflexion) Licht polarisieren, wohl aber kann man, indem man einen natürlichen Lichtstrahl durch einen Satz von Glasplatten hindurchgehen läßt, durch die fortgesetzte Drehung der Schwingungsebene es erreichen, daß sich nach dem Verlassen der Lichtstrahl praktisch wie ein vollständig polarisierter verhält.

§ 112. Die Polarisationsapparate. Die einfachsten Apparate, die der Herstellung und Untersuchung polarisierten Lichtes dienen,

beruhen auf der Tatsache, daß bei der Doppelbrechung der ordentliche und außerordentliche Strahl polarisiert sind und bestimmte, doppeltbrechende Vorrichtungen nur den außerordentlichen Strahl durchlassen. So absorbiert eine *Turmalinplatte* den ordentlichen Strahl so stark, daß sie praktisch nur für den außerordentlichen durchlässig ist. In der *Turmalinzange* sind zwei Turmalinplatten miteinander kombiniert, von denen die eine als *Polarisator*, die andere als *Analysator* des Lichtes wirkt. Sind die beiden Platten parallel gestellt, so geht der von der ersten gelieferte Strahl auch durch die zweite Platte hindurch; bei gekreuzter Stellung ist hingegen die zweite Platte für das Licht undurchsichtig. Das Gesichtsfeld ist also bei gekreuzter Stellung dunkel. Mittels einer *Turmalinzange* läßt sich leicht das Verhalten beliebiger Substanzen im polarisierten Licht untersuchen.

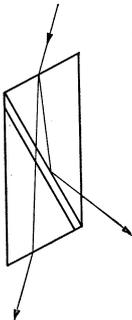


Abb. 55.
Nicol'sches
Prisma.

Denselben Zweck wie eine *Turmalinplatte* erfüllt auch ein *Nicol'sches Prisma*. Es wird aus einem *Kalkspatkristall* hergestellt, der in der Mitte zerschnitten und mittels eines durchsichtigen Balsams so zusammengekittet wird, daß an der Schnittfläche zwar der ordentliche, nicht aber der außerordentliche Strahl total reflektiert wird (Abb. 55). Das Prisma läßt also nur den außerordentlichen Strahl durch.

§ 113. Die Drehung der Schwingungsebene des Lichtes. Wie *Biot* 1817 entdeckte, besitzen *Quarz* und viele *Lösungen* die Fähigkeit, die Schwingungsebene polarisierten Lichtes zu *drehen*. Bringt man in einen gekreuzten Polarisationsapparat eine *Quarzplatte* oder in einer geeigneten Röhre eine derartige „optisch aktive“ Lösung, so hellt sich das Gesichtsfeld auf, und der *Analysator* muß um einen bestimmten Winkel gedreht werden, damit wieder Dunkelheit herrscht. Unter dem *spezifischen Drehungsvermögen* einer Lösung versteht man den Winkel, um den eine 10 cm lange Röhre, bei Füllung mit einem Gramm der aktiven Substanz pro Kubikzentimeter, dreht. Für *Rohrzucker* beträgt z. B. die spezifische Drehung 66, so daß also bei einer Röhrenlänge von 20 cm, wie sie üblich ist, die Drehung, pro Gramm Zucker in 100 ccm Lösung, $1\frac{1}{3}^{\circ}$ beträgt. Aus dem gemessenen Drehwinkel kann derart mittels besonderer, als *Saccharimeter* bezeichneter Apparate der Zuckergehalt einer Lösung bestimmt werden.

§ 114. Die chromatische Polarisation. Die Erscheinungen, die doppelt brechende Substanzen in polarisiertem Licht zeigen, werden als *chromatische Polarisation* bezeichnet. Bringt man zwischen zwei gekreuzte Turmaline oder Nicols einen dünnen doppeltbrechenden Kristall, wie ein Glimmerblättchen oder ein Stück Gips, so hellt sich bei Anwendung von einfarbigem Licht das bis dahin dunkle Gesichtsfeld auf. Wird weißes Licht benutzt, so erscheint das Blättchen *bunt*, mit alleiniger Ausnahme von zwei ausgezeichneten Lagen, in denen keine Färbung auftritt. Die sonst wahrnehmbaren Farben stellen die Mischungen aller derjenigen Farben dar, die durch den Analysator des Apparates nicht ausgelöscht werden. In *konvergentem* polarisiertem Licht zeigen die Kristalle sehr schöne, regelmäßige und farbenreiche Bilder (vgl. Abb. 56).

§ 115. Das Auflösungsvermögen des Mikroskops. Die Wellennatur des Lichtes ist von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der *Mikroskope*. Dieser ist, wie durch theoretische Überlegungen Abbe im Jahre 1873 fand, dadurch eine Grenze gezogen, daß die in dem Mikroskop entstehenden Bilder sehr kleiner Objekte im wesentlichen Beugungsscheiben sind. Daher bestimmt die *Wellenlänge* des benutzten Lichtes die kleinste im Mikroskop noch erkennbare Strecke und damit das *Auflösungsvermögen* des Mikroskops.

Bei senkrechtem Einfall der Strahlen ist, wie Abbe fand, die kleinste wahrnehmbare Strukturbreite der halben Wellenlänge gleich, also bei blauem Licht etwa gleich $2,5 \cdot 10^{-5}$ cm. Durch schiefen Einfall kann die kleinste erkennbare Strukturbreite um etwa ein Drittel verringert werden. Eine noch weitere Herabsetzung ist durch Verwendung der schon früher (§ 95) erwähnten Immersionsflüssigkeit möglich, weil die Wellenlänge einer bestimmten Farbe in einem beliebigen Mittel gleich ist derjenigen in Luft, gebrochen durch den Brechungsindex des Mittels.

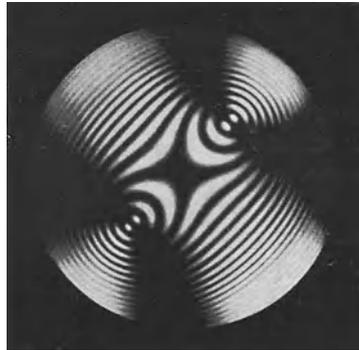


Abb. 56. Kristallbilder in konvergentem, polarisiertem Licht.

Auch durch Anwendung von ultraviolettem Licht bei der photographischen Aufnahme kann das Auflösungsvermögen eines Mikroskops erhöht werden.

Der Leistungsfähigkeit des Mikroskops ist also dadurch eine Grenze gesetzt, daß die einzelnen Objektpunkte nicht wieder durch Punkte, sondern durch winzige Beugungsscheiben abgebildet werden. Diese greifen, wenn zwei Objektpunkte innerhalb der kleinsten Strukturbreite liegen, ineinander über und verhindern dadurch eine *getrennte* Wahrnehmbarkeit der beiden Objektpunkte.

Teilchen, deren Längsdimensionen kleiner sind als die kleinste erkennbare Strukturbreite, können mittels des von Siedentopf und Zsigmondy im Jahre 1903 erfundenen *Ultramikroskops* nachgewiesen werden, wofern benachbarte Teilchen voneinander um mehr als die kleinste erkennbare Strukturbreite abstehen. Dies ist bei den sogenannten *kolloidalen Lösungen* der Fall, bei denen in einer Flüssigkeit winzige Teilchen eines bestimmten Stoffes schweben.

Bei dem Ultramikroskop gelangt ein feines Bündel von Lichtstrahlen von der Seite her auf den zu untersuchenden Gegenstand, wobei jedes Eindringen der Strahlen in das Gesichtsfeld des Mikroskops sorgfältigst vermieden ist. Auf diese Weise können Teilchen mit einem Durchmesser von nur etwa $3 \cdot 10^{-7}$ cm mittels der von ihnen hervorgerufenen Beugungsscheibchen sichtbar werden; diese erscheinen hell auf dunklem Grunde.

§ 116. Die Lichtquanten. Die Vorstellung, daß das Licht aus kleinsten Teilchen, sogenannten *Lichtkorpuskeln*, bestehe, reicht bis auf Newton zurück. In der Tat standen durch etwa $1\frac{1}{2}$ Jahrhunderte diese Vorstellung und die von Huygens gleichzeitig begründete Wellentheorie des Lichtes in scharfem Gegensatz einander gegenüber. Die korpuskulare Auffassung fand eine starke Stütze in der geradlinigen Ausbreitung der Lichtstrahlen; denn diese erschien vom korpuskular-theoretischen Standpunkte als eine natürliche Folge des mechanischen Beharrungsgesetzes. Hingegen schien später der Fresnelsche Spiegelversuch endgültig die korpuskulare Auffassung zu widerlegen, weil von deren Standpunkt aus es zunächst unverständlich erschien, wie die Hinzufügung von Licht zu Licht Dunkelheit ergeben kann. Auch die Beugungserscheinungen schienen gegen die korpuskulare Auffassung zu sprechen.

Seit der Mitte des 19. Jahrhunderts galt darum die Korpuskulartheorie als endgültig überwunden. Im Beginn des 20. Jahrhunderts lernten jedoch die Physiker Gesetzmäßigkeiten kennen, die zu einer Erneuerung der korpuskularen Auffassung zwangen. Diese Gesetzmäßigkeiten offenbarten (wie später gezeigt werden wird) deutlich die Existenz *individueller* Lichtteilchen, und zwar derart, daß die *Energie* eines Teilchens universell der *Frequenz* der betreffenden Farbe proportional ist. Die Energie (ε) kann gleichgesetzt werden

$$\varepsilon = h \nu,$$

wobei h die bereits in einem früheren Abschnitt (§ 79) erwähnte, von Planck in die Physik eingeführte Konstante bedeutet, die als das *elementare Wirkungsquantum* bezeichnet wird, und $6,55 \cdot 10^{-27}$ erg \times sec beträgt.

Im Sinne der modernen Physik werden darum die Lichtkorpuskeln als *Lichtquanten* oder auch als *Photonen* bezeichnet. Die Energie eines roten Lichtquants ($\nu = 4 \cdot 10^{14}$) beträgt nach dem eben Gesagten $2,6 \cdot 10^{-12}$ Erg, die eines violetten Photons ist doppelt so groß. Beobachtungen über Zusammenstöße zwischen Photonen und den kleinsten Materieteilchen (Elektronen) haben, wovon später (§ 206) noch die Rede sein wird, gezeigt, daß den Lichtquanten auch *Bewegungsgröße* (Impuls) zukommt. Sie ergibt sich zu

$$p = \frac{h \nu}{c}$$

in Übereinstimmung mit den Tatsachen, daß einer Energie $h \nu$ eine Masse $\frac{h \nu}{c^2}$ entsprechen muß und die Bewegungsgröße das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit (in diesem Falle c) darstellt. Da $c = \lambda \nu$ ist, kann man also auch sagen, daß jedem Photon von dem Impuls p eine Wellenlänge von der Größe

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

zukommt.

Auf Grund der Ergebnisse der modernen Physik muß somit dem Licht sowohl eine korpuskulare als auch eine undulatorische Natur zugeschrieben werden. Dieser „*Dualismus*“ erscheint dadurch begründet, daß sich das Licht zwar aus Korpuskeln zusammensetzt, daß deren Fortbewegung aber in *statistischer* Hinsicht durch diejenigen Gesetzmäßigkeiten geregelt ist, die in den

Beziehungen der Wellenoptik zum Ausdruck kommen. Darum braucht das Auftreten von Interferenzstreifen keineswegs, wie man früher glaubte, dahin gedeutet zu werden, daß stellenweise Korpuskeln einander wechselseitig vernichten, sondern nur dahin, daß stellenweise die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer Korpuskel außerordentlich herabgesetzt ist.

Neuntes Kapitel.

Die Spektroskopie.

§ 117. Die Emissionsspektren. Im Jahre 1814 entdeckte Fraunhofer, daß das *Sonnenspektrum* von zahlreichen *schwarzen Linien* durchzogen wird, denen innerhalb des Spektrums ganz be-

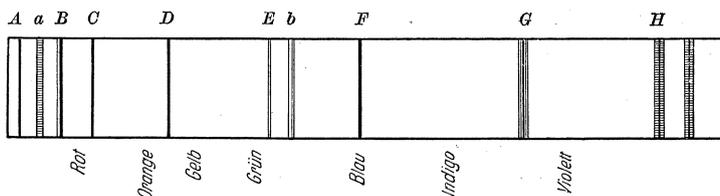


Abb. 57. Die Fraunhoferschen Linien.

stimmte, feste Lagen, also ganz bestimmte Wellenlängen entsprechen. Die stärksten dieser sogenannten Fraunhoferschen Linien werden in der Reihenfolge von Rot zu Violett mit den großen lateinischen Buchstaben von *A* bis *H* bezeichnet (Abb. 57). Fraunhofer fand auch bereits, daß in dem Spektrum einer Kerzenflamme eine helle gelbe Linie auftritt, die an genau derselben Stelle liegt wie die dunkle *D*-Linie innerhalb des Sonnenspektrums.

Auf diese Beobachtung Fraunhofers gründet sich die un-
gemein bedeutungsvolle Entdeckung der *Linienpektren* durch Kirchhoff und Bunsen im Jahre 1860. Wie diese beiden Forscher fanden, treten in den Spektren leuchtender Dämpfe von Metallverbindungen helle Linien auf, deren Lage sich nicht nur als unabhängig von der Temperatur, sondern vor allem auch als völlig unabhängig von der Art der chemischen *Verbindung* des Metalls erweist. In den Spektren aller Natriumverbindungen tritt z. B. die vorhin erwähnte gelbe Linie auf, mit genau der gleichen Wellenlänge, wobei es ganz gleichgültig ist, ob das Natrium

chemisch etwa mit Chlor oder Brom oder Schwefel verbunden ist. Die hellen sogenannten *Emissionslinien* (vgl. Abb. 58) müssen daher als für die chemischen *Elemente* charakteristisch angesehen werden.

Jedem Grundstoff ist ein bestimmtes Linienspektrum eigentümlich. Die stärkste Spektrallinie liegt innerhalb des sichtbaren Gebietes z. B. bei Natrium im Gelben, bei Kalium im Violett, bei Lithium im Rot. Für viele Grundstoffe erreicht die Zahl der bekannten charakteristischen Spektrallinien mehrere Hundert.

Neben den Linienspektren treten auch *Bandenspektren* auf, die nicht den Atomen, sondern den Molekeln zugeschrieben werden müssen (vgl. Abb. 59).

§ 118. Die Absorptionsspektren.

Wie Kirchhoff und Bunsen zeigen konnten, treten die Linienspektren nicht nur bei der Aussendung von Licht, sondern auch bei der *Absorption* von Licht auf, und zwar mit dunkeln statt mit hellen Linien. Wird das Licht einer starken elektrischen Bogenlampe durch eine Flamme hindurchgesandt, so absorbiert diese aus dem Lichte Strahlen von den Wellenlängen, die für das Emissionsspektrum der Flamme charakteristisch sind. Da die schwache Eigenemission der Flamme bei den betreffenden Wellenlängen den Verlust an Strahlung seitens der starken Lampe nicht wettzumachen

vermag, so weist das Spektrum der Bogenlampe nach dem Durchsetzen der Flamme dunkle Absorptionslinien auf.

In diesem Sinne sind auch die Fraunhoferschen Linien als Absorptionsspektrum zu deuten; sie geben Kunde von dem Vor-

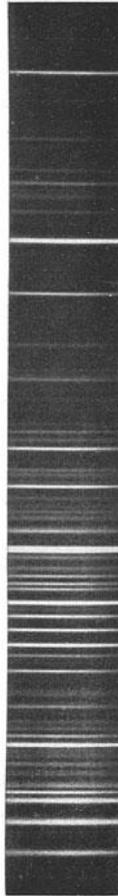


Abb. 58. Linienspektrum des Kaliums.

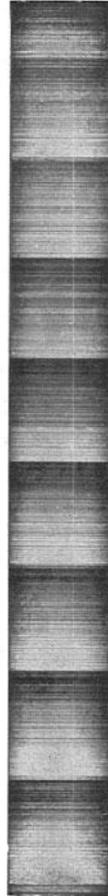


Abb. 59. Bandenspektrum des Jod-Dampfes.

handensein bestimmter chemischer Elemente in der *Atmosphäre* der Sonne, indem diese Grundstoffe von der aus dem *Innern* der Sonne dringenden, kontinuierlichen Strahlung Licht von bestimmten Wellenlängen verschlucken. Diese Wellenlängen fehlen infolgedessen in einem auf der Erde aufgenommenen Sonnenspektrum.

§ 119. Die Spektroskope. Für die praktischen Zwecke der chemischen *Spektralanalyse* werden mannigfache Apparate benutzt, bei denen die Zerlegung des zu untersuchenden Lichtes durch ein Prisma bewirkt wird. Solche Apparate, die als *Prismenspektroskope* bezeichnet werden und deren ältester von Bunsen stammt, enthalten im wesentlichen einen leuchtenden Spalt, ein Prisma, und zwar zwecks Erzielung größerer Schärfe in Minimalstellung, ferner ein der Beobachtung dienendes Fernrohr und eine Skala, deren Spiegelbild im Fernrohr sichtbar wird.

Für feinere Untersuchungen und vor allem für die wichtigen *Wellenlängenmessungen* der Spektrallinien sind indessen solche Apparate wenig geeignet. Die Entwicklung einer exakten Spektroskopie begann daher erst, als um 1880 durch Rowland ungemein feine Beugungsgitter hergestellt wurden, die seitdem als *Gitterspektroskope* Anwendung finden. Rowland ritzte mittels automatisch und mit größter Präzision laufender Teilmaschinen Hohlspiegel aus Metall, indem er sich dabei einer Spitze aus Diamant bediente. Die größten Rowlandschen Gitter enthalten 800 Striche pro Millimeter und weisen bei einer Gesamtlänge von etwa 14 cm über 100 000 Striche auf.

Wellenlängenmessungen erscheinen mittels der Rowlandschen Gitter mit einer Genauigkeit durchführbar, bei der der mögliche Fehler nicht einmal den zehnmillionten Teil des gemessenen Wertes erreichen kann. Als Wellenlängeneinheit dient in der Spektroskopie die sogenannte *Ångström-Einheit* (abgekürzt Å), die gleich $1 \cdot 10^{-8}$ cm ist. Der sichtbare Bereich des Spektrums erstreckt sich also von ungefähr 4000 bis 8000 Å.

§ 120. Das Ultrarot. Die Existenz *ultraroter* Strahlen wurde 1800 von Herschel entdeckt; er wies sie durch die Wärmewirkung nach, die sie auf ein Thermometer ausüben. Das ultrarote Spektrum kann auch photographisch untersucht werden, indem man der photographischen Platte bestimmte Stoffe beimengt, die längerwellige Strahlen absorbieren. Andererseits benutzt man zur

Untersuchung des Ultrarot Apparate, die mit äußerster Empfindlichkeit auf die mit den ultraroten Strahlen verbundene Wärmewirkung reagieren. Am wichtigsten sind unter ihnen die *Thermosäule*, die auf den später noch zu besprechenden Erscheinungen der Thermoelektrizität beruht, und das *Bolometer*, nämlich ein dünner Metalldraht, der durch Erwärmung seinen elektrischen Widerstand in genau meßbarer Weise verändert.

Wellenlängen im fernerem Ultrarot werden gewöhnlich in „Mikron“ (μ) angegeben; 1μ ist als tausendster Teil eines Millimeters gleich 10^{-4} cm oder 10^4 Å. Früher wurde in der Spektroskopie als Einheit vielfach auch der tausendste Teil des Mikron, das „Millimikron“ ($m\mu$) gebraucht; es ist gleich 10^{-7} cm oder 10 Å.

Sollen Wellenstrahlen von mehr als etwa 10000 Å, also mehr als 1μ , untersucht werden, so müssen sie, weil sie *neben* den sichtbaren, kürzerwelligen Strahlen nicht zur Geltung kommen können, *isoliert* werden. Dies gelang um 1900 Rubens auf Grund der Tatsache, daß zahlreiche Substanzen Strahlen von bestimmter Wellenlänge ganz besonders stark („selektiv“) reflektieren und absorbieren. Läßt man daher Licht zwischen zwei Spiegeln aus einer solchen Substanz öfter hin- und hergehen, so kann man auf diese Weise ziemlich monochromatische Strahlen von der betreffenden Wellenlänge als „*Reststrahlen*“ isolieren. Derart erhielt Rubens bei dem Sylvin (KCl) Strahlen von 61μ . Noch längerwellige Strahlen konnte Rubens auf Grund der Tatsache isolieren, daß der Brechungsindex von Quarz verschiedene Werte hat, je nachdem, ob es sich um Wellenlängen oberhalb oder unterhalb von 80μ handelt. Durch eine Anordnung von Quarzlinsen vermochten Rubens und v. Baeyer aus der Strahlung einer Quecksilberlampe u. a. eine Strahlengruppe von 343μ , also etwa $\frac{1}{3}$ mm auszusondern. Bis zu dieser Wellenlänge umfaßt, von der Grenze des sichtbaren Spektrums an gerechnet, das Ultrarot mehr als *acht Oktaven*; verschiedenen Forschern ist es anderseits bereits gelungen, auf dem Wege elektrischer Entladungen Wellen zu erzeugen, die eine *geringere* Wellenlänge aufweisen als die erwähnte extrem langwellige Gruppe der Quecksilberstrahlung (vgl. § 185).

§ 121. Das Ultraviolett. Jenseits der bei etwa 4000 Å liegenden kurzwelligen Grenze des sichtbaren Spektralbereiches beginnt das um 1800 durch Ritter entdeckte Gebiet des *Ultraviolett*. Die Untersuchung mittels der photographischen Platte führte zunächst

nur bis zu einer Wellenlänge von ungefähr 2000 Å, also nur bis zu einer Oktave jenseits des sichtbaren Violett. Als Ursache, die ein weiteres Vordringen zunächst verhinderte, erkannte um 1890 Schumann die starke Absorption noch kürzerwelliger Strahlen durch die Luft und die Bindemittel der photographischen Platte. Mittels eines besonders konstruierten Vakuumspektrographen und unter Verwendung spezieller Platten gelangte Schumann bis zu etwa 1200 Å. Um noch eine Oktave weiter kam Lyman; mittels eines neuartigen Hochvakuumspektrographen konnte um 1920 Millikan gar eine Wellenlänge von nur etwa 100 Å erreichen, und später drang die Ultraviolettforchung gar bis zu 20 Å vor.

Durch besonderen Reichtum an ultravioletten Strahlen ist die Quecksilberlampe ausgezeichnet, weshalb sie auch allgemeine Verwendung für Heilzwecke findet. Gewöhnliches Glas absorbiert Strahlen, deren Wellenlänge unterhalb von etwa 3000 Å liegt. Bis zu kleineren Wellenlängen (2500 bis 2000 Å) sind besondere Glassorten und Quarz durchlässig, bis zu 1000 Å Flußspat.

§ 122. Spektralserien und Spektraltermen. Wie die genauere Erforschung der Spektren zeigte, lassen sich die für einen Grundstoff eigentümlichen Linien stets in eine Anzahl sogenannter *Serien* einordnen, bei denen die Linien in der Richtung *abnehmender* Wellenlänge *konvergieren*. In dieser Richtung wird der Abstand zweier benachbarter, zu derselben Serie gehöriger Linien immer kleiner, während die Linien selbst in dieser Richtung immer schwächer und unschärfer werden. Das Ende der Serien liegt meist schon im Ultraviolett.

Da die Spektren der Elemente im allgemeinen verschiedene Serien aufweisen, ist die Zahl der beobachteten Linien bei den meisten Grundstoffen sehr groß; doch läßt sich die große Mannigfaltigkeit der Spektrallinien auf eine wesentlich einfachere Mannigfaltigkeit von sogenannten *Spektraltermen* derart zurückführen, daß sich die reziproken Wellenlängen, also die durch die Lichtgeschwindigkeit dividierten *Frequenzen* der einzelnen Linien, als *Differenzen* je zweier Terme ergeben.

Das Prinzip der Termdarstellbarkeit der Spektren geht im wesentlichen auf Ritz (1910) zurück; als eine Folge ergibt sich das ebenfalls von Ritz aufgestellte sogenannte *Kombinationsprinzip*, nach dem die Summe oder Differenz der Frequenzen

zweier Linien eines Grundstoffes die Frequenz einer dritten Linie desselben Grundstoffes ergeben kann.

§ 123. **Das Wasserstoffspektrum.** Durch eine ganz besonders einfache Beziehung sind die Terme des Wasserstoffspektrums miteinander verknüpft; sie sind nämlich, wie zum Teil bereits Balmer 1885 entdeckte, in der Form darstellbar $\frac{R}{n^2}$, wobei n die Reihe der ganzen Zahlen durchläuft ($n = 1, 2, 3, \dots$), R aber als sogenannte *Rydbergsche Konstante* eine universelle Konstante darstellt; sie ist ungefähr gleich¹ 110000 und entspricht einer Wellenlänge, die um etwa zwei Oktaven jenseits der kurzwelligen Grenze des sichtbaren Bereiches im Ultraviolett liegt.

Durch die Formel

$$\frac{\nu}{c} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{s^2} \right)$$

wird im besonderen die sogenannte *optische Wasserstoffserie* beschrieben. Setzt man in dieser Formel $s = 3$, so ergibt sich die für Wasserstoff charakteristische rote Linie, für $s = 4$ die charakteristische blaue Linie; für $s = 5$ und $s = 6$ erhält man violette Linien, während die weiteren Linien ($s = 7$ usw.) bereits dem Ultraviolett angehören.

Die Kombination $R - \frac{R}{s^2}$ ($s = 2, 3$ usw.) ergibt die im Ultraviolett liegende *Lyman-Serie*, die Kombination $\frac{R}{9} - \frac{R}{s^2}$ ($s = 4, 5$ usw.) hingegen die ultrarote *Paschen-Serie*. Im ferneren Ultrarot konnten auch die Serien festgestellt werden, für die der erste Term der Differenz gleich $\frac{R}{16}$ bzw. $\frac{R}{25}$ ist.

§ 124. **Die Spektren der Alkalimetalle.** Nächst dem Wasserstoffspektrum sind die Spektren der Alkalimetalle (wie Kalium, Natrium) durch besondere Einfachheit ausgezeichnet; ihre Gesetzmäßigkeiten wurden in den Neunzigerjahren des 19. Jahrhunderts vor allem von Kayser, Runge und Rydberg entdeckt.² Als die weitaus wichtigsten und übersichtlichsten Serien wurden in den Spektren der meisten Metalle drei festgestellt, die so-

¹ Der genaue Wert ist $109677,759 \pm 0,008 \text{ cm}^{-1}$; der mögliche Fehler ist also 100 Millionen mal kleiner als der Wert.

² In den Formeln, die diese Gesetzmäßigkeiten beschreiben, spielt die schon erwähnte Rydbergsche Konstante eine wesentliche Rolle.

genannte *Hauptserie* und zwei „*Nebenserien*“, die eine gemeinsame Seriegrenze haben, sich aber hinsichtlich der Schärfe ihrer Linien unterscheiden; darum wird die eine Nebenserie als *scharfe* und die andere als *diffuse* bezeichnet.

Die nähere Forschung hat dann auf Grund des Ritzschen Prinzips gezeigt, daß man in den Spektren verschiedene Typen von Termen unterscheiden muß, unter denen am wichtigsten die sogenannten *s*-, *p*- und *d*-Terme sind.¹ Die Hauptserie entsteht dadurch, daß der zahlenmäßig größte unter den *s*-Termen mit den verschiedenen *p*-Termen in Kombination tritt. Andererseits ist der zahlenmäßig größte *p*-Term in der scharfen Nebenserie mit den *s*- und in der diffusen Nebenserie mit den *d*-Termen kombiniert. In der Hauptserie des Natriums hat man z. B. nicht weniger als 57 Linien feststellen können, in denen der größte *s*-Term mit 57 verschiedenen *p*-Termen kombiniert erscheint. Neben den erwähnten wichtigsten und intensivsten Serien gibt es natürlich noch zahlreiche weitere.

§ 125. Die Kristalle als Beugungsgitter. Die Natur der merkwürdigen Strahlen, die 1895 Röntgen entdeckte und von deren Erzeugung später noch die Rede sein wird, ist lange Zeit ungeklärt gewesen. Im Jahre 1912 vermochte jedoch Laue den überzeugenden experimentellen Beweis dafür zu erbringen, daß die Röntgenstrahlen nichts anderes als besonders kurzwellige ultraviolette Lichtstrahlen sind.

Schon seit der Mitte des 19. Jahrhunderts erblickten nämlich die Mineralogen die Ursache der regelmäßigen Formen der *Kristalle* in regelmäßigen Anordnungen der Atome innerhalb der Kristalle. Laue schloß daraus, daß ein Kristall auf Lichtstrahlen, deren Wellenlänge etwa zehntausendmal kleiner als die des sichtbaren Lichtes wäre, wie ein Beugungsgitter wirken müßte. Die Wirkungsweise muß allerdings deshalb viel komplizierter als bei optischen Gittern sein, weil die den Spalten entsprechenden Stellen im Kristall nicht linear, sondern *räumlich* angeordnet sind.

Als Laue und seine Mitarbeiter ein Bündel von Röntgenstrahlen auf einen Kristall richteten und hinter diesem eine photographische Platte aufstellten, erhielten sie in der Tat eine Figur,

¹ Die Bezeichnung erklärt sich aus den Anfangsbuchstaben der Worte *scharf*, *prinzipal* und *diffus*; die Hauptserie wird nämlich auch *Prinzipalserie* genannt.

die in symmetrisch-regelmäßiger Anordnung schwarze, auf *Interferenz* beruhende Flecke aufwies (Abb. 60). Umgekehrt konnte aus dem Photogramm die Struktur des benutzten Kristalls abgeleitet werden. So setzt sich z. B. in regelmäßig würfelförmiger Anordnung der Steinsalzkristall aus seinen Chlor- und Natrium-Atomen zusammen. (In Abb. 61 sind die beiden Atomarten durch helle und dunkle Kreise unterschieden.)

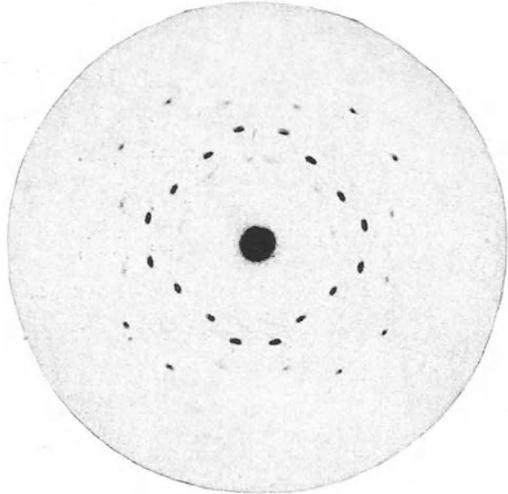


Abb. 60. Interferenzen von Röntgenstrahlen in einem Kristall.

Sobald die Struktur des Steinsalzkristalls bekannt war, ließ sich aber nun ohne weiteres der Abstand zweier unmittelbar benachbarter Atome (eines Na- und eines Cl-Atoms) berechnen. Nennen wir diesen Abstand a , so erscheint ein Würfel von der Kantenlänge a mit insgesamt acht Atomen besetzt, die sich in seinen Ecken befinden. Da aber jeder Eckpunkt acht Würfeln angehört, die in diesem Endpunkt zusammenstoßen, so ist die Zahl der in einem Kubikzentimeter enthaltenen Atome

$$N = \frac{1}{a^3}.$$

Andererseits ist, wenn wir das sogenannte Molekulargewicht des Steinsalzes mit μ , seine Dichte mit ρ und die Loschmidtsche Zahl mit L bezeichnen,

$$\rho = \frac{\mu}{L} \frac{N}{2}.$$

Durch Zwei muß deshalb noch dividiert werden, weil ja erst *zwei* Atome zusammengenommen (je ein Na- und je ein Cl-Atom) die

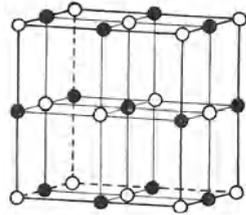


Abb. 61. Struktur des Steinsalzkristalls.

jenige Masse haben, die dem durch die Loschmidtsche Zahl dividierten Molekulargewicht gleich ist. Die Kombination der letzten zwei Gleichungen ergibt für die Gitterkonstante

$$a = \sqrt[3]{\frac{\mu}{2L\rho}}.$$

Nun ist das sogenannte Molekulargewicht des NaCl als Summe der Atomgewichte von Na (23,00) und Cl (35,46)

$$\mu = 58,46.$$

Für die Dichte des Steinsalzes haben sehr genaue Messungen den Wert ergeben

$$\rho = 2,164,$$

so daß sich für die Gitterkonstante des Steinsalzes der Wert ergibt

$$a = 2,814 \cdot 10^{-8} \text{ cm.}$$

Aus der Theorie der Raumgitter folgt nun, daß von einem Kristall mit der Gitterkonstante a Strahlen nur unter ganz *bestimmten Gleitwinkeln reflektiert* werden, wobei man unter dem Gleitwinkel denjenigen Winkel versteht, den der einfallende und auch der reflektierte Strahl mit der Ebene des Kristalls einschließen. Für die ausgezeichneten Gleitwinkel gilt die Beziehung

$$2a \sin \Theta = n \lambda,$$

wobei n wie bei den Strichgittern die Ordnungszahl darstellt.

§ 126. Die Messung der Röntgen-Wellenlängen. Zur Bestimmung der Wellenlängen der Röntgenstrahlen eignet sich am besten die 1913 von W. H. und W. L. Bragg ersonnene Methode des *Drehkristalls*. Wird ein von einem Spalt kommendes ausgeblendetes Strahlenbündel gegen eine Begrenzungsfläche eines Kristalls gerichtet, während dieser selbst um eine in dieser Fläche liegende Achse gedreht wird, so werden Strahlen gleicher Wellenlänge in den Punkten eines Kreises vereinigt oder „*fokussiert*“, dessen Mittelpunkt in der Drehungsachse liegt und der durch die Stelle des Spaltes hindurchgeht. Aus der Lage des Fokussierungspunktes ergibt sich also bei bekannter Gitterkonstante an der Hand einer Skala unmittelbar die *Wellenlänge*. Wird entlang dem Kreis ein photographischer Film angebracht, so bildet sich auf ihm ein *Spektrum* der Strahlung, im allgemeinen in *mehrfacher Ordnung*, ab.

Mittels der photographischen Methode, die vor allem durch Maurice de Broglie ausgebildet wurde, lassen sich Wellenlängen mit einer Genauigkeit von etwa einem Milliontel vergleichen. Die größte Wellenlänge, die durch einen Kristall abgelenkt werden kann, ist nach der letzten Gleichung des § 125, weil n nicht kleiner als 1 und $\sin \theta$ nicht größer als 1 sein kann, durch die doppelte Gitterkonstante gegeben. Für Messungen mittels des Steinsalzkristalls liegt die obere Grenze daher bei $5,6 \text{ \AA}$; mittels der Kristalle fester Fettsäuren können Wellenlängen bis zu 50 \AA gemessen werden. Die kleinsten Wellenlängen, die noch mit Kristallen meßbar sind (allerdings nach einer anderen Methode als derjenigen des Drehkristalls), liegen bei etwa $0,05 \text{ \AA}$. In der Röntgenspektroskopie wird als Einheit der Wellenlänge gewöhnlich die X -Einheit (X), nämlich der tausendste Teil eines Å , benutzt; es ist demnach $1 X = 10^{-11} \text{ cm}$.

Die längstwelligen Röntgenstrahlen, die man bisher zu erzeugen vermochte, haben Wellenlängen von etwa 500 \AA , reichen also schon sehr weit in das Gebiet hinein, das von der ultravioletten Seite her erforscht worden war. Die kürzestwelligen Röntgenstrahlen von bestimmter charakteristischer Wellenlänge liegen bei etwa $100 X$, und in diesem Bereich liegen auch die längstwelligen *Gammastrahlen*, die, wie wir nun wissen, von den Atomkernen ausgehen. Die kürzestwelligen bekannten Gammastrahlen haben eine Wellenlänge von $0,02 X$; sie liegen um etwa 37 Oktaven höher als die Strahlen des äußersten Ultrarot.

§ 127. Die Röntgenspektren. Schon im Jahre 1905 machte Barkla die bedeutungsvolle Entdeckung der sogenannten *Eigenstrahlung* der Grundstoffe. Er fand, daß ein von Röntgenstrahlen getroffener Körper selbst wieder Röntgenstrahlen aussendet und unter diesen vorwiegend solche enthalten sind, deren Härte (Durchdringungsvermögen) oder, wie man später sagte, deren Wellenlänge eine charakteristische Eigenschaft der Atome des betreffenden Körpers darstellt, ähnlich wie man dies schon von den optischen Spektrallinien wußte. Barkla fand auch bereits, daß die Härte dieser Eigenstrahlung mit zunehmendem Atomgewicht wächst, und er unterschied auch schon eine härtere K - und eine weichere L -Strahlung.

Mittels der Methode des Drehkristalls gelang es dann 1913 Moseley, die Eigenstrahlung in ein *Röntgenspektrum* aufzulösen,

das sich, ähnlich wie die optischen Spektren, aus einzelnen charakteristischen *Linien* zusammensetzt. Die härtesten Linien, also diejenigen von kleinster Wellenlänge, bilden die *K*-Serie, eine weichere Gruppe die *L*-Serie, und noch weicher sind die *M*- und *N*-Serie, die allerdings erst später von Siegbahn entdeckt wurden.

§ 128. Das Moseleysche Gesetz. Zu einer höchst bedeutungsvollen Entdeckung wurde Moseley geführt, als er die Röntgenspektren der verschiedenen Grundstoffe miteinander verglich. Er

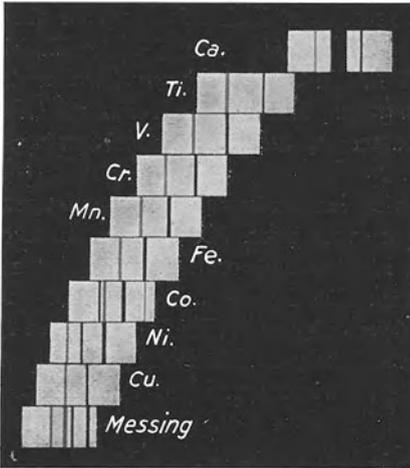


Abb. 62. Die Moseleysche Reihe der Grundstoffe.

fand nämlich, daß sich die *Grundstoffe* nach ihren Röntgenspektren in eine „*natürliche Reihe*“ ordnen lassen, innerhalb deren sich die Röntgenlinien mit größter Präzision von Element zu Element verschieben; jede Lücke offenbart sich durch einen zu großen Sprung (vgl. Abb. 62). In der Moseleyschen Reihe wächst im allgemeinen auch das Atomgewicht von Stelle zu Stelle, jedoch unregelmäßig und mit einigen wenigen Ausnahmen. (So geht z. B. in der Moseleyschen Reihe

trotz etwas höheren Atomgewichtes das Kobalt dem Nickel voraus.)

Durch röntgenspektroskopische Messungen, die durch optische Messungen in dem Grenzgebiet zwischen Röntgen- und ultravioletten Strahlen ergänzt wurden, konnte die natürliche Reihe der Grundstoffe eindeutig festgestellt und jedem Grundstoff eine bestimmte *Ordnungszahl* zugeordnet werden¹ (vgl. die spätere Tabelle in § 203).

Wie nun Moseley fand und das nach ihm benannte Gesetz lehrt, nimmt die *Quadratwurzel aus der Frequenz* einer bestimmten Röntgenlinie, z. B. der stärksten Linie in der *K*-Serie, der so-

¹ Die wenigen Lücken, die die spektroskopische Untersuchung offen ließ, konnten leicht auf Grund der Atomgewichte sowie der chemischen Periodizität (s. § 203) ausgefüllt werden.

genannten K_α -Linie, *linear* mit der *Ordnungszahl* zu. Für die K_α -Linie gilt dabei die Beziehung

$$\frac{\nu}{c} = \frac{3}{4} R (Z - a)^2,$$

wobei ν die Frequenz, R die Rydbergsche Konstante und Z die Ordnungszahl bedeuten; a ist eine Konstante, die für die meisten Elemente nur wenig von 1,6 verschieden ist.

Wie in den optischen Spektren, so gelten auch in den Röntgenspektren gemäß dem Ritzschen Prinzip mannigfache *Kombinationsbeziehungen*. Die wichtigste unter ihnen verknüpft die erwähnte K_α -Linie und die stärkste Linie der L -Serie, die L_α -Linie, mit der zweitstärksten Linie der K -Serie, der sogenannten K_β -Linie; die Frequenz von K_β ist gleich der Summe der Frequenzen von K_α und L_α .

§ 129. Die Optik der Röntgenstrahlen. Die Röntgenstrahlen sind zwar mit dem sichtbaren Licht wesensgleich und nur hinsichtlich der Wellenlänge verschieden; gleichwohl hat die Kleinheit der Wellenlänge gewisse Verschiedenheiten, vor allem in der Brechung und Absorption zur Folge. Röntgenstrahlen werden nahezu gar nicht gebrochen; ihr *Brechungsindex* weicht nur ganz wenig von Eins ab und ist um etwa 10^{-6} *kleiner* als Eins. Für Röntgenstrahlen erscheint infolgedessen ein fester Körper gegen Luft als das optisch dünnere Mittel, und Röntgenstrahlen, die fast ganz streifend auf ein festes Medium auftreffen, können somit *total reflektiert* werden.

Compton und Doan konnten 1925, indem sie Röntgenstrahlen von einem optischen *Strichgitter* total reflektieren ließen, in der Tat Beugungsphänomene wahrnehmen. Dadurch vermochten sie nicht nur einen unmittelbaren experimentellen Nachweis für die lichtartige Natur der Röntgenstrahlen zu erbringen, sondern zuerst auch — ohne Benutzung von Kristallen — *Wellenlängen* von Röntgenlinien *absolut* zu messen. Die von Compton und Doan ermittelten absoluten Werte stimmten ausgezeichnet mit den aus den Kristallmessungen bekannten überein.

Außerhalb des sehr engen Bereiches der totalen Reflexion konnten an Röntgenstrahlen Reflexionserscheinungen nicht festgestellt werden; Spiegel für Röntgenstrahlen gibt es nicht.

Die *Absorption*, die Röntgenstrahlen bei ihrem Durchgang durch Stoffe erfahren, wächst bei chemisch einfachen Stoffen mit

der Ordnungszahl (also praktisch mit dem Atomgewicht) und setzt sich bei chemischen Verbindungen additiv aus den Absorptionen hervor, die die einzelnen Elemente hervorbringen. Organische Verbindungen, die sich nur aus Elementen von niedrigen Ordnungszahlen aufbauen, schwächen Röntgenstrahlen kaum merklich, während Metalle von hoher Ordnungszahl, wie z. B. Blei, bereits in Schichten von ganz wenigen Millimetern die Röntgenstrahlung nahezu völlig absorbieren; solche Stoffe zeigen daher auf Röntgenphotographien besonders tiefe Schatten. Daß Röntgenstrahlen von Knochen stärker als von den Weichteilen des menschlichen Körpers absorbiert werden, erklärt sich daraus, daß das in den Knochen enthaltene Kalzium mit der Ordnungszahl 20 weit die Ordnungszahlen von Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff überträgt.

§ 130. Das Gesetz von Kirchhoff. Die von einem Körper ausgesandte Strahlung sämtlicher Wellenlängen wird, sofern sie in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur betrachtet wird, als die *Wärmestrahlung* des Körpers bezeichnet. Sie tritt, wie die alltägliche Erfahrung zeigt, bei einem heißen Körper unvergleichlich stärker als bei einem kühlen Körper in Erscheinung.

Die von einem Körper in der Sekunde pro Quadratcentimeter seiner Oberfläche ausgestrahlte Energie wird das *Emissionsvermögen* des Körpers genannt. Andererseits bezeichnet man als *Absorptionskoeffizienten* diejenige Zahl, die es angibt, welcher Bruchteil einer auf einen Körper auftreffenden Energiemenge von ihm absorbiert wird. Für einen *vollkommen schwarzen* Körper, wie Ruß, ist der Absorptionskoeffizient gleich 1 zu setzen; für Silber, das 97% auftreffender Strahlungsenergie reflektiert, beträgt hingegen der Absorptionskoeffizient nur 0,03.

Ein für die Lehre von der Wärmestrahlung grundlegendes Gesetz wurde nun von Kirchhoff 1859 in der Form ausgesprochen, daß das Emissionsvermögen dem Absorptionskoeffizienten proportional ist, sonst aber einzig und allein von der *Temperatur* abhängt. Bei gegebener Temperatur ist also das Emissionsvermögen eines beliebigen Körpers gleich seinem Absorptionskoeffizienten, multipliziert mit dem Emissionsvermögen, das bei dieser Temperatur ein vollkommen schwarzer Körper aufweist. Silber emittiert z. B. nach dem Kirchhoffschen Gesetz bei jeder Temperatur nur rund ein Dreißigstel derjenigen Energie, die bei der gleichen

Temperatur durch Ruß ausgesandt wird. So erklärt es sich auch, daß ein Tintenfleck auf einem Platinblech heller als dieses glüht.

§ 131. Das Strahlungsgesetz von Stefan. Wie 1879 Stefan entdeckte und später Boltzmann exakt begründete, besteht Proportionalität zwischen dem Emissionsvermögen und der *vierten Potenz der absoluten Temperatur*.

Die Wärmemenge, die durch direkte Sonnenstrahlung 1 cm² an der Grenze der Erdatmosphäre in einer Minute empfängt, beträgt nun etwa 3 Kalorien. Unter Zugrundelegung des bekannten Abstandes zwischen Erde und Sonne kann hieraus berechnet werden, daß die Sonne in jeder Sekunde 10²⁶ Kalorien emittiert und ungefähr 1¹/₂ Kalorien pro Gramm im Jahr produziert. Auf Grund dieser Daten kann aus dem Stefanschen Gesetz die Temperatur der Sonnenoberfläche zu etwa 5500 bis 6000 Grad berechnet werden.¹

§ 132. Das Verschiebungsgesetz von Wien. Daß in der Strahlung eines warmen Körpers keineswegs alle Teile des Gesamtspektrums gleich stark vertreten sind und sich auch die Anteile mit der Temperatur ändern, geht schon aus der alltäglichen Erfahrungstatsache hervor, daß erhitzte Körper zunächst keine sichtbare Strahlung aussenden und erst bei etwa 500^o in Rotglut geraten, die bei fortgesetzter Steigerung der Temperatur allmählich in Gelbglut und schließlich in Weißglut übergeht.

Zu jeder Temperatur gehört eine bestimmte Wellenlänge, für die innerhalb des kontinuierlichen Spektrums des schwarzen Körpers die Strahlung am stärksten ist. Wie nun 1893 Wilhelm Wien durch theoretische Überlegungen ermittelte und durch das Experiment bestätigt fand, stellt das Produkt aus dieser veränderlichen Wellenlänge (λ^*) und der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers eine *Konstante* dar. Es ist

$$\lambda^* T = 0,288 \text{ cm} \cdot \text{grad.}$$

Je höher die Temperatur wird, desto mehr *verschiebt* sich also das Maximum in der Richtung abnehmender Wellenlänge. Es

¹ Das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers E kann nämlich gleichgesetzt werden

$$E = \sigma T^4,$$

wobei die Stefansche Konstante σ gleich ist 5,77 · 10⁻⁵, auf Erg, cm, sec und Celsiusgrad bezogen.

liegt bei nahezu allen künstlichen Lichtquellen im Ultrarot und erreicht erst bei ungefähr 4000° den sichtbaren Bereich. Im Spektrum der Sonne liegt das Maximum im Grüngelb, bei der Bogenlampe (4200°) im Rot (bei 7000 \AA) und bei der Wolframdrahtlampe im nahen Ultrarot (bei zirka 9000 \AA).

Infolge der Verschiebung wächst mit zunehmender Temperatur der sichtbare Teil der Strahlungsenergie noch viel rascher, als die Gesamtstrahlung gemäß dem Stefanschen Gesetz zunimmt. Die Leuchtstärke verdoppelt sich z. B. bei einer Steigerung der Temperatur von 1800 auf 1875°C ; doch vergeuden selbst die vollkommensten modernen Glühlampen zwecklos über 90% der ausgesandten Energie in der Form von unsichtbarer, vor allem ultraroter Strahlung.

Das vollständige *Strahlungsgesetz*, das die *spektrale Verteilung* der Strahlungsenergie in ihrer Abhängigkeit von der *Temperatur* beschreibt, wurde 1900 von Planck gewonnen, indem er in die Physik die Hypothese des elementaren Wirkungsquantums einführte und sich die Strahlung aus *Energieelementen* zusammengesetzt dachte, die dem Produkte aus der Frequenz und dem Wirkungsquantum gleich sind.

§ 133. Die Fluoreszenz. Zahlreiche Substanzen zeigen die Eigentümlichkeit, daß sie durch Bestrahlung zum Selbstleuchten, zu sogenannter *Fluoreszenz*, angeregt werden, wobei nach einer von Stokes aufgefundenen Regel das Fluoreszenzlicht stets *längerwellig* als das primäre Licht ist. Bekannte Beispiele fluoreszierender Substanzen sind Roßkastanienrinde in Wasser, die im Tageslicht hellblau schimmert, und Chlorophyll (Blattgrün), das in alkoholischer Lösung im Sonnenlicht intensiv rot leuchtet. Zahlreiche Stoffe, wie z. B. Uranglas, werden durch ultraviolette Strahlen zum Selbstleuchten in sichtbaren Farben angeregt; auf diese Weise können ultraviolette Strahlen indirekt sichtbar gemacht werden.

Als *Phosphoreszenz* wird die Eigenschaft vieler Körper bezeichnet, nach vorhergegangener Belichtung durch längere Zeit zu leuchten. Besonders stark kommt diese Fähigkeit Schwefelverbindungen der Erdalkalien (wie Kalzium, Barium) mit Metallzusätzen zu. Fluoreszenz und Phosphoreszenz sind Beispiele für Leuchtvorgänge, die ohne Erhitzung vor sich gehen, und die man unter dem Namen *Lumineszenz* zusammenfaßt.

§ 134. **Der Doppler-Effekt.** Wird Licht, dem an sich eine bestimmte Frequenz (ν_0) zukommt, von einem mit der Geschwindigkeit v *bewegten* Körper in der Bewegungsrichtung *ausgesandt*, so muß seine *Frequenz*, wie bereits Doppler 1842 erkannte, um einen Betrag $\Delta \nu$ *erhöht* erscheinen, für den die Beziehung gilt

$$\Delta \nu = \nu_0 \frac{v}{c}.$$

Um denselben Betrag erscheint die Frequenz erniedrigt, wenn die Emission entgegen der Bewegungsrichtung erfolgt. Schließen Emissions- und Bewegungsrichtung miteinander einen Winkel ein, so ist unter v die Komponente der Geschwindigkeit in der Bewegungsrichtung zu verstehen.¹

Der Doppler-Effekt offenbart sich, wie 1868 Huggins erkannte, in einer Linienverschiebung in den *Spektren der Fixsterne*, und umgekehrt kann aus der beobachteten Rot- oder Violettverschiebung (d. h. Verschiebung in der Richtung abnehmender oder zunehmender Frequenz) die Bewegung der Fixsterne erkannt und ihre Geschwindigkeit berechnet werden. Als eine unmittelbare Bestätigung des Dopplerschen Prinzips kann es angesehen werden, daß die für die Planeten auf Grund der wahrgenommenen Linienverschiebungen berechneten Geschwindigkeiten mit denjenigen übereinstimmen, die sich aus himmelsmechanischen Beobachtungen ergeben. Die größten bisher bekannten Verschiebungen wurden in den Spektren mancher *Spiralnebel* festgestellt; sie entsprechen einer von uns weg gerichteten Geschwindigkeit von 40000 km pro Sekunde.

¹ Außer auf optischem Gebiete tritt der Doppler-Effekt auch auf akustischem Gebiete auf. Ein Ton, der von einer bewegten Schallquelle stammt, erscheint erhöht oder erniedrigt; an die Stelle der Lichtgeschwindigkeit tritt in den akustischen Beziehungen natürlich die Schallgeschwindigkeit.

Vierter Teil.

Elektrizitätslehre.

Zehntes Kapitel.

Elektrisches und magnetisches Feld.

§ 135. **Der Dualismus der Elektrizität.** Schon im 7. Jahrhundert v. Chr. war es bekannt, daß einige Körper, zu denen vor allem der Bernstein gezählt wurde, durch Reiben in einen Zustand versetzt werden können, in dem sie leichte, in ihrer Nähe befindliche Gegenstände anziehen. Nach dem griechischen Worte für Bernstein wurde dieser Zustand später allgemein als *elektrisch* bezeichnet. Daß es sich bei dieser Erscheinung um eine *allgemeine* Eigenschaft aller Körper handelt, stellte um das Jahr 1600 Gilbert fest.

1733 entdeckte Dufay als fundamentale Eigentümlichkeit der Elektrizität ihren Dualismus. Er fand, daß es *zwei entgegengesetzte* elektrische Zustände gibt, derart, daß zwei Körper des *gleichen* Zustandes einander *abstoßen*, während zwei Körper *entgegengesetzten* Zustandes einander *anziehen*. Als Repräsentanten der beiden Zustände werden gewöhnlich Glas und Harz betrachtet. In willkürlich konventioneller Weise wird derjenige Zustand als positiv bezeichnet, den durch Reiben das Glas annimmt.

§ 136. **Das Coulombsche Gesetz.** Im Jahre 1785 entdeckte Coulomb, daß die *Kraft*, mit der zwei elektrisch geladene Kugeln aufeinander wirken, dem *Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional* ist. Coulomb fand weiterhin, daß sich die Kraft auf die Hälfte verringert, wenn man, bei gleichbleibender Entfernung, der einen Kugel die Hälfte ihrer Ladung nimmt, indem man sie mit einer gleich großen dritten, ungeladenen Kugel aus gleichem Stoffe berührt. Indem man sich eines geeigneten Maßsystems

bedient, kann somit die Kraft K , mit der zwei Ladungen Q und Q' in einer Entfernung r aufeinander wirken, gleichgesetzt werden

$$K = \frac{QQ'}{r^2}.$$

Dabei ist bei gleichem Vorzeichen von Q und Q' die Kraft abstoßend, bei entgegengesetztem anziehend. Coulomb selbst hat dieses Gesetz mittels einer von ihm erfundenen Drehwaage experimentell geprüft und bestätigt.

Auf Grund des Coulombschen Gesetzes definiert man nun als Einheit der *Elektrizitätsmenge* oder sogenannte *elektrostatische Einheit* eine Ladung, die auf eine gleich große in einer Entfernung von 1 cm eine Kraft von 1 Dyn ausübt. Die Elektrotechnik benutzt als praktische Einheit das $3 \cdot 10^9$ fache dieser absoluten Einheit, das sogenannte „*Coulomb*“. Aus dem Coulombschen Gesetz folgt als physikalische *Dimension* der Elektrizitätsmenge $\text{g}^{\frac{1}{2}} \text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{sec}^{-1}$. (Denn in der letzten Formel hat die Kraft die Dimension g cm sec^{-2} , und somit ist die Dimension des Quadrates der Elektrizitätsmenge gleich $\text{g cm}^3 \text{sec}^{-2}$.)

Ein fundamentaler physikalischer Erfahrungssatz besagt, daß es unmöglich ist, eine Elektrizitätsmenge bestimmten Vorzeichens hervorzubringen, ohne zugleich eine gleich große Elektrizitätsmenge entgegengesetzten Vorzeichens zu erzeugen. Man spricht darum von einer *Erhaltung der Elektrizität* in dem Sinne, daß man die algebraische Summe der vorhandenen positiven und negativen Elektrizität nicht zu ändern vermag. Vereintigt man Ladungen gleicher Art, so resultiert eine Ladung in der Größe der Summe; vereintigt man hingegen zwei Ladungen entgegengesetzter Art, so resultiert eine Ladung, die der Differenz gleich ist.

§ 137. Die Elektrizitätsleiter. Schon im Jahre 1729 entdeckte Gray, daß bestimmte Körper, zu denen vor allem die Metalle gehören, den elektrischen Zustand *fortzuleiten* vermögen. Diese Entdeckung führte zu der Unterscheidung von Leitern oder *Konduktoren* und Nichtleitern oder *Isolatoren*, zu denen z. B. Glas und Kautschuk gehören. Daß auch der menschliche Körper die Elektrizität leitet, erklärt sich aus seiner Feuchtigkeit.

In Leitern kann die Elektrizität ihren Sitz nur an der *Oberfläche* haben, während das Innere stets frei von Ladungen ist. Ist der Leiter kugelförmig, so verteilt sich infolge der wechselseitigen

seitigen Abstoßung die elektrische Ladung gleichmäßig über die Oberfläche. Die auf die Flächeneinheit bezogene Ladung stellt die sogenannte *Ladungsdichte* dar. Sie ist um so größer, je größer die Krümmung ist und daher besonders groß an Spitzen. Aus diesem Grunde vermeidet man scharfe Krümmungen bei allen Körpern, die für elektrostatische Zwecke benutzt werden. Andererseits findet die sogenannte *Spitzenwirkung* eine wichtige, noch näher zu besprechende Anwendung in den Blitzableitern.

§ 138. Das elektrische Feld. Ein Gebiet, innerhalb dessen ein hineingebrachter elektrisch geladener Körper infolge seiner Ladung eine Kraft erfährt, wird als *elektrisches Feld* bezeichnet. Den Quotienten aus der Kraft und der Ladung, also die auf die Ladungseinheit wirkende Kraft, nennt man die elektrische *Feldstärke* (F); es ist somit

$$F = \frac{K}{Q}.$$

Der Transport eines geladenen Körpers von einer Stelle eines Feldes zu einer anderen bedeutet natürlich im allgemeinen eine Verrichtung von Arbeit. Wir wollen etwa ein Feld betrachten, das von einer nahezu punktförmigen Ladung Q von dem Punkte O aus erzeugt werde; in dem Felde bewege sich ein die Ladung Q' tragender Körper von einem Punkte A zu einem Punkte B , der mit A und O in derselben Geraden, und zwar näher zu dem Feldzentrum liege. Es sei OA gleich r_1 und OB gleich r_2 . Wir nehmen an, daß Q' so klein gegen Q sei, daß die Ladung Q' das Feld nicht merklich beeinflusse, und ferner, daß die Strecke AB klein gegen OA und OB sei. Wir können dann die mittlere, auf der Strecke AB wirksame elektrostatische Kraft durch das geometrische Mittel der Kräfte in A und B darstellen, nämlich durch $\frac{Q Q'}{(r_1 r_2)}$. Die auf der Strecke AB verrichtete Arbeit kann somit gleichgesetzt werden

$$W = \frac{Q Q'}{r_1 r_2} (r_1 - r_2) = Q Q' \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Eine Bewegung senkrecht zu der Krafrichtung ist mit keiner Arbeitsleistung verbunden; sind daher A und B zwei einander nahe Punkte, wobei die Richtung AB einen beliebigen Winkel mit der Richtung zum Zentrum einschließe, so gilt dennoch die letzte Formel. Befinden sich schließlich die Punkte A und B in

beliebiger Entfernung voneinander, und ist auch der Weg zwischen ihnen von beliebiger Gestalt, so können wir immer die Bewegung in Stücke zerlegen, für die die letzte Formel anwendbar ist. Ganz allgemein erscheint somit die Arbeit, die eine Einheitsladung ($Q' = 1$) verbraucht, wenn sie ihre Entfernung von der felderzeugenden Ladung Q von r_1 auf r_2 vermindert, durch die Formel dargestellt:

$$w = \frac{Q}{r_2} - \frac{Q}{r_1}.$$

Die Arbeit, die eine Einheitsladung verrichtet, wenn sie sich aus einer Entfernung, in der der Einfluß des Feldes verschwindet ($r_1 = \infty$), bis zu einer bestimmten Stelle des Feldes bewegt, wird als das *elektrostatische Potential* an dieser Stelle bezeichnet. Im Falle einer punktförmigen Ladung Q ist daher das Potential in einer Entfernung r von der Ladung gleich

$$V = \frac{Q}{r}.$$

Sind verschiedene punkartige Ladungen vorhanden, so ist das Potential

$$V = \sum \frac{Q}{r},$$

wobei in jedem Falle r die Entfernung der betrachteten Stelle von der betreffenden Ladung ist. Stets ist die Arbeit, die mit einer Bewegung von einer Stelle eines Feldes zu einer anderen verbunden ist, dem *Potentialunterschiede* oder, wie man auch sagt, der *Spannung* zwischen den beiden Stellen gleich.

Die absolute Einheit der Spannung ist gegeben, wenn der Transport der elektrostatischen Einheit zwischen den beiden Stellen mit einer Arbeit von 1 Erg verbunden ist. Der 300. Teil dieser absoluten elektrostatischen Spannungseinheit wird als *Volt* bezeichnet und dient als *technische Einheit*.

Durch jeden Punkt P eines elektrischen Feldes kann man eine *Äquipotential-* oder *Niveaufläche* legen, die den geometrischen Ort aller derjenigen Punkte darstellt, die gegen den Punkt P keinen Potentialunterschied aufweisen. Die Oberfläche eines Konduktors stellt eine derartige Niveaufläche dar. Die Bewegung eines elektrischen Körpers in einer Niveaufläche erfordert keine Arbeit.

Die Richtung der in einem Punkte herrschenden Feldstärke steht senkrecht auf der durch diesen Punkt gelegten Niveau-

fläche. Die Arbeit, die bei der Bewegung der Ladungseinheit von einer zu einer anderen Niveaufläche umgesetzt wird, ist nun gleich dem Produkte aus der auf die Ladungseinheit wirkenden Kraft (der Feldstärke) und dem senkrechten Abstand der beiden Niveauflächen. Umgekehrt ist daher die Feldstärke gleich der Arbeit, also der Potentialdifferenz, gebrochen durch den Abstand, oder gleich dem auf ein Zentimeter bezogenen Potentialunterschied in der Richtung senkrecht zu den Niveauflächen. Infolgedessen pflegt man die Feldstärke in „Volt pro Zentimeter“ anzugeben. Die stärksten technisch herstellbaren Felder weisen einige Millionen Volt pro Zentimeter auf. In der Atmosphäre herrscht normalerweise ein Potentialgefälle von etwa 1 Volt pro Zentimeter.

Kurven, die im elektrischen Felde so konstruiert werden, daß sie an jeder Stelle die Richtung der Feldstärke haben und somit überall die Niveauflächen senkrecht schneiden, stellen elektrische *Kraftlinien* dar. Wird üblicherweise die Dichte der Kraftlinien, d. h. ihre Zahl pro Quadratcentimeter, dem Betrage der Feldstärke (bis auf einen einheitlichen Proportionalitätsfaktor) gleich gesetzt, so läßt sich auf Grund des Coulombschen Gesetzes deduzieren, daß nur dort, wo Ladungen sind, Kraftlinien entspringen oder aufhören. Von einer positiven Ladung im Betrage Q gehen (abgesehen von dem Proportionalitätsfaktor) $4\pi Q$ Kraftlinien aus, in eine negative Ladung vom Betrage Q münden ebensoviel Kraftlinien ein. Längs der Kraftlinien herrscht ein Zug, senkrecht zu ihnen ein Druck.

§ 139. Die Kapazität. Der Potentialunterschied, den ein Körper gegenüber der Erde aufweist, wird üblicherweise als sein Potential schlechthin bezeichnet. Von diesem Potential hängt die Elektrizitätsmenge ab, die ein Leiter aufzunehmen vermag. Ladung (Q) und Potential (V) eines Leiters sind durch die Beziehung verknüpft

$$Q = CV,$$

wobei C , die sogenannte *Kapazität*, eine für den Leiter charakteristische Konstante darstellt. Das Potential auf der Oberfläche eines kugelförmigen Leiters ist nach dem in § 138 Gesagten gleich $\frac{Q}{r}$; die Kapazität eines kugelförmigen Konduktors stimmt also mit seinem Radius überein.

Die Kapazität eines Konduktors, der bei einem Potential von 1 Volt eine Ladung von 1 Coulomb annimmt, wird als *Farad* bezeichnet (nach dem Physiker Faraday). Da in absolutem Maß 1 Coulomb gleich $3 \cdot 10^9$ und 1 Volt gleich $\frac{1}{300}$ ist, entspricht also 1 Farad $9 \cdot 10^{11}$ cm. Die Praxis benutzt, weil diese Einheit zu groß wäre, ihren millionsten Teil, das sogenannte *Mikrofarad* (μF). Eine Kapazität von $1 \mu F$ kommt somit einer Kugel von 9 km Radius zu.

§ 140. Der Kondensator. Bringt man in die Nähe eines positiv geladenen Körpers *A* einen isolierten, ursprünglich neutralen Konduktor *B*, so bewirkt die Verschiebbarkeit der Ladungen innerhalb des Konduktors *B*, daß er auf der dem Körper *A* zugewandten Seite eine negative und auf der abgewandten Seite eine positive Ladung annimmt. Diese Verteilung stellt sich als eine Folge der anziehenden und abstoßenden Kräfte ein, die von dem Körper *A* ausgehen. Leitet man den Konduktor *B* zur Erde ab, so fließt die positive Elektrizität ab, während die negative zurückbleibt. Man kann also durch sogenannte *Influenz* den Konduktor *B* durch den Körper *A* entgegengesetzt laden.

Stellt man einer isolierten Metallplatte eine zweite, zur Erde abgeleitete gegenüber, so erniedrigt die auf der zweiten Platte durch Influenz hervorgerufene entgegengesetzte Ladung durch ihre Anziehung das Potential der ersten Platte; dadurch setzt sie diese in stand, mehr Elektrizität aufzunehmen, als ohne die zweite Platte unter sonst gleichen Umständen möglich wäre. Eine derartige Kombination von zwei Platten stellt einen sogenannten *Plattenkondensator* dar. Seine häufigste Form ist die *Franklinsche Tafel*. Zu den Kondensatoren gehört auch die ebenfalls sehr bekannte *Leidener Flasche*. Beide Apparate bestehen aus Glas, das beiderseits mit Stanniol beklebt ist. Die Erhöhung der Kapazität ist um so bedeutender, je näher die beiden Platten zueinander sind.

Auf dem Prinzip der elektrostatischen Induktion beruht auch der *Elektrophor*. Er besteht aus einer isolierenden Scheibe aus Hartgummi oder aus Paraffin, das in einen Metallkasten gegossen ist, und einer Metallscheibe, die mittels eines isolierenden Griffes gehandhabt werden kann. Die isolierende Platte wird durch Reiben elektrisch geladen; dann wird die Metallplatte aufgesetzt und zugleich vorübergehend ableitend berührt. Wird die Metall-

platte abgehoben, so trägt sie daher eine elektrische *Ladung*, die auf andere Körper *übertragen* werden kann. Dieser Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden. Die Quelle der elektrischen Energie ist natürlich die mechanische Arbeit, die aufgewendet werden muß, wenn die entgegengesetzt geladenen Platten aus isolierender Substanz und Metall voneinander entfernt werden.

Das Prinzip des Elektrophors findet auch in den bekannten *Elektrisiermaschinen* Anwendung; doch wird bei ihnen die Berührung zwischen der isolierenden Substanz und dem Metall durch eine Annäherung ersetzt, wobei die Elektrizität durch „Kämme“ oder „Bürsten“ aus Metall aufgesaugt wird.

Auf elektrostatischer Induktion und Spitzenwirkung beruht auch der schon erwähnte *Blitzableiter*. Gewitterwolken sind positiv elektrisch und rufen daher durch Induktion auf ungeschützten Häusern eine negativ elektrische Ladung hervor. Da aber die Ladungsdichte in den Spitzen der Blitzableiter viel, viel größer als an anderen Stellen des Gebäudes ist, bleiben die anderen Stellen fast ladungsfrei, so daß sie von den Entladungen in der Form von Blitzen nicht betroffen werden. Überdies führen die Blitzableiter durch ihre Spitzen- und Saugwirkung eine allmähliche Entladung der benachbarten Wolken herbei.

In der modernen Technik und Experimentalphysik benutzt man als einen in seiner Kapazität genau regulierbaren Apparat den sogenannten *Drehkondensator*. Er besteht aus einem Satz halbkreisförmiger Metallplatten, zwischen die durch Drehung an einem Knopf ein zweiter Satz von Paraffinplatten hineingeschoben werden kann; jedem Drehungswinkel entspricht ein bestimmter Wert der Kapazität.

§ 141. Die Elektrometer. Die einfachste Vorrichtung zum Nachweis elektrischer Ladungen ist das *Elektroskop*; es besteht im wesentlichen aus einem Messingstab, der durch den Hals einer Glasflasche geht, oben in eine Platte oder einen Knopf mündet und unten zwei Goldblättchen trägt. Wird die Platte mit einem elektrisch geladenen Körper berührt, so divergieren die Goldblättchen, wobei das Ausmaß der an einer Skala meßbaren Divergenz die Größe der Ladung erkennen läßt.

In entsprechender Vervollkommnung eignet sich das Elektroskop als Elektrometer auch zur Messung von *Potentialen*, und zwar auf Grund der Tatsache, daß nach der früher angegebenen Be-

ziehung Proportionalität zwischen Ladung und Potential besteht. Die empfindlicheren Elektrometer gehen in ihrer Konstruktion im wesentlichen auf das von William Thomson erfundene *Quadrantenelektrometer* zurück. Es besteht (Abb. 63) aus vier kreuzweise miteinander verbundenen, auf Glasfüßen ruhenden Metallscheiben, über denen als „Nadel“ eine geeignet geformte dünne Platte aus Aluminium schwebt; sie ist an einem dünnen Faden aufgehängt, durch den die Nadel auf ein hohes positives Potential aufgeladen wird. Das eine Quadrantenpaar ist nun zur Erde abgeleitet, das andere wird mit dem Körper verbunden, dessen Potential gemessen werden soll. Je nachdem, ob dieses Potential positiv oder negativ ist, wird die Nadel abgestoßen oder angezogen; dadurch erfährt der Faden, an dem die Nadel aufgehängt ist, eine *Torsion*, deren Größe mittels eines am Faden befestigten Spiegels abgelesen werden kann und ein Maß des zu bestimmenden Potentials darstellt.

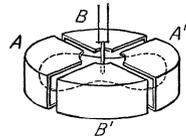


Abb. 63.
Das Quadrantenelektrometer.

§ 142. Die Dielektrizitätskonstante. Wie Faraday im Jahre 1835 feststellte, hängt die elektrische Kraft zwischen zwei geladenen Körpern wesentlich von dem *Mittel* ab, das den Raum zwischen ihnen erfüllt. Bezeichnen wir die beiden Ladungen mit Q und Q' , so ist die Kraft in einem beliebigen Mittel

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \frac{Q Q'}{r^2},$$

wobei ε eine für das Mittel charakteristische Konstante, die sogenannte *Dielektrizitätskonstante* ist. Für Gase ist sie nur wenig von 1 verschieden, stets aber größer als 1; für Glas beträgt sie 5, für Hartgummi etwa 3, für Porzellan $4^{1/2}$. Den größten Wert, nämlich 80, hat sie für Wasser.

Wird der Zwischenraum zwischen den beiden Konduktoren eines Kondensators mit einem „*Dielektrikum*“ gefüllt, so wird dadurch die Kapazität des Kondensators im Verhältnis $\varepsilon : 1$ erhöht. Auf dieser Tatsache beruht eine gebräuchliche Methode zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten.

§ 143. Die Entdeckungen Voltas und Oersteds. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts entdeckte Volta (im Anschluß an komplizierte physiologische Wahrnehmungen Galvanis) die Möglich-

keit der Erzeugung *beständiger elektrischer Ströme*. Als eine besonders einfache Quelle hierfür erfand Volta den nach ihm benannten „Becher“, nämlich ein mit verdünnter Säure gefülltes Gefäß, in das eine Zink- und eine Kupferplatte getaucht waren. Volta konnte nachweisen, daß die Zinkplatte stets negativ, die Kupferplatte hingegen stets positiv geladen war und infolgedessen ein beständiger elektrischer Strom auftrat, wenn die beiden Platten durch einen die Elektrizität leitenden Draht verbunden wurden.

Eine besonders wichtige Eigenschaft elektrischer Ströme entdeckte dann 1820 Oersted. Er stellte fest, daß ein elektrischer Strom eine *Magnetnadel ablenkt* und deckte damit einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus auf.

§ 144. **Der Magnetismus.** Schon im Altertum war es wohl bekannt, daß der natürliche Magneteisenstein leichte Eisenteilchen anzieht. Im späteren Mittelalter fand auch der *Kompaß* Verbreitung. Im Mittelalter wurde auch schon bekannt, daß es zwei entgegengesetzte Arten von Magnetismus gibt und jeder magnetische Körper *zwei Pole* entgegengesetzter Art, einen sogenannten Nord- und Südpol, besitzt, und daß Pole *gleicher* Art einander *abstoßen*, hingegen Pole *entgegengesetzter* Art einander *anziehen*.

Coulomb fand dann um 1780, daß das nach ihm benannte Gesetz sowohl für elektrisch geladene Körper als auch für Magnetpole gilt. Zwei Pole üben aufeinander eine Kraft aus, die dem Quadrate der Entfernung umgekehrt, hingegen dem Produkte der beiden *Magnetismuskengen* direkt proportional ist. Zu der Definition der Magnetismuskmenge gelangt man, indem man den Proportionalitätsfaktor gleich Eins setzt. So erscheint als *Einheit* diejenige Magnetismuskmenge, die auf eine gleich große in einer Entfernung von 1 cm eine Kraft von 1 Dyn ausübt.

Trotz der vollkommenen Übereinstimmung der beiden Kraftgesetze besteht indessen zwischen magnetischen und elektrischen Zuständen insofern ein wesentlicher Unterschied, als zwar ein einzelner Körper positiv oder negativ elektrisch sein kann, es aber unmöglich ist, einen Körper als solchen nord- oder südmagnetisch zu machen. Rechnet man den Magnetismus der einen Art als positiv (und zwar in konventioneller Weise den Magnetismus des nach Norden weisenden Poles einer Magnetnadel) und den anderen als negativ, so ist die *algebraische Summe* der Magnetismus-

menge eines Magneten immer *Null*. Wenn man daher einen Stabmagneten auch noch so weitgehend teilt, so erhält man als Teile doch immer wieder vollständige, zweipolige Magnete.

Im übrigen folgt aber aus der Übereinstimmung der beiden Coulombschen Gesetze, daß man ganz ebenso wie von elektrischen auch von magnetischen Kraftlinien und ebenso wie von einer elektrischen von einer *magnetischen Feldstärke* sprechen kann, und zwar als der auf einen Einheitspol wirkenden Kraft. Die Einheit der magnetischen Feldstärke, das sogenannte *Gauß*, ist dadurch definiert, daß in einem Felde dieser Stärke auf einen Pol von der Magnetismmenge 1 eine Kraft von 1 Dyn wirkt. Die stärksten herstellbaren Magnetfelder belaufen sich auf etwa 1 Million Gauß.

Befindet sich ein Stabmagnet in einem Magnetfeld und schließt die Verbindungslinie der beiden Pole, also die sogenannte Achse mit der Feldrichtung den Winkel φ ein, so wirken auf die beiden Pole entgegengesetzte Kräfte von dem gleichen Betrage $Hm \sin \varphi$, wenn H die Feldstärke und m die Polstärke ist. Das durch die beiden Kräfte hervorgerufene *Drehmoment* ist also nach § 18 gleich

$$L = Hml \sin \varphi,$$

wenn l der wechselseitige Abstand der beiden Pole ist.

Das Produkt aus der Polstärke und dem Polabstand wird als das *magnetische Moment* bezeichnet; es ist also

$$M = ml,$$

und somit wird das Drehmoment

$$L = HM \sin \varphi.$$

Ist die Achse des Magneten senkrecht zu der Feldrichtung, ist also $\varphi = 90^\circ$ und somit $\sin \varphi$ gleich 1, so wird das Drehmoment ein Maximum für das gegebene Feld und das gegebene magnetische Moment; es wird dann gleich HM . Ganz allgemein ist daher das magnetische Moment eines beliebigen Magneten durch den größten Wert des Drehmomentes bestimmt, das der Magnet in einem magnetischen Felde von der Einheit der Feldstärke erfährt.

Hat der Magnet das Trägheitsmoment J , so hängt nach § 18 die Winkelbeschleunigung ω mit dem Trägheitsmoment durch die Beziehung zusammen

$$\omega = \frac{L}{J},$$

also nach der vorletzten Formel und unter der Annahme, daß der Winkel φ so klein sei, daß sein Sinus durch den Winkel (im Bogenmaß) ersetzt werden kann,

$$\omega = \frac{H M}{J} \varphi.$$

Durch diese Beziehung ist aber eine schwingende Bewegung dargestellt mit der *Schwingungsdauer*

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{\varphi}{\omega}},$$

also

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{J}{H M}}.$$

Die von einem Stabmagneten selbst in einem Punkte seiner Umgebung erzeugte Feldstärke (sie werde H' genannt) ergibt sich durch Zusammensetzung der Kräfte, die von den beiden Polen ausgehen.

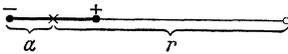


Abb. 64. Feld eines Stabmagneten; erster Hauptfall.

Zwei besonders einfache Fälle liegen vor, wenn wir entweder einen Punkt in der verlängerten Achse des Magneten

oder aber einen Punkt in der zu der Achse senkrechten Symmetralen des Magneten betrachten. Im ersten Falle (Abb. 64) finden wir für die Feldstärke im Punkte P , der von den beiden

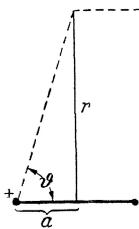


Abb. 65. Feld eines Stabmagneten; zweiter Hauptfall.

Polen die Entfernungen $r-a$ und $r+a$ habe,

$$H' = \frac{m}{(r-a)^2} - \frac{m}{(r+a)^2} = m \frac{(r+a)^2 - (r-a)^2}{(r^2 - a^2)^2} = \frac{4 m a r}{(r^2 - a^2)^2}.$$

Wenn wir wieder das magnetische Moment ($2 m a$) mit M bezeichnen und annehmen, daß r so groß ist, daß daneben a vernachlässigt werden kann, wird also

$$H' = \frac{2 M}{r^3}.$$

Im zweiten Sonderfall (Abb. 65) heben die Komponenten in der senkrechten Richtung einander auf, und es bleiben nur die Komponenten in der Richtung parallel zu der Achse des Magneten übrig. Diese sind in jedem Falle gleich

$\frac{m}{r^2 + a^2} \times \cos \Theta$; nun ist aber $\cos \Theta$ näherungsweise gleich $\frac{a}{r}$; wir finden somit für die Komponente der Feldstärke parallel zur

magnetischen Achse

$$H'' = \frac{2m}{r^2 + a^2} \times \frac{a}{r}$$

oder, wenn wir beachten, daß $2ma$ gleich M ist, und wenn wir wieder annehmen, daß a vernachlässigbar gegen r ist,

$$H'' = \frac{M}{r^3}.$$

In beiden Fällen finden wir also, daß die magnetische *Feldstärke* ungefähr mit der *dritten Potenz* der Entfernung *abnimmt*.

§ 145. Der Erdmagnetismus. Wie zuerst Gilbert um 1600 erkannte, stellt die *Erde* einen riesigen *Magneten* dar. Aus den erdmagnetischen Messungen folgt, daß die die beiden magnetischen Pole der Erde verbindende Achse mit der Rotationsachse der Erde einen Winkel von derzeit ungefähr 12° einschließt. Der magnetische Nordpol (der nach der üblichen Definition eigentlich Südmagnetismus aufweist) liegt im arktischen Nordamerika, der andere Pol südlich von Australien in der Südsee.

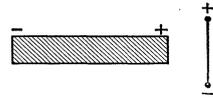


Abb. 66. Der Versuch von Gauß.

Man unterscheidet als die drei „Bestimmungstücke“ des Erdmagnetismus Deklination, Inklination und Horizontalintensität. Unter der *Deklination* versteht man den Winkel, den die Kompaßnadel mit dem geographischen Meridian, also der Süd—Nord-Richtung, einschließt. In Mitteldeutschland beträgt die Deklination derzeit etwa 10° , und zwar in westlichem Sinn. Als *Inklination* wird der Winkel bezeichnet, den eine um eine horizontale Achse drehbare Kompaßnadel bei Einstellung in den magnetischen Meridian mit der Horizontalebene bildet; in Deutschland liegt dieser Winkel zwischen etwa 60 und 70° , wobei es der Nordpol der Nadel ist, der abwärts weist. Unter der *Horizontalintensität* wird schließlich die horizontale Komponente der erdmagnetischen Feldstärke verstanden.

Die Intensität des Erdmagnetismus wurde zuerst von Gauß bestimmt. Er benutzte dazu einen stabförmigen *Hilfsmagnet*, der so orientiert war, daß die Achse senkrecht zum magnetischen Meridian war und durch den Mittelpunkt einer horizontal drehbaren Kompaßnadel hindurchging (Abb. 66). Auf den Nordpol der Magnetenadel wirkt dann bei der gegebenen Lage eine abstoßende Kraft, die nach dem vorhergehenden Abschnitt

gleich ist

$$K = \frac{2 M m}{r^3},$$

wenn M das magnetische Moment des Hilfsmagneten ist, m die Polstärke der Kompaßnadel und r der Abstand des Nordpols von der Mitte des Stabmagneten. Andererseits wirkt auf den Nordpol die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus (H) mit der Kraft mH . Dasselbe wie für den Nordpol gilt auch für den Südpol.

Unter der gleichzeitigen Einwirkung des Hilfsmagneten und des erdmagnetischen Feldes nimmt somit die Kompaßnadel eine Stellung $n's'$ ein, die mit der Einstellung im Meridian ns einen Winkel Θ einschließt. Soll Gleichgewicht bestehen, so muß die Richtung $n's'$ mit der Richtung der Resultierenden aus den beiden Kräften zusammenfallen. Das trifft dann zu, wenn (Abb. 67)

$$K = m H \operatorname{tg} \Theta$$

ist oder (auf Grund der vorletzten Formel)

$$\frac{M}{H} = \frac{1}{2} r^3 \operatorname{tg} \Theta.$$

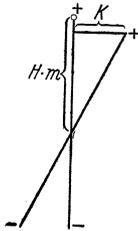


Abb. 67. Einstellung der Kompaßnadel bei dem Gaußschen Versuch.

Durch den angegebenen Versuch kann man also den Quotienten $\frac{M}{H}$ messen, während nach dem

vorhergehenden Abschnitt (§ 144) durch die Beobachtung der Schwingungsdauer des Hilfsmagneten im erdmagnetischen Felde das Produkt $M \cdot H$ ermittelt werden kann. Auf diese Weise bestimmte Gauß die Horizontalintensität des Erdmagnetismus zu ungefähr 0,2 absoluten Einheiten. Durch Division durch den Kosinus des Inklinationswinkels ergibt sich daraus die Totalintensität.

Alle drei Elemente des Erdmagnetismus unterliegen beträchtlichen täglichen, jährlichen und säkularen Schwankungen. Für kartographische Darstellungen verwendet man zweckmäßig die Kurven, die Orte gleicher Deklination bzw. Inklination und Horizontalintensität verbinden und die als Isogonen, Isoklinen und Isodynamen bezeichnet werden.

§ 146. Der Ferromagnetismus. Ein in ein magnetisches Feld gebrachter Körper aus Eisen nimmt ein dem Volumen nahezu proportionales magnetisches Moment an. Das auf die Volumeneinheit bezogene Moment, die sogenannte *spezifische Magneti-*

sierung, erweist sich bis zu einem als *Sättigung* bezeichneten Grenzwerte als der Feldstärke proportional, wobei der als *Suszeptibilität* (κ) bezeichnete Proportionalitätsfaktor eine Materialkonstante darstellt.

Innerhalb eines magnetischen Körpers erscheint die Feldstärke gegenüber dem leeren Raum im Verhältnis $\mu : 1$ vergrößert, wobei

$$\mu = 1 + 4 \pi \kappa$$

ist. Die Größe μ , die in vieler Hinsicht eine Analogie zu der Dielektrizitätskonstante aufweist (im Gegensatz zu dieser jedoch auch kleiner als 1 sein kann), wird die *Permeabilität*, und das Produkt μH die magnetische *Induktion* genannt. μ steigt mit zunehmender Feldstärke bis zu einem Höchstwert und nimmt dann wieder ab. Für weiches Eisen beträgt der Maximalwert ungefähr 3000.

Trägt man als Ordinate die spezifische Magnetisierung (G) als Funktion der als Abszisse gewählten magnetischen Feldstärke (H) auf, so erhält man, wenn

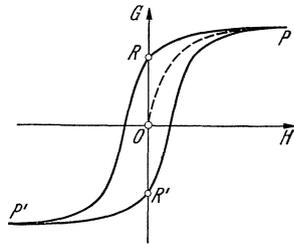


Abb. 68. Magnetischer Kreisprozeß.

man bei dem unmagnetischen Zustand beginnt und bis zur Sättigung fortschreitet, eine Linie von der Art der Kurve OP in Abb. 68. Läßt man die Feldstärke abnehmen, so verringert sich auch die Magnetisierung, aber langsamer als sie vorhin zugenommen hatte, und wenn das Feld wieder Null geworden ist, ist trotzdem eine von Null verschiedene Magnetisierung als sogenannte *Remanenz* vorhanden (OR in der Abb.). Kehrt man nun das Feld um (negative H -Werte), so verringert sich die Magnetisierung weiter, bis bei einem bestimmten Wert von H , der als *Koerzitivkraft* bezeichnet wird, die Magnetisierung verschwindet. Bei weiter wachsendem umgekehrten Feld wird die Magnetisierung entgegengesetzt, bis sie wieder einen Sättigungswert erreicht, der durch den Punkt P' dargestellt ist. Von hier ist die Rückkehr zu dem Punkte P entlang der Kurve $P'R'P$ möglich.

Die Tatsache, daß derart die Magnetisierung von der Vorgeschichte abhängt, wird als magnetische *Hysteresis* bezeichnet. Die Kurve OP nennt man die jungfräuliche Kurve und unter-

scheidet einen auf- und absteigenden Hysteresisast. Wie Warburg gefunden hat, ist durch den Flächeninhalt der Hysteresiskurve die *Wärme* dargestellt, die bei einem vollen magnetischen Kreisprozeß erzeugt wird.

Hinsichtlich der Hysteresiseigenschaften besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Stahl und weichem Eisen. Jener ist schwer magnetisierbar, behält aber den einmal hervorgerufenen Magnetismus bei. Weiches Eisen ist leicht magnetisierbar, verliert aber den Magnetismus sofort, wenn das erzeugende Feld verschwindet.

Die wenigen Stoffe, für die μ in der Größenordnung wesentlich eins übertrifft, heißen *ferromagnetisch*; zu ihnen gehören außer Eisen noch Nickel und Kobalt und ferner einige, von Heusler um 1900 entdeckte *Legierungen* von an sich kaum magnetischen Metallen; besonders stark ferromagnetisch ist z. B. eine Legierung von Mangan, Aluminium und Kupfer.

Bei bestimmten Temperaturen, den sogenannten *Curie-Punkten*, verlieren Eisen, Nickel und Kobalt ihren Ferromagnetismus, Eisen z. B. bei 750° C. Durch eine ganz ungewöhnlich große Permeabilität (anfänglich etwa $\mu = 12000$) ist das 1925 erfundene *Permalloy* ausgezeichnet, eine Legierung, die zu 78% aus Nickel und 22% aus Eisen besteht.

§ 147. Dia- und Paramagnetismus. Bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts galt der Magnetismus als eine spezielle Eigenschaft einiger bevorzugter Stoffe, vor allem eben des Eisens. 1845 entdeckte jedoch Faraday, daß der Magnetismus eine *universelle* Eigenschaft aller Materie ist. Faraday stellte auch fest, daß sich nur ein Teil der Stoffe, wenn er in Stabform oder in einer Röhre drehbar aufgehängt ist, zwischen den beiden Polen eines starken Magneten in der Luft *axial* einstellt; die andere Gruppe nimmt eine *äquatoriale* Stellung, nämlich eine Stellung quer zu der Verbindungslinie der Pole, ein. Stoffe der ersten Art nannte Faraday *paramagnetisch*, solche der zweiten Art *diamagnetisch*.

Für die Stoffe der ersten Art ist die Suszeptibilität positiv, für die Stoffe der zweiten Art negativ, so daß also im zweiten Falle der erzeugte Magnetismus dem Felde entgegengesetzt ist. Für paramagnetische Substanzen ist demnach κ größer, für diamagnetische kleiner als 1; doch ist κ bei ferromagnetischen Stoffen

nie größer als 10^{-4} und für diamagnetische gar nur von der Größenordnung 10^{-6} . Im allgemeinen ist der Diamagnetismus von der Temperatur unabhängig, während der Paramagnetismus, namentlich bei Gasen, der absoluten Temperatur umgekehrt proportional ist.

Elftes Kapitel.

Die elektrischen Ströme.

§ 148. Das Gesetz von Biot und Savart. Oersted, der 1820 die Beeinflussung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom entdeckte, stellte auch bereits den Sinn der Ablenkung in der Abhängigkeit von der Stromrichtung fest. Ampère stellte dann die leicht zu merkende „Schwimmerregel“ auf, wonach eine menschliche Figur, die man sich im Strome in dessen Richtung schwimmend denkt und die der Magnetnadel ihr Gesicht zuwendet, mit dem ausgestreckten linken Arm die Richtung der auf einen Nordpol ausgeübten Kraft anzeigt. Unter der Stromrichtung ist dabei stets die Richtung zu verstehen, in der die positive Elektrizität strömt, bzw. die Richtung, die derjenigen entgegengesetzt ist, in der sich die negative Elektrizität bewegt.

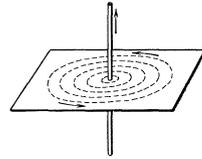


Abb. 69. Magnetische Kraftlinien eines geradlinigen Stromleiters.

Noch im Jahre der Entdeckung Oersteds erschlossen auch Biot und Savart aus ihren Versuchsergebnissen das Grundgesetz des Elektromagnetismus. Darnach ist die Kraft, die von einem Stück eines Stromleiters von der kleinen Länge l bei einer Stromstärke J auf einen Einheitspol in der Entfernung r ausgeübt wird, gleich

$$H = \gamma J \frac{l \sin \Theta}{r^2},$$

wenn Θ der Winkel ist, den die von dem Stromelement zu dem Pol gezogene Strecke mit der Richtung des Stromelementes einschließt; γ ist ein zunächst unbestimmter, nur von dem benutzten Maßsystem abhängiger Proportionalitätsfaktor. Die Kraft steht stets *senkrecht* auf der Ebene, die durch das Stromelement und den Pol bestimmt ist. Die magnetischen Kraftlinien, die ein geradliniges Stück eines Stromleiters erzeugt, müssen daher konzentrische Kreise sein, deren Mittelpunkte in den Stromleiter fallen (Abb. 69).

Für die magnetische Feldstärke, die ein *kreisförmiger* Strom von dem Halbmesser a im Kreiszentrum hervorruft, folgt aus dem Biot-Savartschen Gesetz (da $\Theta = 90^\circ$ ist)

$$H = \gamma J \frac{2\pi}{a}.$$

Setzt man in dieser Beziehung den Proportionalitätsfaktor $\gamma = 1$, so erhält man durch Messung der Feldstärke, also der Kraft auf einen Einheitspol, die Stromstärke J im sogenannten *elektromagnetischen Maß*. Die Einheit der Stromstärke in diesem Maß ist somit durch einen Strom dargestellt, der bei dem Durchfließen eines kreisförmigen Leiters von dem Radius von 2π cm auf einen im Mittelpunkt befindlichen Pol von der Stärke 1 eine Kraft von

1 Dyn ausübt. Der zehnte Teil der so definierten elektromagnetischen Stromstärkeeinheit ist das sogenannte *Ampere* (A), die übliche technische Einheit. Ihr tausendster Teil heißt Milliampere (mA), der millionte Teil eines A wird Mikroampere (μ A) genannt.

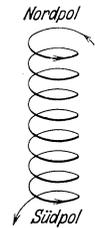


Abb. 70. Die Stromspule.

§ 149. Die Stromspule. Ein jeder geschlossener Strom erweist sich hinsichtlich des von ihm erzeugten Magnetfeldes einem Magneten äquivalent, dessen Moment gleich ist dem Produkt aus der elektromagnetisch gemessenen Stromstärke und der von dem Leiter

umschlossenen Fläche. Im Falle einer Stromspirale oder *Stromspule* ist überdies noch mit der Zahl der Windungen zu multiplizieren. In der Tat verhält sich eine Stromspule (auch Solenoid genannt) ganz wie ein Magnet. Sie stellt sich daher auch, wenn sie frei aufgehängt wird, in die Süd—Nord-Richtung ein; dabei weist nach Norden dasjenige Spulenende, von dem aus gesehen der Uhrzeiger entgegengesetzt dem Uhrzeiger kreist (Abb. 70).

Im Innern einer Stromspule verlaufen die magnetischen Kraftlinien nahezu parallel und senkrecht zu der Ebene der Windungen. Die magnetische Feldstärke ergibt sich dabei zu 4π mal der elektromagnetisch gemessenen Stromstärke, noch multipliziert mit der Anzahl der auf 1 cm entfallenden Windungen der Spule. *Elektromagnete* von starker Wirkung erhält man, indem man Eisenzylinder mit einer Stromspule umgibt.

Wie schon 1820 Ampère entdeckte, besteht zwischen parallelen Strömen eine anziehende oder abstoßende Kraft, je nachdem, ob

sie gleich oder entgegengesetzt gerichtet sind. In einem Magnetfelde werden bewegliche Stromleiter abgelenkt.

§ 150. Der Konvektionsstrom. Daß ein genügend rasch bewegter, elektrisch geladener Körper ähnliche Wirkungen wie ein in einem Leitungsdraht fließender Strom hervorruft, vermochte experimentell zuerst 1876 Rowland zu zeigen. Er versetzte eine mit geladenen Stanniolspektoren belegte Glasscheibe in rasche Rotation und konnte nicht nur eine in der Nähe befindliche Magnetnadel ablenken, sondern auch feststellen, daß sich der Sinn der Ablenkung umkehrte, wenn entweder der Umdrehungssinn der Scheibe oder das Vorzeichen ihrer elektrischen Ladung gewechselt wurde. Sogenannte *Konvektionsströme*, die auf einem mechanischen Transport elektrisch geladener Körper beruhen, verhalten sich also hinsichtlich der magnetischen Wirkung wie Leitungsströme.

§ 151. Das Experiment von Weber und Kohlrausch. Da man schon früh annahm, daß der elektrische Strom eine Fortbewegung elektrischer Ladungen darstellt, so ergab sich ein fundamentales Problem in der Frage, wie groß in elektrostatischen Einheiten die Elektrizitätsmenge sei, die den Querschnitt eines Stromes von der elektromagnetischen Stromstärkeeinheit in einer Sekunde passiert. Die Lösung dieses Problems ist zuerst Weber und Kohlrausch im Jahre 1856 gelungen. Sie maßen zunächst mittels eines Elektrometers die gesamte Elektrizitätsmenge Q , die einer Leidener Flasche anhaftete, entluden dann die Flasche und maßen durch ein besonders konstruiertes Instrument (sogenanntes ballistisches Galvanometer) die Größe $\Sigma J \Delta t$; dabei bedeutet Δt ein Zeitelement und J die während dieses Zeitintervalls vorhandene Stromstärke im elektromagnetischen Maß, wobei die Summierung über die ganze Zeit der Entladung zu erstrecken ist. Der Quotient aus Q und der Summe stellt die gesuchte Zahl elektrostatischer Einheiten pro Stromstärkeneinheit und Sekunde dar.

Weber und Kohlrausch fanden hierfür den Wert $3 \cdot 10^{10}$; aus einfachen Dimensionsbetrachtungen ergibt sich aber, daß diese Größe die Dimension einer Geschwindigkeit haben muß. So fanden Weber und Kohlrausch, daß ein Strom der elektromagnetischen Stromstärkeneinheit pro Sekunde soviel elektrostatische Einheiten transportiert, als der Wert der *Lichtgeschwin-*

digkeit in Zentimetern pro Sekunde beträgt. Die bisher genauesten Messungen (von Rosa) lieferten für die Webersche Konstante die Zahl $2,99710 \cdot 10^{10}$, während, wie schon erwähnt, für den genauen Wert der Lichtgeschwindigkeit $2,99796 \cdot 10^{10}$ gefunden wurde. Die Übereinstimmung ist also innerhalb der geringen Fehlergrenzen vollkommen.

Da 1 Ampere dem zehnten Teil der elektromagnetischen Stromstärkeneinheit gleich ist und 1 Coulomb definitionsgemäß gleich ist $3 \cdot 10^9$ elektrostatischen Einheiten, stellt also 1 Coulomb diejenige Ladung dar, die bei einer Stromstärke von 1 Ampere in der Sekunde durch den Leiterquerschnitt hindurchgeht.

§ 152. Die Stromleistung. Die Arbeit, die in der Sekunde ein Strom von 1 Ampere entlang einem Leiter verrichtet, zwischen dessen Enden eine Potentialdifferenz oder, wie man sagt, *elektromotorische Kraft* von 1 Volt besteht, stellt die elektrotechnische Einheit der *Leistung* dar und wird als *Watt* (W) bezeichnet. Da bei dem Transport einer elektrostatischen Einheit durch eine der absoluten Einheit gleiche Potentialdifferenz eine Arbeit von 1 Erg verrichtet wird und ein Volt der 300. Teil der absoluten Einheit ist, ist 1 Watt gleich 10^7 Erg pro Sekunde. Allgemein ist die Stromleistung in Watt durch das Produkt von Voltzahl und Amperezahl gegeben. Wenn der Strom keine sonstige Arbeit verrichtet, verwandelt sich diese Arbeit in sogenannte *Joulesche Wärme*.

Eine Pferdestärke entspricht 735 Watt. Eine in der Elektrotechnik viel benutzte Einheit der Arbeit ist die *Kilowattstunde* (kWh), nämlich diejenige Arbeit, die ein Strom von 1 Watt in 1000 Stunden leistet.

§ 153. Der elektrische Widerstand. Wie 1827 Ohm entdeckte, stellt der Quotient aus der Spannung, die entlang einem Stromleiter herrscht, und aus der Stromstärke eine den Leiter in elektrischer Hinsicht charakterisierende und meßbare Eigenschaft dar, die der *Widerstand* des Stromleiters genannt wird. Als technische Einheit des Widerstandes gilt das „*Ohm*“ (Ω), nämlich der Widerstand eines Leiters, in dem eine elektromotorische Kraft von 1 Volt einen Strom von 1 Ampere hervorruft.

Der Widerstand eines Drahtes ist seiner Länge direkt und seinem Querschnitt umgekehrt proportional. Der Widerstand eines Materials von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt wird der

spezifische Widerstand der betreffenden Substanz genannt. Für Quecksilber ist er nur wenig von 1Ω verschieden (genau gleich $0,96 \Omega$). Besonders gering ist der spezifische Widerstand, besonders groß also das Leitvermögen bei Silber und Kupfer, woraus sich die Verwendung des verhältnismäßig billigen Kupfers für Leitungsdrähte erklärt.

Wie schon Wiedemann und Franz um 1860 entdeckten, ist die elektrische Leitfähigkeit der Metalle ihrer Wärmeleitfähigkeit angenähert proportional. Der spezifische Widerstand steigt mit der Temperatur. Man kann diese Abhängigkeit, die besonders regelmäßig bei Platin ist, zu äußerst präzisen *Temperaturmessungen* benutzen. Auf elektrischem Wege können derart noch Temperaturunterschiede von einem Hunderttausendstelgrad bestimmt werden. Für die Technik sind Legierungen von Wichtigkeit, deren Widerstand praktisch von der Temperatur unabhängig ist; hierzu gehört z. B. die als *Konstantan* bezeichnete Legierung von 60% Kupfer und 40% Nickel.

Bei extrem tiefen Temperaturen von nur wenigen Graden über dem absoluten Nullpunkt zeigt sich bei vielen Metallen das merkwürdige, 1911 von Kamerlingh Onnes entdeckte Phänomen der *Supraleitung*; bei einer bestimmten, für das Metall charakteristischen Temperatur (bei Blei z. B. bei $7,2^{\circ}$ abs.) verliert sprunghaft das Metall völlig seinen Widerstand.

Selen hat die technisch wichtige Eigentümlichkeit, daß Beleuchtung seinen Widerstand wesentlich herabsetzt.

§ 154. Die Stromverzweigung. Enthält ein Stromkreis mehrere Widerstände hintereinander, so addieren sich diese. Ebenso addieren sich die elektromotorischen Kräfte von Stromquellen, wenn deren mehrere in dem Stromkreis, hintereinander geschaltet, vereinigt sind.

Für den Fall einer *Stromverzweigung* gelten die beiden folgenden, von Kirchhoff 1847 aufgefundenen Gesetze: 1. Die Summe der Stromstärken der Zweigströme ist gleich der Stromstärke des unverzweigten Stromes; 2. in jedem Zweige ist die Potentialdifferenz zwischen den beiden Verzweigungsstellen gleich dem Produkt aus der Stärke des Teilstromes und dem Widerstand des Zweiges.

Bezeichnen wir also die Potentialdifferenz mit V und die Stärken des unverzweigten Stromes und der Teilströme mit J ,

J_1, J_2 usw. und die Teilwiderstände mit R_1, R_2 usw. (Abb. 71), so ist

$$V = J_1 R_1 = J_2 R_2 = \text{usw.},$$

und somit wird

$$J_1 = \frac{V}{R_1}, \quad J_2 = \frac{V}{R_2}, \quad \text{usw.}$$

Andererseits ist nach dem ersten Kirchhoffschen Satze

$$J = J_1 + J_2 + \dots,$$

also

$$J = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \right).$$

Definieren wir im Sinne des Ohmschen Gesetzes den Gesamtwiderstand R durch die Beziehung

$$\frac{V}{R} = J_1 + J_2 + \dots,$$

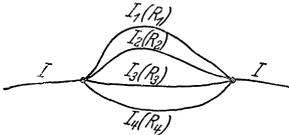


Abb. 71. Stromverzweigung.

so wird also

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

Da der reziproke Widerstand das *Leitvermögen* darstellt, können wir auch sagen, daß das gesamte Leitvermögen der *Summe* der Leitvermögen der *parallel geschalteten* Zweige gleich ist.

Schaltet man eine Anzahl von Stromquellen, von galvanischen Elementen, *hintereinander* oder, wie man sagt, *in Serie*, so addieren sich die elektromotorischen Kräfte und ebenso die Widerstände. Bezeichnen wir die elektromotorische Kraft eines einzelnen unter n hintereinander geschalteten Elementen mit E und den *inneren Widerstand* eines Elementes mit R_i , und schließen wir zu einem Stromkreis mit dem äußeren Widerstand R_a , so ist bei Serienschaltung die Stromstärke

$$J = \frac{nE}{nR_i + R_a}.$$

Ist der äußere Widerstand klein gegen die Summe der inneren Widerstände, so wird daher

$$J = \frac{E}{R_i};$$

man erzielt in diesem Falle keinen stärkeren Strom als bei der Verwendung eines einzelnen Elementes. Ist hingegen der äußere Widerstand groß gegen nR_i , so wird

$$J = n \frac{E}{R_a},$$

also n -mal so groß wie bei der Anwendung eines einzelnen Elementes.

Parallelschaltung der Elemente (wobei die positiven Pole untereinander verbunden werden und ebenso die negativen) ist wiederum bei kleinem äußeren Widerstand zweckmäßig. Es wird dann nach dem Kirchhoffschen Gesetze, wenn wir mit R_i^* den resultierenden inneren Widerstand bezeichnen,

$$\frac{1}{R_i^*} = n \frac{1}{R_i}$$

oder

$$R_i^* = \frac{R_i}{n}$$

und das Ohmsche Gesetz liefert somit die Beziehung

$$J = \frac{E}{\frac{W_i}{n} + R_a}$$

oder, wenn der äußere Widerstand so klein ist, daß er neben $\frac{R_i}{n}$ vernachlässigt werden kann,

$$J = n \frac{E}{R_i}.$$

Bei geringem äußeren Widerstand ergibt also die Parallelschaltung die n -fache Stromstärke. Parallelschaltung empfiehlt sich demnach bei geringem, Serienschaltung hingegen bei großem äußeren Widerstand.

Auf dem Prinzip der Stromverzweigung beruht auch die *Wheatstonesche Brücke*, die zur Messung von Widerständen dient. Von einem homogenen Meßdraht AB (Abb. 72), der zweck-

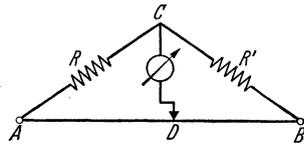


Abb. 72. Wheatstonesche Brücke.

mäßig auf einem Zylinder aufgewunden ist, zweigt eine Parallelschaltung ACB ab; diese Nebenleitung enthält einen bekannten Widerstand R und einen zu messenden Widerstand R' . Zwischen R und R' geht von einem Punkt C ein Draht über ein Galvanometer zu einem auf dem Meßdraht verschiebbaren Kontakt D . Dieser Kontakt wird solange verschoben, bis der Zweig CD , was man am Galvanometer erkennt, *stromlos* wird. Das bedeutet, daß dann in

C und D das gleiche Potential herrscht. Bezeichnen wir den Strom im Meßdraht mit J und denjenigen im Zweige ACB mit J' , und ferner die Längen AD und DB mit l_1 und l_2 und den Widerstand der Längeneinheit des Meßdrahtes mit w , so muß wegen der Gleichheit der Potentiale in C und D

$$R J' = w l_1 J$$

sein und ebenso

$$R' J' = w l_2 J.$$

Hieraus folgt

$$R' = R \frac{l_2}{l_1},$$

so daß durch Feststellung des Verhältnisses $\frac{l_2}{l_1}$ aus dem bekannten Widerstand R der unbekannte R' ermittelt werden kann.

§ 155. Das Galvanometer. Die Tatsache, daß die von einem Strom auf eine Magnetnadel ausgeübte ablenkende Kraft der Stromstärke proportional ist, wird in den *Galvanometern* zur Messung der *Stromstärke* verwertet. Der Strom, dessen Intensität bestimmt werden soll, wird in dem sogenannten *Multiplikator* in vielen, untereinander gut isolierten Windungen um die Magnetnadel herumgeführt, wobei sich die Wirkungen der einzelnen Windungen addieren.

Der Einfluß des Erdmagnetismus wird so sehr wie möglich geschwächt, und zwar einerseits durch Aufstellung eines regulierbaren, dem erdmagnetischen Felde entgegenwirkenden „Asta-sierungsmagneten“, andererseits durch Benutzung starr verbundener, entgegengesetzt gerichteter, aber tunlichst gleich starker Magnetnadeln, sogenannter *astatischer Nadelpaare*, die eine unvergleichlich höhere Ausschlagsempfindlichkeit aufweisen, namentlich dann, wenn die Nadeln selbst wieder in kleinere aufgelöst sind. Die Nadelvorrichtung hängt an einem sehr dünnen Quarzfaden, durch dessen Torsion ein kleiner Spiegel mitgedreht wird, der der Ablesung der Ablenkung dient.

Die Galvanometer der beschriebenen Art sind wohl sehr empfindlich und gestatten Messungen bis zu etwa $\frac{1}{10} \mu A$, doch sind sie leicht durch magnetische Störungen beeinflussbar, wie sie in Großstädten unvermeidlich sind. Aus diesem Grunde werden im allgemeinen *Drehspulengalvanometer* bevorzugt, bei

denen eine drehbar aufgehängte Spule, durch die der zu messende Strom geleitet wird, zwischen den Polen eines starken Magneten schwebt.

Zum Nachweis und zur Messung rascher Stromänderungen bedient man sich gewöhnlich des *Saitengalvanometers*. Bei diesem wird der zu bestimmende Strom durch einen Faden von einigen Tausendstelmmillimetern Durchmesser quer durch das horizontale Feld eines starken Magneten geleitet. Die abstoßende Kraft, die der Magnet auf den Stromleiter (die sogenannte Saite) ausübt, ruft eine seitliche Ausbiegung hervor, die durch den durchbohrten Magneten hindurch mikroskopisch beobachtet und mittels eines Spiegels projiziert wird.

Um mittels eines für schwache Ströme berechneten Galvanometers auch stärkere Ströme messen zu können, bedient man sich eines *Nebenschlusses*. Ist R der Widerstand des eigentlichen Stromkreises zwischen den beiden Stellen, von denen aus die Abzweigung erfolgt, und R' der Widerstand der Abzweigung und J die eigentliche Stromstärke, so zeigt das Galvanometer eine Stromstärke J' an, die durch die Beziehung bestimmt ist,

$$(J - J') : J' = R' : R.$$

Will man also z. B. den 100. Teil der Stromstärke im Galvanometer haben, so muß R' 99mal so groß wie R gewählt werden.

Da bei genügend großem Widerstand die Stärke des Nebensstromes neben derjenigen des Hauptstromes vernachlässigbar ist, so kann ein mit entsprechender Skala versehenes Galvanometer von bekanntem großem Widerstand im Nebenschluß auch als Spannungsmesser oder „*Voltmeter*“ dienen.

Zur Erzeugung einer gewünschten Stromstärke in einem Stromkreis schaltet man in diesen *Regulierwiderstände* (z. B. Glühlampen in größerer Zahl) ein. Zur Messung und Vergleichung von Widerständen bedient man sich verschiedener Formen sogenannter *Rheostaten*, die es wie ein Gewichtssatz gestatten, jede beliebige Anzahl von ganzen oder Zehntel-Ohmen zusammenzusetzen.

§ 156. Glühlampe und Bogenlicht. Die Erscheinung der Stromwärme findet eine ungemein wichtige, praktische Verwertung in der elektrischen Beleuchtungstechnik. Die von Edison 1879 erfundene elektrische *Glühlampe* bestand in ihrer ursprünglichen Form aus einer luftleer gemachten Glasbirne, in der dünne Kohlen-

fäden durch zugeleiteten elektrischen Strom infolge ihres hohen Widerstandes zur Weißglut gebracht wurden. Gegenwärtig werden statt der Kohlenfäden ausschließlich Fäden aus *Wolfram*, als dem Metall mit dem höchsten Schmelzpunkt (3300°), verwendet. Während mit der Kohlenfadenlampe keine höhere Temperatur als 1600 bis 1700° erzielt werden konnte, weil sonst zu starke Zerstäubung eintritt, wird in den Wolframlampen eine Temperatur von 2100° benutzt; in Lampen, die mit einem Gas gefüllt sind, das mit Wolfram keine chemische Verbindung eingeht, kann die Temperatur sogar bis zu 2400° gesteigert werden.

Bei den Kohlenfadenlampen betrug der Stromverbrauch 3 Watt pro Kerze; bei den Wolframlampen stellt er sich nur auf etwa 1 bis 1,3 Watt, bei starken gasgefüllten Lampen auf etwa $\frac{1}{2}$ Watt. Um dem Draht einen möglichst großen Widerstand zu geben, macht man ihn sehr dünn (etwa $\frac{1}{1000}$ mm Durchmesser), aber auch recht lang, indem man ihn zickzackförmig oder in vielen Windungen als enge Spirale führt.

Die *Bogenlampen*, deren Verwendung in letzter Zeit sehr zurückgegangen ist, beruhen auf der bereits 1810 von Davy entdeckten Erscheinung des elektrischen Lichtbogens. Ein solcher tritt zwischen zwei einander berührenden Kohlenstiften dann auf, wenn sie nach Anlegung einer Spannung von etwa 50 Volt ein wenig auseinandergezogen werden; die Temperatur erreicht etwa 3500° . Noch stärkere Lichtbogen erhält man zwischen Metallen oder zwischen Metall und Kohle, wie bei der *Quecksilberlampe*, die durch besonderen Reichtum an Ultraviolettstrahlen ausgezeichnet ist und die nur $\frac{1}{5}$ Watt pro Kerze verbraucht.

§ 157. Die Telegraphie. Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes fanden schon früh eine praktische Anwendung in dem *elektromagnetischen Telegraphen*. Er wurde 1833 von Gauß und Weber erfunden, erhielt aber eine für die allgemeine Verbreitung brauchbare Form erst einige Jahre später durch den Amerikaner Morse. Schematisch ist das Prinzip des Morseschen Telegraphen in der Abb. 73 wiedergegeben. Wenn in der Sendestation (rechts) zum Zwecke der Zeichengebung der Taster niedergedrückt wird, so geht der Strom von der Batterie der Sendestation (*B*) durch die Leitung zu dem ruhenden Taster der Empfangsstation und von diesem durch den Elektromagneten (*M'*)

zu der Bodenplatte der Empfangsstation und von dort durch *Erdleitung* zu der Bodenplatte der Aufgabestation.

Der Elektromagnet zieht, wenn durch ihn der Strom fließt, einen kleinen Hebel an und drückt dadurch ein mit Farbe behaftetes Rädchen gegen einen durch ein Uhrwerk vorbeigeführten Papierstreifen, auf dem derart je nach der Dauer des Niederdrückens der Taste Punkte und Striche entstehen, aus denen Morse das Alphabet zusammensetzte. Beide Stationen können, da sie ganz gleich ausgerüstet sind, sowohl senden als auch empfangen.

Einen wesentlichen Fortschritt bedeutete für die Telegraphie die Erfindung des *Relais* durch Wheatstone (1839). Es ist dies ein Elektromagnet mit leicht beweglichem Anker, der durch

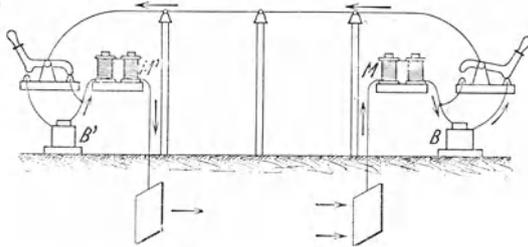


Abb. 73. Schema des Telegraphen.

Hebelwirkung den Stromkreis einer Lokalbatterie zu schließen vermag. Die Windungen des Relais werden von dem Strom der Telegraphenlinie durchflossen, hingegen speist erst der Strom der lokalen Batterie den Elektromagneten, der den Schreibapparat betätigt. Bei der Telegraphie auf weite Entfernungen werden auch Zwischenrelaisstationen eingeschaltet, die auf demselben Prinzip beruhen.

Die wichtigsten Fortschritte in der Entwicklung der Telegraphie waren die Erfindungen des Typendruckapparates, der Maschinentelegraphie, der Mehrfachtelegraphie und schließlich in neuester Zeit die Erfindung des Fernschreibers. In der Unterseekablen Telegraphie müssen besondere, außerordentlich empfindliche Empfangsapparate verwendet werden. Der stromleitende Teil der Unterseekabel wird neuestens mit einer magnetischen Substanz umgeben, wodurch der Nachteil der großen elektrostatischen Kapazität der Kabel vermindert wird.

§ 158. **Die galvanischen Elemente.** Die elektromotorische Kraft eines Voltaschen Elementes vermindert sich allmählich, wenn dem Element Strom entnommen wird; es entwickelt sich nämlich an dessen Austrittsstelle Wasserstoff, der die Kupferplatte überzieht und dadurch die elektromotorische Kraft beeinträchtigt. Das älteste „*konstante*“ Element, bei dem diese Erscheinung sogenannter Polarisierung vermieden wird, stammt von Daniell. Es enthält einen Kupferzylinder in einer gesättigten Lösung von Kupfersulfat und einen konzentrischen Zinkzylinder in verdünnter Schwefelsäure. Beide Metallzylinder sind durch eine poröse Tonwand, ein sogenanntes Diaphragma, getrennt, durch das zwar keine Flüssigkeit, wohl aber die Träger des elektrischen Stromes hindurchgehen. Bei diesem Element wird an der Kupferplatte nicht Wasserstoff, sondern Kupfer abgeschieden.

Das ebenfalls konstante Element von Leclanché besteht aus einem Zinkstab, der in eine gesättigte Salmiaklösung eingetaucht ist, und einem Kohlenstab, der von gepulvertem Braunstein (MnO_2) umgeben ist. In diesem Element wird der gebildete Wasserstoff von dem Braunstein zu Wasser oxydiert. Ähnlich wirken die sehr verbreiteten *Trockenelemente*. Bei ihnen ist die Flüssigkeit (meist Salmiak) von einer geeigneten Füllmasse aufgesaugt; die eine Elektrode wird von Kohle, die andere von dem Zinkbecher des Trockenelementes gebildet.

Zur Eichung elektrischer Meßinstrumente benutzt man sogenannte *Normalelemente*, deren Klemmenspannung genau bekannt und von äußeren Umständen, vor allem von der Temperatur, praktisch unabhängig ist. Als Normalelement wird jetzt ziemlich allgemein das *Weston-Element* benutzt; seine Hauptbestandteile sind Quecksilber, Kadmiumamalgam und eine gesättigte Lösung von Kadmiumsulfat, und seine Klemmenspannung beträgt 1,0183 Volt.

Wie im wesentlichen schon Volta entdeckte, lassen sich die Metalle derart in eine sogenannte *Spannungsreihe* ordnen, daß jedes Metall bei Berührung mit einem ihm in der Reihe folgenden positiv, mit einem ihm vorangehenden hingegen negativ elektrisch wird. Volta stellte die Reihe folgendermaßen auf: Zn, Pb, Sn, Fe, Cu, Ag, Au, C.

§ 159. **Der Akkumulator.** Das für die industrielle Praxis weit- aus wichtigste galvanische Element ist der *Akkumulator* geworden.

Er besteht aus zwei, in reine Schwefelsäure getauchten *Bleiplatten*, die zunächst durch einen von außen her hindurchgesandten elektrischen Strom „geladen“ werden müssen. Dann überzieht sich nämlich die eine Platte mit Bleisuperoxyd, während an der anderen Wasserstoff ausgeschieden wird, der umgekehrt imstande ist, Bleisuperoxyd zu reinem Blei zu reduzieren. In diesem Zustand, mit dem Bleisuperoxyd als positivem und dem metallischen Blei als negativem Pol, kann dann der vorher geladene Akkumulator seinerseits als galvanisches Element dienen. Gibt er Strom ab, so bedecken sich beide Platten allmählich mit schwefelsaurem Blei, so lange, bis bei vollständiger Bedeckung der Akkumulator als entladen anzusehen ist und neu geladen werden muß. Zu der Aufladung ist eine Spannung von 2,6 Volt erforderlich; im Betrieb hat ein Akkumulator eine Spannung von ziemlich genau 2 Volt, die aber allmählich auf 1,8 Volt sinkt, worauf neue Ladung erforderlich wird. Akkumulatoren können auch zu Batterien verwendet werden, wodurch man Hochspannungen bis zu rund 10000 Volt erzielen kann.

§ 160. Das Thermoelement. Wenn verschiedene, zusammengelötete Metalle einen Stromkreis bilden, so tritt, wie 1821 Seebeck entdeckte, bei *Temperaturdifferenzen* an den *Lötstellen* ein elektrischer Strom auf. Am stärksten ist diese sogenannte *thermoelektrische* Wirkung zwischen Wismut und Antimon. Die erzeugte elektromotorische Kraft ist im allgemeinen der Temperaturdifferenz proportional, beträgt aber pro Grad nur ungefähr 10^{-5} Volt. Die Umkehrung des von Seebeck aufgefundenen Effektes wurde 1834 von Peltier entdeckt; er stellte fest, daß in einem aus zwei Metallen gebildeten Kreis bei dem Fließen eines Stromes Temperaturdifferenzen zwischen den Lötstellen auftreten.

Thermoelemente, die auf dem Seebeck-Effekt beruhen, haben zwar nicht als Stromquellen, wohl aber für *Temperaturmessungen* Bedeutung, insbesondere für solche Temperaturbereiche, für die das Quecksilberthermometer nicht anwendbar ist. Für sehr hohe Temperaturen werden vorwiegend Platin-Platinrhodium-Elemente benutzt, für tiefe Temperaturen Elemente aus Kupfer und Konstantan und für allertiefste Temperaturen Gold-Silber-Elemente.

Mittels der Thermoelemente sind auf galvanometrischem Wege auch außerordentlich feine Messungen der Wärmestrahlung möglich. Auf diesem Wege konnte z. B. die Strahlung einzelner, mit

freiem Auge gar nicht mehr sichtbarer Fixsterne gemessen werden, was dem Nachweis der Strahlung einer Kerzenflamme in rund 100 km Entfernung entsprechen würde.

§ 161. Die elektrochemischen Grundgesetze von Faraday. Daß eine Flüssigkeit, die einen elektrischen Strom leitet, dabei eine chemische Zersetzung, eine sogenannte *Elektrolyse*, erfährt, hat im wesentlichen bereits Carlisle um 1800 festgestellt. Die quantitativen Gesetzmäßigkeiten der Elektrolyse wurden 1833 von Faraday entdeckt.

Wie Faraday fand, hängt die in einer bestimmten Zeit elektrolitisch ausgeschiedene Menge eines bestimmten Stoffes einzig und allein von der *Elektrizitätsmenge* ab, die in dieser Zeit durch die Flüssigkeit hindurchgegangen ist; sie ist also der Zeit und der Stromstärke proportional. Andererseits sind, wie Faraday weiter fand, die Mengen, die von einem Strom von bestimmter Stärke aus *verschiedenen* Elektrolyten abgeschieden werden, „*chemisch äquivalent*“, d. h. sie verhalten sich wie die Quotienten aus Atomgewicht und chemischer Wertigkeit. Ein Strom, der in der Zeiteinheit 1,008 g des einwertigen Wasserstoffes absondert, scheidet daher in derselben Zeit 8 g des zweiwertigen Sauerstoffes vom Atomgewicht 16 ab und so fort.

Die Faradayschen Grundgesetze finden eine sehr einfache Erklärung durch die Annahme, daß in einem Elektrolyten die Molekeln ganz oder zum Teil in entgegengesetzt elektrisch geladene Bestandteile, in sogenannte *Ionen*, gespalten oder, wie man sagt, *dissoziiert* sind und daß der Leitungsstrom im Elektrolyten auf einem Transport solcher Ionen beruht. Die positiven Ionen wandern nach dieser, im wesentlichen von Hittorf ausgebildeten Auffassung in der Richtung des Stromes zu dessen Austrittsstelle, der sogenannten *Kathode*, während die negativen Ionen in der entgegengesetzten Richtung, zur Eintrittsstelle des Stromes, zur sogenannten *Anode* gehen.

Macht man nun in naheliegender Weise die Annahme, daß jedem einwertigen Ion eines beliebigen Stoffes stets die genau gleiche Ladung anhafte, jedem zweiwertigen und dreiwertigen Ion aber die doppelte und dreifache Ladung, so ergeben sich ohne weiteres die Faradayschen Gesetze.

Als eine wichtige Konstante, die man gewöhnlich die *Faradaysche Konstante* nennt, erscheint demnach diejenige Elektrizitäts-

menge, die bei der Ausscheidung eines Grammatoms eines einwertigen Stoffes transportiert wird. Sie ergibt sich zu 96494 Coulomb, also, wie man durch Multiplikation mit $3 \cdot 10^9$ (nach § 136) findet, zu

$$F = 2,893 \cdot 10^{14} \text{ elektrost. Einh.}$$

Das Faradaysche Gesetz wird zur gesetzlichen Definition des Ampere benutzt; dieses ist nämlich als diejenige Stromstärke festgelegt, die in einer Sekunde 1,118 mg Silber ausscheidet. Apparate, die der elektrochemischen Stromstärkemessung dienen, heißen *Voltmeter*. In ihnen bringt man entweder Silber oder Kupfer zur Ausscheidung und mißt die Stromstärke durch die Gewichtszunahme der Kathode.

§ 162. Das elektrische Elementarquantum. Dividiert man die Faradaysche Konstante durch die Loschmidtsche Zahl (§ 79), so muß man die Ladung erhalten, die einem einzelnen ionisierten Atom eines einwertigen Grundstoffes anhaftet und die allgemein als *elektrisches Elementarquantum* oder als Fundamentalladung bezeichnet wird. Man findet hierfür unter Benutzung des schon früher angegebenen Wertes der Loschmidtschen Zahl ($6,06 \cdot 10^{23}$):

$$e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ elektrost. Einh.}$$

Bei der Elektrolyse spielt also das Elementarquantum gewissermaßen die Rolle eines Atoms der Elektrizität. Wenn ihm nun diese Rolle ganz allgemein zukommt, so müssen die kleinsten, in der Natur möglichen elektrischen Ladungen untereinander in einfachen ganzzahligen Verhältnissen stehen; denn sie können ja doch nur gleich sein e oder $2e$ oder $3e$ usw., während dazwischenliegende Werte ausgeschlossen wären. Daß dies tatsächlich der Fall ist, geht aus den Versuchen von Millikan (seit 1909) hervor.

Bei diesen Versuchen, die auf einem gleichzeitig auch von Ehrenhaft aufgefundenen Prinzip beruhen, werden winzige Öltröpfchen durch einen Zerstäuber in der Form eines feinen Sprühregens erzeugt. Infolge der bei dem Zerstäuben auftretenden Reibung tragen die Tröpfchen stets ganz schwache elektrische Ladungen. Auf die Tröpfchen läßt man nun ein elektrisches Feld einwirken, das sie aufwärts treibt. Ein einzelnes Öltröpfchen, das einen Durchmesser von etwa 10^{-4} cm hat und dessen Bewegung mittels eines Mikroskops beobachtet wird, steht dann unter dem zweifachen Einfluß des elektrischen Feldes und der eigenen

Schwere. Überwiegt die Kraft des Feldes, so bewegt sich das Tröpfchen aufwärts; wird das Feld ausgeschaltet, so sinkt das Tröpfchen. Wegen des kleinen Durchmessers ist der Reibungswiderstand der Luft so groß, daß die Bewegungen der Tröpfchen mit konstanter, sehr geringer Geschwindigkeit vor sich gehen und derart ein einzelnes Tröpfchen stundenlang in seiner Auf- und Abbewegung verfolgt werden kann.

Auf Grund des Stokes'schen Fallgesetzes (s. § 35) kann somit das Gewicht eines Öltröpfchens berechnet werden. Indem man die Geschwindigkeiten bei der Aufwärts- und Abwärtsbewegung miteinander vergleicht, ergibt sich aber aus dem Gewicht die aufwärts wirkende elektrische Kraft und hieraus bei bekanntem Felde die Ladung des Tröpfchens. Millikans Messungen haben in der Tat gezeigt, daß diese Ladungen *ganzzahlige* Vielfache einer Elementarladung von $4,8 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten sind.

§ 163. Die Elektrizitätsleitung in Gasen. In ihrem gewöhnlichen Zustand sind *Gase* und Dämpfe nahezu vollkommene Isolatoren; doch können sie eine beträchtliche elektrische *Leitfähigkeit* durch äußere Ursachen erlangen, vor allem durch die Einwirkung von ultraviolettem Licht oder Röntgenstrahlen, durch die Nähe radioaktiver Substanzen oder glühender Körper sowie durch starke Temperatursteigerungen. Wird an ein Gas, das auf solche Art leitfähig geworden ist, mittels zweier Elektroden eine elektrische Spannung gelegt, so tritt in dem Gas ein sogenannter *unselbständiger Strom* ein. Er gehorcht dem Ohmschen Gesetz nur bis zu einem bestimmten Spannungsbereich. Oberhalb dieses Bereiches wächst die Stromstärke mit zunehmender Spannung langsamer als diese und erreicht dann einen Grenzwert, so daß eine weitere Erhöhung der Spannung ohne Einfluß auf diesen sogenannten *Sättigungsstrom* bleibt.

Die Elektrizitätsleitung in Gasen wird auf das Auftreten von *Gasionen* zurückgeführt, die sich unter den erwähnten äußeren Einwirkungen bilden. Da andererseits die erzeugten, entgegengesetzt geladenen Ionen nach *Wiedervereinigung* und wechselseitiger Neutralisierung streben, so tritt in dem Gase, das dem Einfluß eines „Ionisators“ ausgesetzt ist, ein Gleichgewichtszustand ein; es entstehen in jedem Zeitintervall ebensoviel neue Ionenpaare, als durch Wiedervereinigung verschwinden. Nach

Aufhören der ionisierenden Wirkung verschwindet darum auch rasch die Leitfähigkeit des Gases. Im Gleichgewichtszustand ist die Zahl der pro Sekunde in 1 ccm gebildeten Ionen, wie sich leicht ableiten läßt, dem Quadrate der Anzahl der in einem Kubikzentimeter vorhandenen Ionen proportional.

Die erwähnten Abweichungen von dem Ohmschen Gesetz erklären sich nun einfach dadurch, daß mit wachsender Stromstärke immer mehr Ionen außer durch Wiedervereinigung auch dadurch verlorengehen, daß sie an den Elektroden ausgeschieden werden. Dadurch tritt „Verarmung“ an Ionen und Erhöhung des elektrischen Widerstandes ein. Der Grenzfall des Sättigungsstromes wird erreicht, wenn nahezu alle im Gas erzeugten Ionen, ohne daß es zu nennenswerter Wiedervereinigung kommt, dem Elektrizitätstransport dienen.

§ 164. Die selbständige Gasentladung. Auch im gewöhnlichen Zustand enthält jedes Gas Ionen, wenn auch freilich in einem noch viel geringeren Bruchteil als bei den unselbständigen Strömen. Unter dem Einfluß einer sehr hohen Feldstärke, von einigen zehntausend Volt pro Zentimeter, erlangen diese „natürlichen“ Ionen eine so beträchtliche kinetische Energie, daß sie bei ihren Zusammenstößen mit den Molekeln des Gases diese zu ionisieren vermögen. Die im Wege solcher *Stoßionisation* erzeugten Ionen werden nun durch das Feld ebenfalls auf große Geschwindigkeit gebracht, sie wirken derart auch ihrerseits ionisierend, und dieser Vorgang wiederholt sich weiter, so daß das Feld im Wege einer sogenannten *selbständigen Entladung* eine beträchtliche Stromstärke hervorruft. Diese kann so groß werden, daß das Elektrodenmaterial zu glühen beginnt, in welchem Falle man von einer *Glimmentladung* spricht.

§ 165. Die Entladungserscheinungen in verdünnten Gasen. Besonders deutlich wird die Glimmentladung in Röhren, die verdünnte Luft oder verdünnte Gase enthalten, und die nach einem ihrer ersten Hersteller vielfach als *Geißlersche Röhren* bezeichnet werden. In verdünnter Luft ist über die Oberfläche der Kathode die sogenannte erste, rötlichgelb leuchtende Kathodenschicht gelagert; hieran schließt sich der sogenannte Crookesche Dunkelraum. Auf ihn folgt das „negative Glimmlicht“, das eine blaue Farbe aufweist und gegen die Kathode scharf begrenzt ist. Hieran reiht sich der sogenannte Faradaysche Dunkelraum und an

diesen die „positive Lichtsäule“, die sich in roter Farbe bis zur Anodenoberfläche erstreckt. Bei anderen Gasen haben die Leuchterscheinungen andere Farben. Eine weite Verbreitung haben mit Edelgasen gefüllte Glimmlampen für Zwecke der Lichtreklame gefunden.

§ 166. **Die Kathodenstrahlen.** Mit fortschreitender Verdünnung dehnt sich das Glimmlicht immer weiter aus, während das positive Licht allmählich verschwindet. Ist der Luftdruck bis auf etwa ein Millionstel einer Atmosphäre herabgesetzt, so gehen von der Kathode, wie zuerst Plücker 1859 entdeckte, Strahlen aus, die die Glaswand zu grüner Fluoreszenz bringen und sich *geradlinig* ausbreiten; denn Gegenstände, die der Ausbreitung dieser sogenannten *Kathodenstrahlen* im Wege stehen, werfen auf der hellgrün leuchtenden Glaswand einen Schatten.

1869 entdeckte Hittorf, daß die Kathodenstrahlen durch einen *Magneten abgelenkt* werden. Wenn man einem Kathodenstrahlbündel einen Magneten so nähert, daß die magnetischen Kraftlinien zu der Richtung der Strahlen senkrecht sind, so wird das Bündel zu einem *Kreise* gekrümmt. Wie 1876 Goldstein fand, werden die Kathodenstrahlen auch in einem *elektrischen* Felde abgelenkt. Sie werden zu *Parabeln* verbogen, beschreiben also Bahnen von ähnlicher Form wie ein geworfener Körper in dem Schwerfeld der Erde. Schließlich zeigte Perrin, daß eine isolierte Elektrode im Innern der Entladungsröhre durch den Aufprall der Kathodenstrahlen eine *negative Ladung* annimmt.

Alle diese Eigenschaften der Kathodenstrahlen lassen sich, wie 1897 J. J. Thomson und Kaufmann erkannten, leicht durch die Annahme erklären, daß die Kathodenstrahlen aus rasch bewegten, negativ elektrisch *geladenen* und zugleich mit *träger* Masse ausgestatteten *Teilchen* bestehen. Aus ihrer Trägheit folgt ihre geradlinige Ausbreitung, aus ihrer elektrischen Ladung ergeben sich, weil sie Konvektionsströme darstellen (§ 150), die beobachteten Ablenkungen sowohl im elektrischen als auch im magnetischen Feld; der Sinn der Ablenkung zeigt in beiden Fällen, daß die Ladung *negativ* sein muß.

Durch Ausmessung der Ablenkungen in dem elektrischen und magnetischen Felde gewinnt man nun zwei Beziehungen, mittels deren sich zwei Unbekannte bestimmen lassen, nämlich einerseits die Geschwindigkeit der Teilchen und andererseits das Verhältnis

zwischen ihrer Ladung und ihrer Masse. Diese Bestimmungen, die zuerst von J. J. Thomson und Kaufmann durchgeführt wurden, ergaben für die Geschwindigkeit Werte, die nahezu von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit, aber im übrigen von der Spannung abhängig sind. Für das Verhältnis der Ladung zur Masse, also die sogenannte *spezifische Ladung* der Kathodenstrahlteilchen, folgte ein Wert, der ungefähr 1800mal größer ist als das Verhältnis zwischen der Ladung und der Masse eines Wasserstoffions. Unter der naheliegenden Voraussetzung, daß die Ladung eines Kathodenstrahlteilchens ein elektrisches Elementarquantum betrage, muß also die Masse eines Strahlteilchens rund 1800mal oder, wie wir heute genauer wissen, 1835mal kleiner als die Masse eines Wasserstoffatoms angenommen werden.

§ 167. Die Elektronen. Die Teilchen der Kathodenstrahlen, die nach dem vorhin Gesagten durch eine negative Ladung von $4,8 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten und eine Masse von $9,0 \cdot 10^{-28}$ g gekennzeichnet sind, werden *Elektronen* genannt. Zahllose Beobachtungen führen zu der Erkenntnis, daß sie universelle Bausteine der Materie darstellen und im besonderen auch lose in den *Metallen* enthalten sind, denen sie dadurch deren charakteristische Eigentümlichkeiten verleihen.

§ 168. Der lichtelektrische Effekt. Im Jahre 1888 entdeckte Hallwachs, daß sich eine bestrahlte Metallplatte positiv elektrisch auflädt. Wenn die Platte bereits negativ geladen war, so verliert sie unter dem Einfluß der Bestrahlung ihre negative Ladung. Im wesentlichen wird der Effekt durch die ultravioletten Strahlen hervorgerufen. Später fanden Elster und Geitel, daß die Alkalimetalle, wie Lithium, Natrium, Kalium, den erwähnten Effekt, der als lichtelektrischer oder *Photoeffekt* bezeichnet wird, auch für sichtbares Licht zeigen. Lenard vermochte dann zu zeigen, daß von dem bestrahlten Metall „Kathodenstrahlen“ geringer Geschwindigkeit, also *Elektronen* ausgehen.

Lenard stellte auch bereits die merkwürdige Tatsache fest, daß die Geschwindigkeit der ausgelösten Elektronen von der Intensität der auslösenden Strahlung unabhängig ist. Eine Erhöhung der Intensität vermehrt nur die Anzahl der Elektronen, nicht aber deren Geschwindigkeit. Durch die schon öfter erwähnte Vorstellung der Lichtquanten fand diese Gesetzmäßigkeit später eine einfache Deutung.

Wird nun in einem Gase eine Spannung zwischen zwei Elektroden aufrechterhalten, von denen die negative eine bestrahlte Metallplatte ist, so bezeichnet man den Sättigungsstrom als den der betreffenden Strahlungsintensität entsprechenden *Photo-strom*; seine Stärke ist erreicht, wenn alle durch das Licht aus der Kathode ausgelösten Elektronen die Anode erreichen.

Für jedes Metall gibt es eine charakteristische *Grenzwellenlänge*, derart, daß einfarbiges Licht, dessen Wellenlänge diese Grenze überragt, bei dem betreffenden Metall einen Photoeffekt nicht mehr auszulösen vermag. Die Grenze liegt bei den Alkalimetallen und Erdalkalien innerhalb des *sichtbaren* Gebietes; sie ist besonders langwellig für Cäsium.

In den technisch wichtigen *Photozellen*, die im wesentlichen Elektrodenröhren der vorhin angegebenen Art darstellen, wird als lichtempfindliches Kathodenmetall vor allem Cäsium oder Kalium benutzt. Die Zellen sind entweder evakuiert oder, wie bei dem Tonfilm, mit Edelgasen gefüllt. Bei den vollkommensten Photozellen wird eine Empfindlichkeit von etwa $300 \mu\text{A}$ pro Lumen erreicht.

§ 169. Die Glühelktrizität. Wie im Jahre 1903 Richardson entdeckte, geht von *glühenden* Körpern, namentlich von glühenden Metallen eine negativ elektrische Strahlung aus, die sich aus *Elektronen* zusammensetzt. Besonders stark ist die Elektronenemission bei Wolframdrähten, die mit Thorium bedeckt sind, vor allem aber, wie Wehnelt entdeckte, bei Metallen, die mit Oxyden der Erdalkalimetalle Kalzium, Barium und Strontium überzogen sind.

Stehen nun in einem Vakuum als Elektroden ein glühendes und ein kaltes Metall einander gegenüber, so tritt Elektrizitätsleitung nur dann ein, wenn die glühende Elektrode als Kathode und die kalte als Anode dient. Die heiße Elektrode stößt nämlich dann die negativen Elektronen ab, während die kalte Elektrode sie anzieht, so daß ein Transport von Elektronen von der glühenden zur kalten Elektrode erfolgt. Da die Glühkathode mittels einer besonderen Heizbatterie erhitzt wird, kann die Stärke des Elektronenstromes leicht reguliert werden.

§ 170. Die Verstärkerröhre. Die Stärke des von der Glühkathode emittierten Elektronenstromes hängt natürlich von der Spannung zwischen Anode und Glühkathode, der sogenannten

Anodenspannung und überdies von der Glühtemperatur ab. Wird aber nun zwischen Glühkathode und Anode noch ein Metallgitter eingefügt, das gegen die Kathode eine Spannung aufweist (Abb. 74), so zeigt es sich, daß der Elektronenstrom in hohem Grade von dieser *Gitterspannung* abhängt. Wird nämlich eine negative Spannung an das Gitter gelegt, so treibt es durch die elektrostatische Abstoßung die Elektronen zurück und vermindert dadurch die Stromstärke. Umgekehrt zieht bei positiver Gitterspannung das Gitter die von der Glühkathode ausgesandten Elektronen an und verstärkt dadurch den Strom. Dadurch erklärt es sich, daß Änderungen des Elektronenstromes, die durch eine bestimmte Änderung der Anodenspannung erzeugt werden, bereits durch eine viel kleinere Änderung der Gitterspannung hervorgerufen werden. Das Verhältnis der beiden äquivalenten Spannungsänderungen wird als der Verstärkungsgrad der Gitterröhre bezeichnet. Bei Röhren mit einem einzigen Gitter liegt der Verstärkungsgrad zwischen etwa 10 und 15; durch Kombination von mehreren Gittern kann aber eine Verstärkung bis zu dem Hundert-, ja Mehrtausendfachen erzielt werden. Die *Gitter-* oder *Verstärkeröhre* wurde 1907 von Robert von Lieben erfunden.

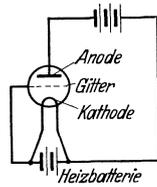


Abb. 74. Verstärkeröhre.

§ 171. Die Röntgenröhren. Die Erscheinungen der Glüh Elektrizität finden eine wichtige Anwendung in der modernen *Röntgentechnik*. Die Röntgenröhren sind Entladungsröhren, in denen der Kathode eine aus besonders hitzebeständigem Material gefertigte sogenannte *Antikathode* gegenübersteht, auf die die Kathodenstrahlen konzentriert werden; unter deren Einwirkung sendet die Antikathode Röntgenstrahlen aus. Die ursprünglich benutzten gasgefüllten Röhren hatten den Nachteil, daß das Durchdringungsvermögen der Strahlung, also ihre sogenannte *Härte*, von dem Gasdruck abhing und infolgedessen nach längerem Gebrauch die Röhren, weil sie zu hart wurden, „regeneriert“ werden mußten.

Die modernen Röntgenröhren, deren Erfindung auf Coolidge (1913) zurückgeht, sind hochevakuiert und praktisch gasfrei; als Kathodenstrahlen benutzen sie einfach die von einem glühenden Draht ausgesandten Elektronen. Durch Veränderung des Heizstromes, der den Draht $\frac{1}{2}$ glühend macht, läßt sich die Zahl der

emittierten Elektronen und damit die Intensität der erzeugten Röntgenstrahlen regulieren, während unabhängig davon die Härte durch Änderung der Röhrenspannung variiert werden kann. Die Röntgenstrahlen finden in der Medizin für diagnostische und therapeutische Zwecke und in der Technik für Materialuntersuchungen vielfache Verwendung.

Zwölftes Kapitel.

Die elektromagnetische Induktion und die elektrischen Wellen.

§ 172. Die Induktionsströme. Im Jahre 1831 machte Faraday die für die weitere Entwicklung der Physik fundamentale Entdeckung, daß das Entstehen oder Vergehen eines elektrischen Stromes in einem anderen, benachbarten Leiterkreis einen sekundären Strom hervorruft, den Faraday als *Induktionsstrom* bezeichnete. Ein solcher wird, wie Faraday bald darauf feststellte, auch durch Annäherung oder Entfernung einer von einem Strom durchflossenen Spirale oder durch Annäherung oder Entfernung eines gewöhnlichen Magneten erzeugt.

Das quantitative Gesetz der elektromagnetischen Induktion wurde 1845 von Franz Neumann gewonnen. Nach dem *Neumannschen Induktionsgesetz* ist die in einem Stromkreis induzierte elektromotorische Kraft gleich der auf die Sekunde bezogenen *Änderung* in der Zahl der *magnetischen Kraftlinien*, die die Fläche des Stromleiters durchsetzen. Dabei ist angenommen, daß durch jeden Quadratcentimeter ebensoviel Kraftlinien gehen, als der Wert der magnetischen Feldstärke an dieser Stelle beträgt; ferner ist vorausgesetzt, daß die elektromotorische Kraft in elektromagnetischen Spannungseinheiten ausgedrückt ist, von denen, wie schon erwähnt, 10^8 ein Volt ergeben. Je rascher sich also die Zahl der Kraftlinien oder, wie man sagt, der *Kraftfluß* ändert, desto stärker ist der induzierte Strom; seine Intensität ergibt sich, indem die induzierte elektromotorische Kraft durch den Widerstand im Sinne des Ohmschen Gesetzes dividiert wird.

Das Neumannsche Gesetz findet eine Ergänzung in einer bereits 1834 von Lenz aufgestellten Regel. Nach dieser fließt der induzierte Strom immer in solchem Sinne, daß er durch die von ihm ausgehende Kraft den Vorgang zu hemmen sucht, der ihn hervorrief.

Die Lenzsche Regel ist eine notwendige Folge des Satzes von der Erhaltung der Energie. Betrachten wir z. B. eine Induktionsspule, der ein Magnet genähert wird, so erfordert die Annäherung Arbeit, weil der erzeugte Induktionsstrom Energie besitzt. Die Tatsache, daß bei der Annäherung Arbeit verbraucht wird, kann nun auch dahin gedeutet werden, daß der entstehende Induktionsstrom einer Annäherung entgegenwirkt, also eine abstoßende Kraft auf den sich nähernden Magneten ausübt. Ebenso muß auch die Entfernung eines Magneten von einer Induktionsspule mit einer Arbeit verknüpft sein, weil auch die Entfernung des Magneten einen Induktionsstrom erzeugt. Dies kann wieder so gedeutet werden, daß der entstehende Induktionsstrom den Magneten zurückzuhalten sucht, ihn also anzieht. In den beiden betrachteten Fällen, nämlich der Annäherung und der Entfernung des Magneten, muß der induzierte Strom entgegengesetzte Richtungen haben.

§ 173. Die Selbstinduktion. Aus dem Induktionsgesetz folgt, daß jede Änderung der Stromstärke in einem Leiter durch sogenannte Selbstinduktion eine elektromotorische Kraft erzeugen muß; denn mit der Stromstärke ändert sich auch die magnetische Feldstärke an den Stellen der einzelnen Teile des Leitungskreises. So entsteht insbesondere immer durch Öffnen oder Schließen eines Stromes ein sekundärer „*Extrastrom*“. Bei der Öffnung wirkt er nach der Lenzschen Regel der Stromunterbrechung entgegen, fließt also in der Richtung des primären Stromes. Bei dem Schließen, also dem Einschalten des Stromes, ist hingegen der Extrastrom entgegengesetzt. Der Extrastrom verzögert demnach sowohl das Anwachsen des Stromes nach der Einschaltung als auch sein Verschwinden nach der Ausschaltung.

Die durch Selbstinduktion hervorgerufene elektromotorische Kraft kann gleichgesetzt werden dem Produkt aus der auf die Sekunde bezogenen Änderung der Stromstärke und einer für den Stromkreis als solchen charakteristischen Größe, die man den *Selbstinduktionskoeffizienten* oder die *Induktivität* nennt. Als technische Einheit dient das „*Henry*“ (so nach einem amerikanischen Physiker benannt); es ist die Induktivität eines Stromkreises, in dem eine Änderung der Stromstärke um 1 Ampere pro Sekunde eine elektromotorische Kraft von 1 Volt durch Selbstinduktion hervorruft. Instrumente mit verstellbarer Induktivität werden als *Variometer* bezeichnet.

Sehr stark äußert sich die Selbstinduktion bei den Stromspulen. Um sie dort zu vermeiden, wo sie nicht erwünscht ist, z. B. bei Spulen, die nur der Herstellung eines bestimmten Ohmschen Widerstandes dienen, wickelt man den Draht „*bifilar*“ auf, nämlich so, daß immer je zwei benachbarte Windungen den Strom in entgegengesetzter Richtung leiten. In größeren Metallstücken entstehen durch Selbstinduktion ungerichtete Wirbelströme, deren Energie sich in Wärme umsetzt und somit verlorengeht; um dies zu verhüten, werden als Kerne von Stromspulen nicht massive Eisenstäbe, sondern Bündel von untereinander isolierten Drähten benutzt. Ebenso werden eiserne Bestandteile elektrischer Maschinen unter Einfügung isolierender Zwischenschichten „unterteilt“.

§ 174. Die Wechselströme. Unter dem Einfluß einer elektromotorischen Kraft, die periodisch ihre Richtung ändert, entstehen in einem Leiter sogenannte *Wechselströme*. Im idealen Fall ist für sie bei Berücksichtigung des Vorzeichens die Stromstärke eine Sinusfunktion der Zeit. Die *effektive* Stromstärke, nämlich der Durchschnittswert des *Betrages* der Stromstärke, ist bei einem sinusartigen Wechselstrom gleich dem Scheitelwert (der Amplitude), gebrochen durch $\sqrt{2}$, also angenähert gleich dem mit 0,7 multiplizierten Scheitelwert. Analoges gilt auch für die Spannung.

Da die ständige Änderung der Stromrichtung auch fortwährende Extraströme hervorruft, so bewirkt die Selbstinduktion bei den Wechselströmen eine unter Umständen sehr beträchtliche Vergrößerung des *Widerstandes*. Ist R der sogenannte Ohmsche Widerstand, nämlich derjenige Widerstand, den der Leiterkreis einem Gleichstrom entgegensetzt, so ist der Widerstand für Wechselstrom

$$R' = \sqrt{R^2 + 4\pi^2 \nu^2 L^2},$$

wobei ν die Frequenz des Stromes und L die Induktivität bedeuten.

Enthält der Stromkreis außer einem Widerstande und einer Induktivität (in der Form einer Spule) überdies noch eine *Kapazität* (C) in der Form eines Kondensators, so wird der Wechselstromwiderstand

$$R' = \sqrt{R^2 + \left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}\right)^2}.$$

Der Ausdruck in der Klammer wird als *Reaktanz* bezeichnet. Die Tatsache, daß sie von Null verschieden ist, bewirkt es, daß das Maximum der Stromstärke in der Phase hinter dem Maximum der Spannung (also der elektromotorischen Kraft) zurückbleibt. Daher sind zeitweise Spannung und Stromstärke entgegengesetzt und somit die durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung dargestellte Stromleistung negativ; das den Stromkreis umgebende Feld gibt daher zeitweise Energie an den Stromkreis ab. Der Wechsel der Stromrichtung kann gegen den Wechsel der Spannung bis zu einer Viertelperiode verzögert sein, und zwar um so mehr, je größer die Frequenz und die Induktivität sind.

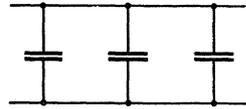


Abb. 75. Parallelschaltung von Kondensatoren.

Ebenso wie galvanische Elemente oder Widerstände können auch Kondensatoren hintereinander oder parallel geschaltet werden. In letzterem Fall (Abb. 75) ist die gesamte Ladung, die die Kondensatoren (auf der einen Seite) empfangen, gleich der Summe der Einzelladungen oder

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots$$

Die Potentialdifferenz ist im Falle der Parallelschaltung

$$V = V_1 = V_2 = \dots$$

Nun ist aber die Ladung gleich dem Produkte aus Spannung und Kapazität oder

$$Q_1 = C_1 V_1, \quad Q_2 = C_2 V_2 \text{ usw.}$$

also

$$Q = V (C_1 + C_2 + \dots).$$

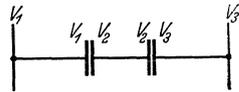


Abb. 76. Serienschaltung von Kondensatoren.

Dies bedeutet, daß die resultierende Kapazität bei Parallelschaltung gleich der Summe der Einzelkapazitäten ist.

Betrachten wir andererseits Kondensatoren in *Serienschaltung* (Abb. 76), so ist es klar, daß die negative Ladung des ersten Kondensators gleich sein muß der positiven des zweiten und so fort. Haben wir also etwa zwei Kondensatoren, so ist, wenn wir die resultierende Kapazität mit C bezeichnen,

$$V_1 - V_3 = \frac{Q}{C},$$

aber auch

$$V_1 - V_2 = \frac{Q}{C_1}$$

und

$$V_2 - V_3 = \frac{Q}{C_2}.$$

Indem wir die letzten zwei Gleichungen addieren und mit der drittletzten vergleichen, finden wir für den Fall zweier Kondensatoren, der sich aber leicht verallgemeinern läßt,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Bei Serienschaltung ist also der reziproke Wert der resultierenden Kapazität gleich der Summe der reziproken Werte der Einzelkapazitäten.

Spulen von besonders hoher Induktivität finden als *Drossel­spulen* Verwendung, indem sie Gleichstrom gut leiten, hingegen Wechselstrom höherer Frequenz einen kaum überwindbaren Widerstand entgegensetzen.

Zur Messung von Wechselströmen eignen sich natürlich nur solche Instrumente, bei denen der Ausschlag von der Stromrichtung unabhängig ist, also nur von dem Betrage der Stromstärke abhängt. Man bedient sich darum der sogenannten *Federgalvanometer*, bei denen ein Stück *weichen* Eisens, das an einer Feder hängt, in eine Stromspule hineingezogen wird. Da kein Magnetismus zurückbleibt, reagieren solche Apparate auch auf Wechselstrom. Ferner bedient man sich sogenannter *Hitzdrahtinstrumente*; sie enthalten einen gespannten Draht, der sich infolge der von der Stromrichtung unabhängigen Wärmewirkung des Stromes verlängert und diese Bewegung durch Hebel auf einen Zeiger überträgt. Natürlich können solche Instrumente ebenso wie die Federgalvanometer auch für Gleichstrom verwendet werden.

§ 175. Der Transformator. Eine Vorrichtung, die ohne Veränderung der Frequenz Wechselstromenergie von niedriger Spannung in solche von hoher Spannung oder umgekehrt verwandelt, wird als *Transformator* bezeichnet. Ein solcher besteht im wesentlichen aus zwei Spulen von verschiedenen Windungszahlen, die einen gemeinsamen Kern umgeben. Wird durch die sogenannte Primärspule Wechselstrom gesandt, so entsteht durch Induktion in der Sekundärspule ein Wechselstrom gleicher Frequenz. Die *Spannungen* beider Kreise verhalten sich aber untereinander *umgekehrt* wie die *Windungszahlen*.

Mit großer Annäherung ist für beide Spulen das Produkt aus Spannung und Stromstärke gleich; doch sind die beiden Ströme entgegengesetzt gerichtet. Transformation auf hohe Spannung bedeutet also stets Verringerung der Stromstärke und umgekehrt, während die Energie, wenn man von den kleinen Verlusten durch Wärmeentwicklung absieht, erhalten bleibt.

Transformatoren spielen sowohl in der Stark- als auch in der Schwachstromtechnik eine wichtige Rolle; aber auch in der Meßtechnik bedient man sich ihrer zur Erweiterung des Meßbereiches und vor allem auch, um das Messen sehr hoher Spannungen oder sehr großer Stromstärken ungefährlich zu machen.

§ 176. Die Telephonie. Während der Telegraph auf den magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes beruht, liegt der Telephonie die Erscheinung der Induktionsströme zugrunde. In seiner ursprünglichen Gestalt besteht das *Telephon*, das 1860 von Reis und in praktischerer Form 1876 von Bell erfunden wurde, aus einem Magnetstab, dessen einer Pol von einer Drahtspule umgeben ist und vor dem sich eine dünne Eisenmembrane befindet. Wird gegen die Membrane gesprochen, so wird sie durch die Schallwirkungen in Schwingungen versetzt, also periodisch dem Magneten genähert und von ihm entfernt. Durch Induktion entstehen derart in der den Magneten umgebenden Spule Wechselströme, die, wenn sie zu einem zweiten, gleich beschaffenen Telephon geleitet werden, dessen Membrane in gleichem Rhythmus hin und her bewegen; dadurch wird ein gegen das erste Telephon gesprochener Ton in dem zweiten Telephon hörbar.

Während bei der ursprünglichen Konstruktion der Telephonstrom durch die Stimme des Sprechers erzeugt wurde, wurde durch die Erfindung des *Mikrophons* (Hughes, 1878) die Wirksamkeit des Sprechers auf die Steuerung eines Stromes beschränkt, der einer Batterie entnommen wird. In seiner einfachsten Form besteht das Mikrophon aus einem an beiden Enden zugespitzten Kohlenstäbchen, das lose zwischen zwei Kohlenstücken sitzt und durch das der Strom der Batterie geleitet wird. Die Wirkung des Mikrophons beruht auf der Tatsache, daß zwischen zwei einander berührenden Kohlenstücken wegen der Unebenheiten der Oberflächen nur wenige winzige Brücken für den Übergang der Elektrizität vorhanden sind und daher kleinste Bewegungen genügen, um die Zahl dieser Brücken wesentlich zu vermehren

oder zu verringern. Dadurch werden aber infolge des großen spezifischen Widerstandes der Kohle sehr beträchtliche Stromschwankungen hervorgerufen. Wird daher gegen das Mikrophon gesprochen, so treten in dem Batteriestrom periodische Intensitätsänderungen auf, die in dem Empfangstelephon in Schallschwingungen der gleichen Periode umgewandelt werden.

Gegenwärtig werden die Mikrophone nicht mehr wie früher durch lokale Batterien an den Sprechstellen, sondern von der Zentrale aus gespeist. Die ursprünglichen Freileitungen wurden in Großstädten allgemein durch unterirdische Telephonkabel ersetzt, wobei Doppelleitungen benutzt werden, also die in der Telegraphie übliche Erdleitung vermieden wird. Einen sehr großen Aufschwung führte in der Telephonie die Benutzung der Verstärkerrohren herbei.

§ 177. Der Tonfilm. Bei dem *Tonfilm* wird die aufzunehmende Sprache oder Musik zunächst mittels eines Mikrophons in elektrische Stromschwankungen verwandelt; dabei dient als Mikrophon gewöhnlich ein nur einige Tausendstelmillimeter dickes und einige Millimeter breites Aluminiumbändchen, das unter dem Einfluß der Schallwellen zwischen den Polen eines starken Magneten in rhythmische Schwingungen gerät und als Stück eines Leiterkreises in diesem einen Wechselstrom im Rhythmus der Schallwellen hervorruft. Die Energie dieser Ströme ist jedoch äußerst gering und überschreitet kaum die Größenordnung von 10^{-9} Watt. Die Wechselspannung der Ströme wird darum an das Gitter einer *Verstärkerrohre* gelegt, so daß sich die rhythmischen Schwankungen wesentlich verstärkt auf deren Anodenstrom übertragen. Diese Verstärkung wird dann in mehreren Stufen unter Benutzung von Transformatoren wiederholt.

Durch solche Ströme, die die eigentlichen Mikrophonströme in der Leistung milliardenmal übertreffen, von ihnen jedoch den Rhythmus übernommen haben, werden nun Lichtstrahlen derart gesteuert, daß im gleichen Rhythmus Helligkeitsschwankungen entstehen, die in einem Filme photographisch festgehalten werden. Als Steuergerät dient hierbei vielfach die *Kerr-Zelle*; sie beruht auf der schon 1875 von Kerr entdeckten Tatsache, daß in einem elektrischen Felde isolierende Flüssigkeiten, besonders stark Nitrobenzol, *doppelbrechend* werden. In der Kerr-Zelle tauchen zwei Platten eines elektrischen Kondensators derart

zwischen zwei Nicol'schen Prismen in Nitrobenzol, daß zwischen den Platten ein winziger Spalt frei bleibt, der verkleinert auf dem Film abgebildet wird. Die Lichtdurchlässigkeit der Kerr-Zelle schwankt im Rhythmus der Mikrophonströme, so daß auf dem Film eine photographische Aufzeichnung der durch das Mikrophon übertragenen Töne entsteht.

Zur Wiedergabe der Aufzeichnung werden die bei der Durchleuchtung des Films während der Vorführung auftretenden Lichtschwankungen durch *Photozellen* in elektrische Stromschwankungen zurückverwandelt und sodann zu Verstärkerröhren und von diesen zu elektrodynamischen *Lautsprechern* geführt. In solchen Lautsprechern wird eine von den Strömen durchflossene Spule von einem Magneten angezogen; sie gerät infolge der mit der Stromstärke schwankenden Größe der Anziehung in Schwingungen im Rhythmus der Ströme, und an den Schwingungen beteiligt sich auch eine mit der Spule fest verbundene Membrane. Dadurch wird aber ein Ton in der Höhe des ursprünglich aufgenommenen erzeugt und letzterer somit reproduziert.

Für den Tonfilm werden in verschiedenen Ländern verschiedene Verfahren benutzt; doch kann man wohl im wesentlichen als die Erfinder des Tonfilms die Deutschen Engel, Massolle und Vogt bezeichnen, die zwischen 1920 und 1925 das „Triergonverfahren“ schufen, sowie die Amerikaner de Forest und Case.

§ 178. Die Stromgeneratoren. Schon in den ersten Jahrzehnten nach der Entdeckung der Induktionsströme wurden mannigfache Maschinen konstruiert, die der Verwandlung von mechanischer Energie in die Energie elektrischer Ströme dienen. Die Entwicklung einer *Starkstromtechnik* begann jedoch erst 1867 mit der Erfindung der selbsterregten *Dynamomaschine* durch Werner von Siemens.

Die Dynamomaschine besteht ebenso wie die schon früher ersonnenen, Strom erzeugenden Maschinen oder Stromgeneratoren im wesentlichen aus dem *Feldmagneten*, dessen Aufgabe die Herstellung eines starken Magnetfeldes ist, und einem als *Anker* bezeichneten System von Spulen, in denen durch Rotationen periodische Änderungen des sie durchsetzenden magnetischen Kraftflusses hervorgerufen werden. Durch einen sogenannten *Kollektor* sind dabei die Spulen des Ankers so hintereinandergeschaltet, daß sich die elektromotorischen Kräfte der einzelnen Spulen addieren

und an die Stellen der höchsten und niedrigsten Spannung „Bürsten“ angelegt werden. Werden die Bürsten durch einen Widerstand außerhalb des Ankers miteinander verbunden, so fließt durch diesen Widerstand und den Anker ein *Gleichstrom*.

Es war nun der glückliche Gedanke von Siemens', den erzeugten Induktionsstrom zugleich zur Verstärkung der Feldmagnete zu benutzen. Siemens ging von der Tatsache aus, daß Eisen, das einmal magnetisch gewesen ist, stets etwas Magnetismus bewahrt. Der „remanente“ Magnetismus ist bei den festen Elektromagneten eines Stromgenerators, wie Siemens erkannte, aber bereits hinreichend, um in dem in Rotation versetzten Anker einen, wenn auch nur schwachen Induktionsstrom zu erzeugen. Dieser Strom wird in der Dynamomaschine durch die Windungen des festen Elektromagneten geleitet. Dadurch wird dessen Magnetismus verstärkt, somit auch der magnetische Kraftfluß und infolgedessen rückwirkend der Induktionsstrom. Dieser erhöht wieder den Magnetismus, und diese wechselseitige Verstärkung setzt sich während des Angehens der Maschine bis zu hohen Werten fort.

Das von Siemens so entdeckte sogenannte „*dynamo-elektrische Prinzip*“ ermöglichte die Konstruktion selbsterregter Generatoren, während man früher entweder viel schwächere permanente Magnete benutzte oder besondere Hilfsmaschinen zur Speisung der Elektromagnete benötigte. Einen großen Fortschritt in der Entwicklung der Dynamomaschine bedeutete die Erfindung einer besonders zweckmäßigen Ankerwicklung durch Hefner-Alteneck; durch sie wurde eigentlich erst die Erzeugung fast völlig kontinuierlicher Gleichströme mit sehr geringen Schwankungen der Stromstärke möglich.

§ 179. Die Wechselstromgeneratoren. Auf denselben Prinzipien wie die Gleichstrommaschinen beruhen auch die Wechselstrommaschinen; doch entfällt die Vorrichtung zur Gleichrichtung, und die erzeugten Ströme gehen von den Ankerwicklungen direkt in die äußere Leitung über. Da zur Erzeugung der Feldmagnete nur Gleichstrom verwendet werden kann, können Wechselstrommaschinen nicht selbsterregend wirken, sondern müssen mit einer „Erregermaschine“ gekoppelt sein. Während in Gleichstromgeneratoren der Anker bei festem Feldmagneten rotiert, läßt man in Wechselstromgeneratoren zweckmäßigerweise die Feldmagnete bei feststehendem Anker umlaufen.

Mit den Wechselstromgeneratoren lassen sich viel höhere Spannungen als mit Gleichstrommaschinen erreichen, bis zu einigen zehntausend Volt und mit Leistungen bis zu rund 50 Mill. Watt. Wechselstromgeneratoren setzen 85 bis 95% der ihnen zugeführten Energie in elektrische Energie um.

§ 180. Der Drehstrom. Durch Verteilung getrennter Wicklungen über den Ankerumfang kann man es erreichen, daß eine Wechselstrommaschine statt eines einzigen Stromkreises mehrere liefert, und zwar gebräuchlicherweise drei, die um je eine Drittelperiode in der Phase gegeneinander verschoben sind. Ein derartiger dreiphasiger Wechselstrom wird als *Drehstrom* bezeichnet. Die Wicklungen, denen die drei Ströme entnommen werden, können dabei so untereinander verbunden werden, daß für die Außenleitung *drei Drähte* statt dreier unabhängiger Leitungspaare genügen.

Wird dreiphasiger Wechselstrom in geeigneter Wicklungsanordnung um einen feststehenden Ring aus weichem Eisen gesandt, so entsteht ein rotierendes Magnetfeld, ein sogenanntes magnetisches *Drehfeld*. Befindet sich in einem solchen Feld ein entsprechend gewickelter Anker, so tritt von selbst Rotation ein.

§ 181. Der Elektromotor. In Umkehrung der Wirkungsweise des Stromgenerators verwandelt der Elektromotor die Energie elektrischer Ströme in mechanische Arbeitsleistung; im übrigen stimmt jedoch die Konstruktion des Motors mit derjenigen des Generators überein. Von der zugeführten Stromenergie geht ein Teil innerhalb des Motors als „Leerlaufarbeit“ verloren; der Überschuß kann nach außen hin als Arbeit abgegeben werden. Ein wohlbekanntes Beispiel für die Anwendung von Elektromotoren stellen die elektrischen Straßenbahnen dar. Auf der Tatsache des magnetischen Drehfeldes beruhen die für die Technik wichtigen Drehstrommotoren.

§ 182. Die elektrische Energieübertragung. Eine Kombination von Stromgenerator und Elektromotor kann zur Übertragung von mechanischer Energie verwendet werden. Dadurch ist die Industrie instandgesetzt, Energiequellen statt an den selten hierfür geeigneten Stätten des Vorkommens an den Stellen des tatsächlichen Bedarfs auszunutzen. Dies gilt namentlich für hydraulische Energie und minderwertige Brennstoffe, wie Braunkohle, bei der sich der Transport auf große Entfernungen nicht rentieren könnte.

Für *Fernleitungen* trachtet man die Stromstärke möglichst herabzusetzen; denn der Energieverlust durch Wärmeentwicklung ist durch das Produkt aus Widerstand und Quadrat der Stromstärke bestimmt, während der Widerstand dem Querschnitt umgekehrt proportional ist. Bei prozentuell gleichbleibendem Energieverlust wächst also der zu wählende Querschnitt mit dem Quadrate der Stromstärke, so daß man aus wirtschaftlichen Gründen bei Fernleitungen die Stromstärke klein wählt. Da die Energie durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung gegeben ist, kommen somit für Fernleitungen nur *Hochspannungen* in Betracht.

An den Verbrauchsstätten des Stromes kann aber die Spannung schon aus Sicherheitsgründen und wegen der Konstruktion der Motoren und Glühlampen einige wenige hundert Volt nicht überschreiten (am gebräuchlichsten sind Spannungen von 220 oder 110 Volt), und auch für die Generatoren selbst sind keine zu hohen Spannungen möglich. Es wird daher der Strom vor der Fernleitung auf hohe Spannung *transformiert*, die dann am Ende der Leitung wieder durch Transformatoren herabgesetzt wird. Da die Transformation für Wechselströme einfacher als für Gleichströme ist, kommen für die Fernleitungen nur Wechselströme in Betracht. Moderne Höchstspannungsleitungen (von oft mehr als 1000 km) benutzen Spannungen von einigen hunderttausend Volt; auch bei sehr großen Entfernungen kann so der Energieverlust durch Leitung auf 5 bis 10% beschränkt bleiben.

Vor der Zuleitung zu den Verbrauchsstätten muß der Wechselstrom indessen noch oft in *Gleichstrom* verwandelt werden; so ist z. B. zum Betriebe der elektrischen Straßenbahnen Gleichstrom geeigneter, und für elektrochemische Zwecke, wie für das Laden von Akkumulatoren, kann Wechselstrom überhaupt nicht benutzt werden. Die *Gleichrichter*, die Wechsel- in Gleichstrom verwandeln, beruhen auf der schon früher erwähnten Tatsache, daß eine Röhre, in der eine glühende einer kalten Elektrode gegenübersteht, den Strom nur in einer Richtung leitet. In den in der Starkstromtechnik gebräuchlichen Gleichrichtern wird die Glühkathode von Quecksilber gebildet; ihr stehen zwei Anoden aus Graphit oder Eisen gegenüber, die auf dunkler Rotglut erhalten werden und somit im Vergleich zu der bei etwa 3000^o glühenden Kathode als kalt angesehen werden können.

§ 183. **Die hochfrequenten Wechselströme.** Die Wechselströme der Starkstromtechnik haben meist eine Frequenz von 50 pro Sekunde, die dadurch begründet ist, daß bei wesentlich niedrigerer Frequenz Glühlampen ein unruhiges Licht geben würden. Wechselströme von unvergleichlich höherer Frequenz haben die Physiker schon in der Mitte des 19. Jahrhunderts in den *Entladungen von Kondensatoren* kennengelernt. Wird zwischen den beiden Platten eines Kondensators eine leitende Verbindung hergestellt, so tritt nach Beendigung der Entladung ein Extrastrom entgegengesetzter Richtung ein, der die ursprünglich positive Seite negativ und die ursprünglich negative Seite positiv auflädt. Es kommt also zu einer neuen Entladung, und dieser Vorgang wiederholt sich unter allmählichem Abklingen. Die Elektrizität pendelt zwischen den beiden Platten hin und her, bis die *Schwingungen* infolge der durch die Wärmeentwicklung bedingten Energieverluste erlöschen.

William Thomson hat schon 1853 gezeigt, daß die Schwingungsdauer einer Kondensatorentladung gleich ist

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC},$$

wenn L und C Induktivität und Kapazität des Leitungskreises sind. Durch Photographie des Entladungsfunkens mittels eines rotierenden Spiegels hat dann 1859 Feddersen den oszillatorischen Charakter der Kondensatorentladung nachgewiesen; für die Schwingungsdauer fand er Werte von etwa 1 bis 40 Milliontel Sekunden.

Zur Herstellung dauernder hochfrequenter Wechselströme mit Frequenzen von einigen Tausend pro Sekunde bedient man sich des *Funkeninduktors*. Es ist dies ein Transformator, bei dem als primärer Strom Gleichstrom verwendet wird, der durch besondere automatisch funktionierende Vorrichtungen periodisch, einige tausendmal in der Sekunde, *unterbrochen* wird. Da die induzierte elektromotorische Kraft bei dem Öffnen und Schließen des primären Stromes entgegengesetzt gerichtet ist, ist der sekundäre Strom ein Wechselstrom, und zwar von sehr hoher Spannung von zehntausenden oder hunderttausenden Volt. Wenn die sekundäre Spule offen ist, so besteht diese hohe Spannung zwischen ihren Enden und führt zu der Bildung von Funken, die eine Länge bis über 1 m haben können.

Wechselströme von sehr hoher Frequenz und enormer Spannung erhält man, wie um 1900 Tesla zeigte, indem man Leidener Flaschen durch den Strom eines Funkeninduktors periodisch auflädt, während man den Entladungsstrom durch eine aus wenigen Windungen dicken Kupferdrahtes gebildete Primärspule eines Transformators hindurchgehen läßt.

§ 184. Die Hertz'schen Versuche. Auf theoretischem Wege gelangte Maxwell im Jahre 1873 zu der Folgerung, daß *transversale elektromagnetische Wellen* möglich sein müßten, die sich in einem Mittel von der Dielektrizitätskonstante ε und der magnetischen Permeabilität μ mit einer Geschwindigkeit

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$

ausbreiten, wobei c die Webersche Konstante (§ 151), also die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Im leeren Raume oder mit größter Annäherung auch in Luft müßten sich also die Wellen mit der Geschwindigkeit des *Lichtes* fortpflanzen.

Die tatsächliche experimentelle Erzeugung der von Maxwell als möglich deduzierten elektromagnetischen Wellen ist 1888 durch die berühmten Versuche von Heinrich Hertz geglückt. Hertz ging von den schon erörterten Kondensatorschwingungen aus, erkannte aber, daß auch die raschesten Schwingungen bei Entladungen von Leidener Flaschen Wellen von etwa 300 m Länge entsprechen, so daß mit solchen Wellen begrifflicher Weise nicht experimentiert werden kann. Hertz benutzte darum statt einer Leidener Flasche zwei entsprechend geformte Messingkörper, die er voneinander durch eine kurze Funkenstrecke trennte und die er durch einen Funkeninduktor ständig lud. Durch diese Anordnung setzte er sowohl die Kapazität als auch die Induktivität und damit nach der erwähnten Thomsonschen Formel die Schwingungsperiode herab, so daß sich Wellenlängen von nur wenigen Metern, ja Dezimetern ergaben.

Daß sich die derart hervorgerufenen Schwingungen wellenförmig ausbreiten, wies nun Hertz mittels eines kreisförmigen Drahtes nach, in dem an einer kleinen Unterbrechungsstelle die Wellen durch Resonanz einen Funken hervorriefen. Mittels dieser Vorrichtung konnte Hertz nachweisen, daß sich die durch die elektrischen Schwingungen erzeugten Wellen nach denselben Ge-

setzen wie Lichtwellen, und zwar mit der gleichen Geschwindigkeit, ausbreiten und daß sie wie Lichtwellen reflektiert, gebrochen, gebeugt, polarisiert und zur Interferenz gebracht werden können.

§ 185. Die elektromagnetische Natur des Lichtes. Durch die Hertz'schen Versuche wurde die Vermutung Maxwells zur Gewißheit, daß die *Lichtwellen* in Wirklichkeit elektromagnetische Wellen seien. Schon vor Hertz hatte Boltzmann eine wichtige Folgerung aus der Maxwellschen Theorie experimentell bestätigt. Wie ein Vergleich der Formel des § 184 mit der bekannten optischen Beziehung zeigt, wonach die Lichtgeschwindigkeit in einem beliebigen Mittel gleich derjenigen im Vakuum, gebrochen durch den Brechungsindex (n), ist, muß für ein unmagnetisches Medium ($\mu = 1$)

$$\varepsilon = n^2$$

sein. Diese sogenannte *Maxwellsche Relation* zeigt sich, wie Boltzmann fand, für die Gase ausgezeichnet erfüllt; ebenso gilt sie im fernerem Ultrarot für alle Körper, während sich im Gebiete des sichtbaren Spektrums die Dispersion, nämlich die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge, störend bemerkbar macht.

In der Erzeugung kürzester elektrischer Entladungswellen ist die Experimentalphysik allmählich bis zu einer Wellenlänge von weniger als $\frac{1}{10}$ mm gelangt; damit erscheint die höchste im Ultrarot festgestellte Wellenlänge von $\frac{1}{3}$ mm bereits beträchtlich unterschritten.

§ 186. Die Sendung elektrischer Wellen. Auf die Hertz'schen Versuche gründete im Jahre 1896 Marconi die Erfindung der *drahtlosen Telegraphie*; schon 1902 gelang es ihm, zum ersten Male drahtlos über den Atlantischen Ozean Nachrichten zu senden. Die Hauptprobleme der drahtlosen Telegraphie waren die Konstruktionen geeigneter Apparate zur Erzeugung, zur Sendung, zum Empfang und zur Wahrnehmbarmachung elektrischer Wellen.

Der Erzeugung elektrischer Wellen dienen die sogenannten *Hochfrequenzgeneratoren*, die an die Stelle des ursprünglichen Hertz'schen Oszillators getreten sind. Dieser hatte den Nachteil einer beträchtlichen „Dämpfung“, indem die durch jeden Funkübergang erzeugten Schwingungen stets sofort wieder erlöschen. Bei den modernen Hochfrequenzgeneratoren wird der durch die Dämpfung verursachte Energieverlust der Schwingung sofort wieder ersetzt, so daß konstante Schwingungen erfolgen. Der

wichtigste Generator für solche *ungedämpfte* Schwingungen ist der *Röhrensender*; er unterscheidet sich von einer Verstärkerröhre nur dadurch, daß in den Stromkreis noch ein sogenannter *Schwingungskreis* eingefügt ist, der aus einer Spule mit Selbstinduktion und einem Kondensator von regulierbarer Kapazität besteht. Auch der von dem Gitter zur Kathode führende Kreis enthält eine Spule, auf die diejenige des Schwingungskreises durch Induktion, sogenannte Rückkoppelung, wirken kann.

Moderne Sendestationen arbeiten mit mehrstufigen Kombinationen von Röhrensendern. Die im geschlossenen Kreis erzeugten Schwingungen werden sodann auf einen offenen Schwingungskreis, die sogenannte *Antenne*, übertragen, die im wesentlichen aus einem langen ausgespannten Draht besteht; von einem solchen geht eine beträchtliche Strahlung von elektromagnetischen Wellen aus, namentlich dann, wenn die durch Kapazität und Induktivität bestimmte Eigenfrequenz des Drahtes mit der Frequenz der ihm zugeführten Schwingungen übereinstimmt, wenn also die Antenne mittels eingefügter regulierbarer Spulen und Kondensatoren „abgestimmt“ ist.

Die *Ausbreitung* der von der Antenne ausgehenden elektrischen Wellen ist wesentlich durch die Verhältnisse in der Atmosphäre beeinflusst, vor allem durch das Vorhandensein von gut leitenden atmosphärischen Schichten in einer Höhe von etwa 60 bis 100 km. Von diesen Schichten werden die aufwärtsgehenden Wellen reflektiert und erreichen erst in großen Entfernungen von dem Sender wieder den Boden.

Zur Verhinderung von Schwankungen in der Sendefrequenz bedient man sich der *Quarzsteuerung*; sie beruht auf der Erscheinung, daß sich Quarzkristalle ausdehnen oder zusammenziehen, wenn an gegenüberliegende Kristallflächen eine elektrische Spannung gelegt wird. Unter dem Einfluß einer Wechselspannung gerät daher ein Quarzkristall in elastische Schwingungen; sie werden dann besonders stark, wenn die elektrische Schwingungsfrequenz mit einer elastischen Eigenfrequenz des Kristalls übereinstimmt, welche letztere im wesentlichen von der Dicke der Kristallplatte abhängt. Die Konstanz der einzuhaltenden Hochfrequenz wird dadurch kontrolliert, daß ein schwingender Quarzkristall im Vakuum ein lebhaftes Leuchten zeigt, das aber bei einer Frequenzänderung um nur ein halbes Promille erlischt.

§ 187. **Der Empfang elektrischer Wellen.** Die elektrischen Wellen rufen in allen von ihnen getroffenen Körpern Wechselspannungen hervor, unter deren Einfluß in leitenden Kreisen Wechselströme entstehen. Diese haben jedoch selbst dann, wenn die *Empfangsantenne* auf die zu empfangende Welle abgestimmt ist, eine zu geringe Stärke, als daß sie unmittelbar nachgewiesen werden könnten. Der Nachweis schwacher Wechselströme ist nämlich an sich schwieriger als derjenige gleich schwacher Gleichströme, weil bei dem Wechselstrom alle Durchschnittswirkungen entfallen, zu denen die beiden entgegengesetzt gerichteten Halbwellen in umgekehrtem Sinne beitragen. Zum Nachweis der schwachen Wechselströme in der Empfangsantenne dienen daher als „*Detektoren*“ Vorrichtungen, die die eine Halbwelle abschneiden und dadurch eine feststellbare Durchschnittswirkung ermöglichen. Der wichtigste Detektor ist die Elektronenröhre in sogenannter *Audionschaltung*; bei dieser werden die empfangenen Wellen über einen kleinen Kondensator dem Gitter der Röhre zugeführt.

§ 188. **Die drahtlose Telephonie.** Die von einem Sender ausgehenden elektrischen Wellen können durch die Stimme eines Sprechers oder durch Musik „*moduliert*“ werden. Die langsamen „*niederfrequenten*“ akustischen Schwingungen überlagern sich dann über die hochfrequenten elektrischen Schwingungen in der Weise, daß die Intensität der elektrischen Schwingungen periodischen Schwankungen unterworfen ist, die im Rhythmus der akustischen Schwingungen erfolgen. In der drahtlosen Telephonie fungieren also die elektrischen Wellen als *Trägerwellen*, indem sie ihre Stärke in der Periode des übertragenen Tones verändern.

Indem man nun bei dem Audion durch eine geeignete Schaltung das Anwachsen der Gitterspannung über ein bestimmtes Ausmaß verhindert, kann man es erreichen, daß in dem Elektronenstrom des Audions Schwankungen in dem Rhythmus auftreten, in dem die auftreffende Welle moduliert ist. Der Elektronenstrom schwingt also mit der akustischen Frequenz, jedoch in verstärktem Ausmaß, weil jede Elektronenröhre zugleich als Verstärker wirkt. Führt man den periodisch schwankenden Elektronenstrom einem Telephon zu, so entsteht in diesem ein der übertragenen Niederfrequenz entsprechender Ton. Zur Verbesserung des Empfanges können noch Nieder- und Hochfrequenzverstärker eingeschaltet

werden, letztere vor der Gleichrichtung. Die erste radiotelephonische Verbindung über den Ozean wurde 1927 eröffnet.

§ 189. Der Rundfunk. Seit 1921 hat sich aus der Radiotelephonie der Rundfunk entwickelt. Er benutzt vorwiegend die Wellenlängen von 200 bis 600 und von 1000 bis 2000 m. Als allgemeiner Grundsatz gilt, daß jeder Sender von dem ihm in der Wellenlängentabelle benachbarten einen Frequenzabstand haben soll, der nicht kleiner als das akustische „Frequenzband“ von 9000 Hertz ist; dadurch soll es verhütet werden, daß die akustisch modulierte Frequenz des einen Senders in den Bereich des anderen übergreift.

Zur Erzielung besonders großer Reichweiten bedient sich der Rundfunk eigener *Kurzwellensender*, die mit Wellenlängen zwischen 10 und 50 m arbeiten. *Ultrakurzwellen* von 10 m abwärts werden für *Fernsehsendungen* benutzt, die ein Frequenzband von etwa 100000 bis 300000 Hertz erfordern. Für ein solches kommen nur Trägerwellen von ungefähr 50 Millionen Hertz aufwärts, also von weniger als 10 m Wellenlänge in Betracht. Ultrakurzwellen breiten sich im Gegensatz zu Radiowellen nur *geradlinig* aus, weshalb Fernsehsendeanlagen in ziemlicher Höhe errichtet werden müssen.

Dreizehntes Kapitel.

Der elektrische Aufbau der Materie.

§ 190. Die materiellen Urteilchen. Neben den *Elektronen*, von denen in einem früheren Abschnitt schon die Rede war, hat die Physik seit dem Ende des 19. Jahrhunderts noch eine Reihe weiterer Urteilchen kennengelernt, die als universelle Bausteine der Materie anzusehen sind. Die nähere Erforschung der vom Radium und anderen radioaktiven Grundstoffen ausgehenden Strahlung führte bald zu der Feststellung *positiv* geladener sogenannter *α -Teilchen*, die mit einer Ladung von *zwei* Elementarquanten die *vierfache Masse* eines *Wasserstoffatoms* verbinden. Es gelang nämlich, die von einem Präparat in einer bestimmten Zeit fortgeschleuderten *α -Teilchen* zu zählen, und indem man durch die *α -Strahlen* eine Metallplatte in meßbarer Weise positiv auflud, die Ladung eines einzelnen *α -Teilchens* zu ermitteln. Andererseits konnte das Verhältnis von Ladung zu Masse aus Ablenkungsversuchen ermittelt werden.

1914 wurde bei Versuchen, von denen noch die Rede sein wird, erstmalig das Auftreten von positiv elektrischen Strahlen festgestellt, für deren als *Protonen* bezeichnete Teilchen sich eine Ladung von einem Elementarquantum und eine Masse ergab, die praktisch mit derjenigen des Wasserstoffatoms übereinstimmt.

Drei weitere Arten materieller Urteilchen wurden 1932 und 1933 entdeckt. Zunächst erkannte Chadwick bei Atomzertrümmerungsversuchen die Existenz *ungeladener* Urteilchen von der Masse des Wasserstoffatoms, sogenannter *Neutronen*, die sich jedoch von den ebenfalls neutralen Wasserstoffatomen durch ein milliardenmal kleineres Volumen unterscheiden; dieses stimmt vielmehr ungefähr mit demjenigen der Protonen überein. Dann entdeckte Anderson das Vorkommen *positiver* Teilchen, die hinsichtlich der Masse und des Betrages der Ladung mit den schon lange bekannten Elektronen übereinstimmen; dabei zeigte sich überraschenderweise, daß diese sogenannten *Positronen* oder positiven Elektronen im freien Zustand nur eine sehr kurze Lebensdauer besitzen. Schließlich gelang aus schwerem Wasserstoff (s. § 194) die Herstellung von positiven Strahlen, die sich von Protonenstrahlen nur durch eine zweimal so große Masse der Teilchen unterscheiden; diese Strahlen werden als *Deuteronenstrahlen* bezeichnet.

§ 191. Die Wilson-Kammer. Die wichtigste experimentelle Methode, die die Wahrnehmung materieller Urteilchen ermöglicht, wurde im Beginne des 20. Jahrhunderts von C. T. R. Wilson geschaffen. Wilson ging von der Erfahrungstatsache aus, daß in Luft, die unter den Taupunkt abgekühlt wird, die also „übersättigten“ Wasserdampf enthält, *Gasionen* als *Kondensationskerne* für den Wasserdampf wirken. Auf diese Tatsache gründete Wilson zunächst eine Methode der *Photographie* der *Ionen*, wobei natürlich nicht die Ionen selbst, sondern die sie umgebenden entstandenen Tröpfchen zur Abbildung gelangen.

Eine Erweiterung dieser Methode ermöglichte dann Wilson auch die photographische Aufnahme der Bahnen elektrisch geladener Urteilchen. Auf ihrem Wege durch die Luft oder ein anderes Gas erzeugen nämlich solche Teilchen Ionen; erfolgt die Photographie so rasch, daß sich die Ionen im Augenblick der Aufnahme noch an denselben Stellen befinden, an denen sie gebildet wurden, so wird bei geeigneter Beleuchtung eine scharfe Bahnspur

erkennbar. Obwohl die Teilchen selbst, wie man anderweitig erkannte, nur einen Durchmesser von etwa 10^{-13} cm haben, offenbart sich derart durch Wilsons Kunstgriff ihre Bahnspur in einer Breite von einigen Zehntelmillimetern.

Die Wilson-Kammer, die solchen Aufnahmen dient, besteht aus einem Kasten, der eine außerordentlich rasche Expansion und damit eine sofortige Abkühlung der Luft ermöglicht. Die Wände gestatten den zu photographierenden Teilchen den Durchtritt, sind aber soweit durchsichtig, daß durch sie photographiert werden kann. Die Beleuchtung zum Zwecke der Aufnahme erfolgt durch einen elektrischen Funken, der durch die Expansion mittels einer geeigneten Koppelung ausgelöst wird.

§ 192. Die Kerne der Atome. Wie die Wilsonschen Photographien der Bahnen von α -Teilchen zeigten (Abb. 77), sind diese Bahnen geradlinig und hören plötzlich auf; in vielen Fällen zeigen sie aber knapp vor dem Ende einen scharfen Knick um einen beträchtlichen Winkel. Nun durchdringen aber die α -Teilchen gewöhnliche Luft auf eine Entfernung von einigen Zentimetern, und daraus muß geschlossen werden, daß ein α -Teilchen durch viele Tausende von Atomen hindurchgeht. Die Wilsonschen Photographien ließen also erkennen, daß im allgemeinen die α -Teilchen trotz ihrer positiven Ladung die Atome ohne jede Richtungsänderung durchqueren und daß nur in Ausnahmefällen eine sehr stark ablenkende Kraft das α -Teilchen aus seiner Richtung wirft. Da elektrostatische Kräfte im umgekehrt quadratischen Verhältnis mit der Entfernung abnehmen, ergab sich so aus den Wilsonschen Aufnahmen die Erkenntnis, daß jedes Atom einen *positiv* elektrischen Kern enthält, der nur einen winzigen Bruchteil des Gesamtvolumens des Atoms erfüllt.

Da nach außen die Atome unelektrisch sind, muß man annehmen, daß die positive Kernladung durch *Elektronen* kompensiert ist, die den Kern umgeben, und daß die elektrische Anziehung zwischen diesen Elektronen und dem entgegengesetzt geladenen Kern durch die Zentrifugalkraft rascher *Umlaufbewegungen* der Elektronen ausgeglichen ist. So ergibt sich das von Rutherford 1911 aufgestellte *Atommodell*, das die Atome mit winzigen *Planetensystemen* vergleicht, in denen dem Kern die Rolle der Sonne zukommt.

Beträgt die positive Kernladung Z Elementarquanten, so müssen natürlich im neutralen Zustand des Atoms auch Z Planetenelektronen den Kern umgeben. Nach einer für die Atomphysik fundamentalen, 1913 von van den Broek aufgestellten Annahme wird die *Kernladungszahl* für jeden Grundstoff mit dessen che-

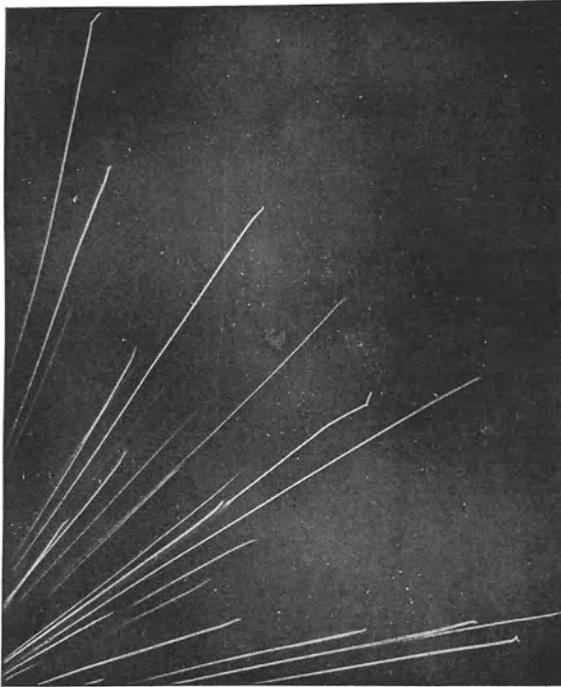


Abb. 77. Bahnen von α -Teilchen (nach Wilson).

mischer *Ordnungszahl* im Sinne der Moseleyschen Reihe identifiziert. Es sind also beispielsweise im Eisenatom 26, im Goldatom 79 Planetenelektronen anzunehmen. Die Richtigkeit der Annahme van den Broeks wurde unmittelbar durch Versuche Chadwicks über den Durchgang von α -Strahlen durch Metallfolien bestätigt. Bei diesem Vorgang erfahren nämlich die einzelnen α -Teilchen infolge ihrer positiven Ladung durch die ebenfalls positiv elektrischen Atomkerne Abstoßungen, so daß aus der Größe der Streuung die Ladungen der Kerne berechnet werden konnten.

§ 193. Die Isotopie. Da der chemische Charakter eines Atoms nach dem vorhin Gesagten nur von seiner Kernladung abhängt, andererseits aber die Kerne aus verschiedenartigen Bausteinen zusammengesetzt sein können (z. B. aus Protonen und Neutronen), können zwei Atome auch bei verschiedener Struktur das gleiche chemische Verhalten zeigen, wofern nur die *resultierende Kernladung* in beiden Fällen dieselbe ist. Derart ergibt sich die Möglichkeit, daß zwei Stoffe trotz *verschiedenen Atomgewichtes* dennoch nur verschiedene *Arten* eines und desselben *Elementes*, daß sie sogenannte *Isotope* darstellen.

Die Zusammensetzung eines Grundstoffes aus Arten verschiedenen Atomgewichtes wurde, nachdem Soddy auf diese Möglichkeit auf Grund von Erfahrungen an radioaktiven Stoffen hingewiesen hatte, zuerst an dem Beispiel des Edelgases *Neon* von J. J. Thomson im Jahre 1913 entdeckt. Thomson bediente sich dabei der sogenannten *positiven Strahlen*, die in Entladungsröhren bei genügender Verdünnung neben den Kathodenstrahlen auftreten und aus positiv geladenen Atomen des in der Röhre enthaltenen Gases bestehen. Sie gehen teils von der Anode als sogenannte Anodenstrahlen aus, teils auch von der Kathode, aber dann natürlich in entgegengesetzter Richtung wie die Kathodenstrahlen selbst. Zur Ermöglichung des Austrittes wird die Kathode in der Form kleiner Kanäle durchbohrt, weshalb die von ihr ausgehenden positiven Strahlen als *Kanalstrahlen* bezeichnet werden. Da in einem elektrischen und magnetischen Felde positive Strahlen ganz ähnlich wie Kathodenstrahlen abgelenkt werden und der Grad der Ablenkung von der Masse abhängt, konnte Thomson getrennte photographische Spuren der Isotopen erhalten. So vermochte er festzustellen, daß das Neon, dessen praktisches Atomgewicht 20,2 beträgt, eine Mischung aus zwei Isotopen von den ganzzahligen Massen 20 und 22 darstellt.

§ 194. Die Massenspektroskopie. Thomsons Methode wurde 1919 von Aston zur *Massenspektroskopie* erweitert, mittels deren seitdem fast alle Elemente auf Isotopie untersucht werden konnten. In Astons Apparat werden ein elektrisches und magnetisches Feld so kombiniert, daß die durch sie hervorgebrachten Ablenkungen einander gerade entgegengesetzt sind. Hierdurch und durch einige weitere Kunstgriffe erreichte es Aston, daß alle Teilchen von gleicher Masse auf einer photographischen Platte entlang

einer geraden Linie auftreffen, die sich derart auf der Platte scharf abbildet. Abb. 78 zeigt ein Beispiel eines Massenspektrogramms.

Die Zahl der bekannten stabilen Isotope beläuft sich auf rund 250. Ein wesentlicher Unterschied besteht hinsichtlich der Isotopie zwischen den Elementen mit *ungerader* und denjenigen mit *gerader Ordnungszahl*. Erstere enthalten, wenn man Wasserstoff nicht berücksichtigt, entweder zwei Isotope oder sind sie einfach. Die „Massenzahlen“ sind dabei (wenn man von Lithium und Bor ziemlich am Anfang der Grundstoffreihe absieht) stets ebenfalls ungerade und im Falle von zwei Isotopen untereinander um zwei verschieden. Bei den Elementen mit *gerader Ordnungszahl* kommen hingegen oft zahlreiche Isotope vor, bei Zinn z. B. 10. Eine *Isotopentrennung* ist auf dem Wege der fraktionierten Destillation Gustav Hertz bei dem Neon gelungen. Auch bei Lithium, das zwei Isotope von den Massenzahlen 7 (häufiger) und 6 (seltener)



Abb. 78. Massenspektrum des Germaniums (von links nach rechts die Isotopen 70, 72, 73, 74, 76 zeigend; nach Bainbridge).

enthält, ist durch Ausgestaltung des analytischen massenspektroskopischen Verfahrens zu einem präparativen die Isotopentrennung gelungen.

Die Massenspektroskopie beschränkt sich nicht auf die Feststellung der Isotopen eines Grundstoffes; sie mißt auch die relative Häufigkeit der Isotope innerhalb der Grundstoffe und trachtet vor allem, auch die Isotopengewichte mit allergrößter Genauigkeit zu bestimmen. Dies ist in der Tat so weit gelungen, daß bei den leichteren Elementen im allgemeinen noch die dritte, unter Umständen sogar noch die vierte Dezimalstelle des Isotopengewichtes sicher angegeben werden kann.

Die *Abweichungen* der genauen Isotopengewichte von der *Ganzzahligkeit* sind nur gering, wie es ja nicht anders zu erwarten ist, wenn sich die Kerne aus Protonen und Neutronen von den Massenzahlen 1 zusammensetzen. Die kleinen Abweichungen der Isotopengewichte von den ganzen Zahlen sind auf den Satz von der Masse der Energie (§ 103) zurückzuführen. Mittels der Massenspektroskopie konnten Isotope noch nachgewiesen werden, wenn ihre relative Häufigkeit einige Zehntausendstel nicht übersteigt.

Zu den interessantesten Entdeckungen auf dem Gebiete der Isotopie gehörte die Auffindung der Isotope des Sauerstoffs und des Wasserstoffs. Im *Sauerstoff* sind, wie man zunächst auf optisch-spektroskopischem und dann auch auf massenspektroskopischem Wege feststellte, zwei Nebenisotope von den Massenzahlen 18 und 17 enthalten, ersteres mit einer relativen Häufigkeit von 1 : 500, letzteres von 1 : 2500. Wasserstoff enthält, wie 1932 Urey entdeckte, ein Nebenisotop von doppelter Masse, den „*schweren Wasserstoff*“ von der Massenzahl 2 in einer Beimengung von 1 : 5000. Auf elektrochemischem Wege ist es gelungen, dieses auch als Deuterium (D) bezeichnete Nebenisotop abzutrennen und hierbei festzustellen, daß „*schweres Wasser*“ (D_2O) eine um 11% höhere Dichte als gewöhnliches Wasser hat, bei $+3,8^{\circ}$ gefriert, bei $101,4^{\circ}$ siedet und die höchste Dichte bei $11,6^{\circ}$ aufweist. 1934 konnte innerhalb des Deuteriums ein noch schwereres Wasserstoffisotop von *dreifacher* Masse massenspektroskopisch nachgewiesen werden; in gewöhnlichem Wasserstoff dürfte seine Häufigkeit nur 10^{-9} betragen.

§ 195. Der radioaktive Kernzerfall. Als eine durch spontanen Kernzerfall bedingte Abspaltung von Urteilehen stellt sich vom modernen atomphysikalischen Standpunkte aus die Erscheinung der *Radioaktivität* dar, die 1896 von Becquerel entdeckt wurde. Durch Zufall stellte dieser Forscher fest, daß Verbindungen des Metalls Uran ohne jede Einwirkung von außen ständig Strahlen aussenden, die eine photographische Platte durch eine undurchsichtige Hülle hindurch schwärzen, die Luft leitend machen und dadurch ein in der Nähe befindliches, geladenes Elektroskop entladen.

1898 entdeckten dann Pierre und Marya Curie, daß in der Pechblende, aus der das Uran gewonnen wird, in sehr geringer Menge ein bis dahin unbekannt gewesenes Element enthalten ist, das eine noch millionenmal intensivere Strahlung als das Uran selbst aussendet und das sie als *Radium* zu isolieren vermochten.

Die nähere Untersuchung der von dem Uran oder Radium oder anderen „*aktiven*“ Stoffen ausgehenden Strahlung zeigte, daß sie im allgemeinen im Magnetfeld in drei verschiedene Strahlenarten zerlegt werden kann. Ein Teil, die schon erwähnte α -Strahlung, wird schwach und im Sinne einer positiven Ladung abgelenkt,

ein anderer Teil, die sogenannten β -Strahlen, stark und im Sinne einer negativen Ladung; die genauere Beobachtung ergab, daß sich die β -Strahlen aus Elektronen von enormen Geschwindigkeiten, bis zu 99,7% der Lichtgeschwindigkeit, zusammensetzen. Die dritte Art von Strahlen, die auch schon erwähnten γ -Strahlen, werden nicht abgelenkt und erweisen sich als besonders kurzwellige Röntgenstrahlen. Die Anfangsgeschwindigkeiten der α -Strahlen, die zwischen 5 und 8% der Lichtgeschwindigkeit liegen, stellen für die strahlenden Stoffe charakteristische Konstanten dar. Bei dem Durchgang durch Luft oder andere Substanzen hört die Wirksamkeit der α -Strahlen nach Zurücklegung einer bestimmten, als *Reichweite* bezeichneten Strecke plötzlich auf; für Luft beträgt sie bei den verschiedenen strahlenden Stoffen zwischen $2\frac{1}{2}$ und $11\frac{1}{2}$ cm.

Aus der Vorstellung des elektrischen Aufbaus der Atome ergibt sich ohneweiters die Folgerung, daß radioaktive Strahlung stets mit einer *Grundstoffumwandlung* verbunden sein muß; diese Annahme wurde 1902 von Rutherford und Soddy begründet. Je nachdem, ob das zerfallende Atom ein α - oder ein β -Teilchen ausstößt,¹ ergeben sich zwei Arten von Umwandlungen; eine α -Umwandlung muß (wegen der Ladung + 2 und der Masse 4) die Ordnungszahl um 2 und das Atomgewicht um 4 erniedrigen, eine β -Umwandlung hingegen ohne merkliche Veränderung des Atomgewichtes eine Erhöhung der Ordnungszahl um 1 herbeiführen.

§ 196. Die Umwandlungsreihen. Die Physik kennt gegen 40 natürliche radioaktive Elemente. Wie ihre nähere Erforschung zeigte, lassen sie sich, von wenigen Ausnahmen abgesehen, derart in drei Umwandlungsreihen einordnen, daß jedes Element einer Reihe aus dem ihm in der Reihe vorangehenden entweder durch eine α - oder eine β -Umwandlung entsteht. Jedes der Elemente ist dabei durch eine bestimmte *Halbwertszeit* charakterisiert, nach deren Ablauf eine gegebene Menge des Stoffes durch die fortschreitende Umwandlung auf die Hälfte reduziert ist. Die Halbwertszeit kann durch Beobachtung der Abnahme der Strah-

¹ Die β -Teilchen dürften allerdings, wie man seit der Entdeckung des Neutrons und Positrons annimmt, nicht als solche im Kerne enthalten sein, sondern erst infolge eines sekundären Prozesses fortgeschleudert werden.

lungsintensität oder durch direkte Zählung der ausgeschleuderten Teilchen ermittelt werden, oder schließlich auch auf Grund der Tatsache, daß, im Falle des Gleichgewichtes zwischen einer Mutter- und einer Tochtersubstanz, sich die Mengen beider so wie ihre Halbwertszeiten verhalten.

Die wichtigste Umwandlungsreihe ist die *Uran-Radium-Reihe*, die von dem Uran-I (Halbwertszeit $T = 4,5 \cdot 10^9$ Jahre) ausgeht. Aus ihm geht durch drei α - und zwei β -Umwandlungen das Radium ($T = 1600$ Jahre) hervor, und aus diesem durch α -Umwandlung das *Radon* (oder Radiumemanation) mit einer Halbwertszeit von 3,8 Tagen. Aus dem Radon gehen dann der Reihe nach verschiedene kurzlebige Stoffe hervor, die man als Radium *A, B, C, D, E, F* bezeichnet. Radium *F*, das eine Halbwertszeit von 136 Tagen hat, ist als Polonium bekannt. Aus ihm bildet sich durch α -Umwandlung ein nicht mehr radioaktiver, also stabiler Grundstoff, der ein Bleisotop darstellt und Uranblei genannt wird.

Da die α -Teilchen infolge der Ladung $+2e$ mit Kernen des chemischen Elementes von der Ordnungszahl 2, also Helium identisch sind, führt die α -Emission durch Radium in einem geschlossenen Gefäß zu *Heliumbildung*. Die Messung des entstandenen Heliumvolumens bestätigte, daß die Zahl der aus 1 mg Radium in einem Jahre gebildeten Heliumatome mit der direkt zählbaren Menge der jährlich von dem Milligramm Radium emittierten α -Teilchen übereinstimmt.

Von einer gegebenen Menge Uran zerfällt 1% in ungefähr 80 Millionen Jahren. Aus dem Gehalt der Uranminerale an Uranblei, dem stabilen Endprodukt der Umwandlungskette, konnte somit das *Alter der Mineralien* bestimmt werden, wobei Werte bis zu 2 Milliarden Jahren festgestellt wurden.

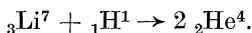
Vielerlei Ähnlichkeit mit der Uranreihe weisen die beiden anderen Umwandlungsreihen auf, nämlich die von dem Thorium und die von dem Aktinium ausgehenden Reihen. Beide schließen ebenfalls mit einem bestimmten Bleisotop als Endprodukt. Außerhalb der drei Reihen sind als radioaktive Stoffe noch Kalium, Rubidium und Samarium bekannt. Die Halbwertszeiten der Radioelemente reichen von etwa 10^{-9} sec bis zu 10^{12} Jahren.

§ 197. Die künstlichen Kernumwandlungen. Von den spontan eintretenden Umwandlungen radioaktiver Elemente unterscheiden

sich die „künstlichen“ Grundstoffumwandlungen nicht nur dadurch, daß sie von außen her herbeigeführt werden müssen, sondern auch dadurch, daß bei ihnen ein in den Kern als „*Geschosß*“ eindringendes Teilchen *eingefangen* wird und erst der dadurch veränderte Kern zerfällt. Als Geschosse kommen vor allem α -Teilchen, Protonen, Deuteronen (Kerne des schweren Wasserstoffs) und Neutronen in Betracht.

Die durch α -*Teilchen* herbeigeführten Umwandlungen sind die am längsten bekannten. Daß durch α -Teilchen *Stickstoffkerne* unter Fortschleuderung von Protonen zertrümmert werden, wurde bereits 1919 von Rutherford entdeckt. Später wurde die Zertrümmerbarkeit durch α -Strahlen noch bei einer Reihe anderer Grundstoffe festgestellt, besonders stark bei Natrium, Aluminium und Phosphor. Da die Kerne nur einen verschwindend kleinen Bruchteil des Atomvolumens einnehmen, ist auch für ein einzelnes α -Teilchen die Wahrscheinlichkeit des Eindringens in einen Kern sehr gering, kaum viel größer als 10^{-6} . Daher vermögen die stärksten verfügbaren radioaktiven Präparate, die in der Sekunde etwa 10^9 α -Teilchen aussenden, höchstens rund tausend Atomkerne zu zertrümmern.

Wesentlich stärkere Wirkungen lassen sich mittels künstlich erzeugter *Protonenstrahlen* erzielen. Cockcroft und Walton gewannen in einer besonders konstruierten Entladungsröhre aus Wasserstoffgas Kanalstrahlen von solcher Mächtigkeit, daß sie in der Sekunde Hunderttausende von Atomen umzuwandeln vermochten. Dies gelang ihnen zuerst 1932 bei *Lithium*, wobei sie feststellten, daß die getroffenen Lithiumkerne in je zwei α -Teilchen, also Heliumkerne zerfallen. Man kann diese Umwandlung durch eine chemische Reaktionsformel beschreiben, wobei man jeden Stoff, auch das Geschosß, durch einen unteren, die Kernladungszahl darstellenden, und einen oberen, die Massenzahl angegebenden Index kennzeichnet; für die Umwandlung des Lithiums ergibt sich dann die Formel

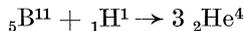


In dieser Formel ist in der Tat, wie es ja ganz allgemein bei allen Kernreaktionen erwartet werden muß, sowohl für die unteren als auch für die oberen Indizes auf beiden Seiten die *Summe gleich*.

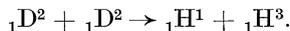
Die Energie, die die Protonen bei diesen Kernumwandlungen hatten, waren wesentlich geringer als die Energien von α -Teilchen. In der Atomphysik benutzt man gewöhnlich als Einheit der Energie die Arbeit, die ein Elektron bei dem Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt leistet. Diese Einheit wird als *Elektronvolt* (eV) bezeichnet; für ihr Millionenfaches (das Elektronmegavolt) wird das Symbol eMV gebraucht. 1 eMV ist gleich $1,591 \cdot 10^{-6}$ Erg, wie aus dem Werte des elektrischen Elementarquantums bei Berücksichtigung der Tatsache folgt, daß ein Volt der 300. Teil der elektrostatischen absoluten Spannungseinheit ist. Während natürliche α -Teilchen eine Energie von 3—4 eMV haben, kamen überraschenderweise Cockcroft und Walton bei ihren Experimenten mit Protonenenergien von nur etwas über 100 000 eV aus.¹

Das Verfahren von Cockcroft und Walton wurde vor allem von Rutherford und dessen Mitarbeitern vervollkommenet. Zugleich entwickelte in Amerika Lawrence ein Verfahren, bei dem, ohne daß besonders hohe elektrische Spannungen benötigt werden, einzelne Protonen und Deuteronen mit Hilfe elektrischer Wechselfelder und starker Magnete auf Energien von mehreren eMV gebracht werden.

Unter den mannigfachen Kernreaktionen, die sich durch Protonen- und Deuteronenstrahlen herbeiführen ließen, seien nur kurz als die wichtigsten noch die folgenden erwähnt: Zerfall von Borkernen in drei α -Teilchen nach der Formel



und Zertrümmerung von schweren Wasserstoffkernen durch Deuteronen unter Bildung von je einem Proton und je einem Kern des dreifach schweren Wasserstoffs nach der Formel



Bei der Reaktion zwischen zwei Deuteronen kann es aber auch zu der Bildung eines Heliumkernes von dreifacher Masse und eines Neutrons kommen.

Eine Kernreaktion von besonderer Wichtigkeit ist schließlich diejenige, die bei dem Bombardement von *Beryllium* mit α -Strahlen beobachtet wird; es kommt dann zu der Bildung von Kohlenstoffkernen unter Fortschleuderung von *Neutronen*, die

¹ Dies erscheint durch sogenannte wellenmechanische Resonanz begründet.

eine Durchschnittsenergie von 5 eMV und Höchstenergien bis über 14 eMV aufweisen. Neutronen entstehen auch bei dem Aufprall von Deuteronen auf Substanzen, indem sich die Deuteronen, wenn ihre kinetische Energie 2 eMV übersteigt, in Protonen und Neutronen spalten.

§ 198. Die experimentelle Bestätigung des Satzes von der Eigenenergie. Setzt man in der ersten, das Lithium betreffenden Reaktionsformel des § 197 die genau bekannten Atomgewichte von Li^7 (7,0170), H^1 (1,0081) und He^4 (4,0034) ein, so ergibt

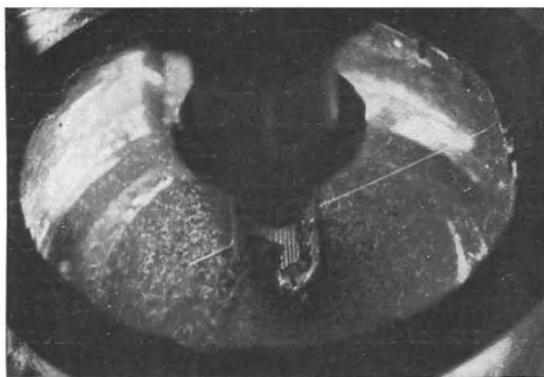


Abb. 79. Zertrümmerung eines Lithiumatoms (nach Dee).

die Formel einen scheinbaren *Massenverlust* von 0,0181 Atomgewichtseinheiten. Da die Eigenenergie eines Wasserstoffatoms (Produkt aus seiner Masse und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit) gleich ist $1,496 \cdot 10^{-3}$ Erg und nach § 197 ein eMV gleich ist $1,591 \cdot 10^{-6}$ Erg, so entspricht der tausendste Teil einer Atomgewichtseinheit ungefähr 1 (genauer 0,94) eMV. Nach dem Satze von der *Eigenenergie* und dem Prinzip der Energieerhaltung muß daher im Falle der Lithiumumwandlung ein dem scheinbaren Massenverlust äquivalenter Energiegewinn von zirka 18, genauer 17 eMV resultieren.

Aus den Photographien, die von der Lithiumzertrümmerung mittels der Wilson-Kammer gemacht wurden, ging nun in der Tat hervor, daß die α -Teilchen, die als Lithiumatomtrümmer beobachtet werden und die in entgegengesetzten Richtungen paarweise fortfliegen (Abb. 79), eine Reichweite von 8,4 cm haben,

was einer Energie von 8,6 eMV entspricht. Ein Paar von α -Teilchen hat also in der Tat diejenige Energie, die im Sinne des Satzes von der Eigenenergie das Äquivalent des scheinbaren Massenverlustes der Kernreaktion darstellt.

§ 199. Die künstliche Radioaktivität. Wie 1934 Irène Curie und Joliot entdeckten, kann es bei Kernreaktionen auch zu der Bildung *instabiler Grundstoffisotope* kommen, die nach Art der bekannten Radioelemente *zerfallen*. Auf solche Weise bildet sich z. B., wie Curie und Joliot fanden, aus Aluminium, das der Einwirkung von α -Strahlen ausgesetzt ist, ein aktiver Stoff, der eine Halbwertszeit von $2\frac{1}{2}$ Minuten aufweist und das chemische Verhalten von Phosphor zeigt.

Noch in zahlreichen anderen Fällen konnte unter der Einwirkung von α -Teilchen, Protonen und Deuteronen die Bildung künstlicher Radioelemente nachgewiesen werden, deren chemischer Charakter durch chemische Methoden festgestellt werden konnte. Vor allem aber konnte Fermi zeigen, daß durch Bombardement mit *Neutronen* die meisten Grundstoffe „aktiviert“ werden können; d. h. es bilden sich infolge von Kernreaktionen in ihnen Atome bestimmter instabiler Grundstoffarten, die mit genau angebbaren Halbwertszeiten zerfallen, und zwar durchwegs unter β -Emission.

Die künstlichen Radioelemente weisen durchwegs Massenzahlen auf, die keinem bekannten stabilen Isotop zukommen und die gewöhnlich entweder kleiner als die kleinste oder größer als die größte, sonst bei dem Element festgestellte Massenzahl sind. Im ersten Fall werden *Positronen*, im zweiten hingegen negative *Elektronen* seitens des Radioelementes emittiert. Am langlebigsten ist unter den bisher bekanntgewordenen künstlichen Radioelementen, und zwar mit einer Halbwertszeit von 13 Tagen, ein Phosphor-Isotop mit der Masse 32 (gewöhnlicher Phosphor hat die Masse 31). Selbst in den günstigsten Fällen belief sich jedoch bisher die Ausbeute an radioaktiver Substanz nur auf etwa 10^{10} Atome, was etwa 10^{-13} g entspricht. Durch Aktivierung des Urans mit Neutronen gelang — im Anschluß an frühere Beobachtungen Fermis — im Jahre 1936 Hahn, Meitner und Straßmann die Entdeckung der Elemente mit den Ordnungszahlen 93—96; sie erwiesen sich als radioaktive Homologe von Rhenium, Osmium, Iridium und Platin.

§ 200. Die Materialisation des Lichtes. Die Eigenenergie eines Elektrons beträgt ungefähr $\frac{1}{2}$ eMV. Wie nun 1933 Irène Curie und Joliot sowie andere Forscher entdeckten, vermag ein *Lichtquant*, dessen Energie 1 eMV übersteigt, durch sein Verschwinden *Materie* in Form eines *Elektronenpaars*, nämlich negatives Elektron plus positives Elektron, ins Leben zu rufen (vgl. Abb. 80). Daß nur die Bildung eines Paares mit entgegengesetzten Ladungen möglich ist, erklärt sich dabei aus dem Prinzip der Erhaltung der Elektrizität (§ 136). Der Überschuß an Energie, den das erzeugende Lichtquant über die erforderliche Million eV aufweist, wird, in Bestätigung des Satzes von der Eigenenergie, als kinetische Energie des erzeugten Elektronenpaares erkennbar. In Übereinstimmung mit dem Satze von der Eigenenergie konnte

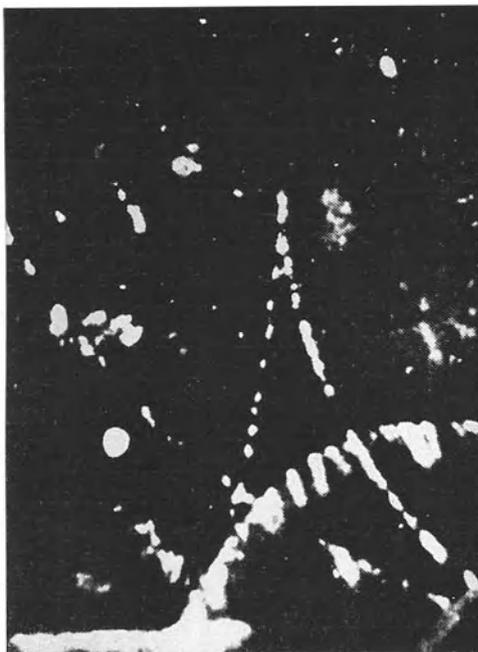


Abb. 80. Erzeugung eines Elektronenpaares durch ein Lichtquant (nach I. Curie und F. Joliot).

im Experiment auch der entgegengesetzte Vorgang festgestellt werden; bei dem Verschwinden der nur kurzlebigen Positronen treten Lichtquanten auf, deren Energie $\frac{1}{2}$ eMV beträgt.

§ 201. Die kosmische Ultrastrahlung. Im Jahre 1912 entdeckte Heß eine außerordentlich durchdringende Strahlung, die in größeren Höhen viel intensiver als auf dem Erdboden ist und von der schon damals Heß vermutete, daß sie aus dem Weltraum zur Erde gelange. Unabhängig von Heß wurde diese sogenannte kosmische *Ultrastrahlung* auch von Kolhörster entdeckt. Die spätere genauere Untersuchung ließ erkennen, daß die

Strahlung Hunderte von Metern dicke Wasserschichten zu durchdringen vermag; etwa 1% der Strahlung findet sich sogar noch in 1000 m Wassertiefe, so daß diese Komponente fast 100 m dicke Stahlplatten zu durchschlagen imstande ist.

Wie um 1930 Clay sowie Compton entdeckten, hängt die Intensität der Strahlung in gegebener Höhe wesentlich von der geographischen Breite ab. Dieser sogenannte *Breiteneffekt* läßt sich nur so erklären, daß die Strahlung aus elektrisch geladenen Teilchen zusammengesetzt ist, deren Bewegung durch den Erdmagnetismus beeinflußt wird. Die weitere Untersuchung ließ dann auch erkennen, daß der Einfall der Teilchen aus *westlicher* Richtung über den Einfall aus östlicher Richtung überwiegt. Aus diesem sogenannten *Azimutaleffekt* konnte geschlossen werden, daß die Ultrastrahlung im wesentlichen aus *positiv geladenen* Teilchen besteht. Die Energie dieser Teilchen ergibt sich im Durchschnitt zu etwa $(3-20) \cdot 10^9$ eV; doch kommen auch Teilchen mit Energien bis zu 10^{12} eV vor.

§ 202. Die Atomhüllen. Die positiv elektrischen Kerne sind, wie schon erwähnt wurde, von Atomhüllen umgeben, die sich im normalen Atomzustand aus ebensoviel negativ elektrischen *Elektronen* zusammensetzen, als die Kernladungszahl beträgt. Über die Struktur der Atomhüllen gewährten die optischen Spektren und die Röntgenspektren die wichtigsten Aufschlüsse.

Die theoretische Deutung der spektroskopischen Erfahrungstatsachen führte zu der Erkenntnis, daß sich die Elektronen zu bestimmten *Gruppen* und innerhalb dieser wieder zu *Untergruppen* anordnen, von denen jede mit einer ganz bestimmten Elektronenzahl voll *besetzt* erscheint. Man unterscheidet, gemäß der Terminologie der Röntgenspektren, eine *K*-, *L*-, *M*-, *N*-Gruppe usw. und, gemäß den Bezeichnungen der optischen Terme, eine *s*-, *p*-, *d*-, *f*-Untergruppe und so fort; diese Untergruppen sind mit 2 bzw. 6, 10 und 14 Elektronen voll besetzt. Die *K*-Gruppe enthält nur eine *s*-Untergruppe, die *L*-Gruppe vermag eine *s*- und eine *p*-Untergruppe zu vereinigen, die *M*-Gruppe ist voll besetzt, wenn sie eine *s*-, *p*- und *d*-Untergruppe umfaßt, und die *N*-Gruppe erst, wenn noch eine *f*-Untergruppe hinzukommt. So ist die *K*-Gruppe mit 2, die *L*-Gruppe mit 8, die *M*-Gruppe mit 18 und die *N*-Gruppe mit 32 Elektronen komplett. Im all-

gemeinen ist die *K*-Gruppe dem Kerne am nächsten; dann kommt, bereits weiter weg, die *L*-Gruppe, noch weiter die *M*-Gruppe und so fort.

Die Röntgenspektren erscheinen durch Elektronenübergänge hervorgerufen, die sich in den *kernnahen* Gruppen abspielen, die optischen Spektren hingegen durch Vorgänge, die in den kernfernen, *peripheren* Gruppen vor sich gehen. Für die leichtesten Elemente, die nicht so viele Gruppen enthalten können, vermischt sich daher die Unterscheidung zwischen Röntgen- und optischen Spektren.

§ 203. Die chemische Periodizität. Von den peripheren Elektronen, also der im allgemeinen unvollständigen äußersten Elektronengruppe hängt die chemische Aktivität der Atome ab; die peripheren Elektronen werden darum auch als *Valenzelektronen* bezeichnet. So erklärt sich die bereits 1869 von Lothar Meyer und Mendelejeff entdeckte chemische Periodizität; man versteht darunter die Tatsache, daß sich in einer nach steigendem Atomgewicht, also, wie man heute genauer sagt, nach wachsender Kernladungszahl gebildeten Grundstoffreihe charakteristische chemische und physikalische Eigenschaften periodisch wiederholen und infolgedessen, wenn man die einzelnen Perioden untereinander schreibt, eine Anordnung möglich ist, bei der in den einzelnen Vertikalreihen einander ähnliche Elemente verzeichnet sind. Die moderne Darstellung des *periodischen Systems* ist unter Angabe der Kernladungszahlen aus der beigefügten Tabelle (S. 188) ersichtlich; aus ihr erkennt man auch die fundamentale Rolle, die im System den vorhin angeführten Zahlen 2, 8, 18 und 32 zukommt.

§ 204. Die Elektronenstöße. Unabhängig von den spektroskopischen Erfahrungstatsachen, haben auch durch rein *elektrische* Versuche Franck und Gustav Hertz im Jahre 1913 nachgewiesen, daß ein Atom nicht beliebige, sondern nur ganz bestimmte Energiebeträge aufnehmen kann. Franck und Hertz sandten mittels einer geeigneten Versuchsanordnung langsamere *Elektronen* durch ein Gas oder einen Dampf, dessen Atome untersucht werden sollten. Dadurch kam es zu *Zusammenstößen* zwischen den Elektronen und den Atomen. Es zeigte sich nun, daß, solange die Elektronenenergie unterhalb eines kritischen Wertes bleibt, nur „*elastische*“ Stöße auftreten, nämlich nur solche, bei denen die Elektronen keine Energie an die Atome abgeben.

Tabelle. Das periodische System der Grundstoffe.

	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	1 H															2 He	
2	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F									10 Ne	
3	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl									18 Ar	
4	19 K 29 Cu	20 Ca 30 Zn	21 Sc 31 Ga	22 Ti 32 Ge	23 V 33 As	24 Cr 34 Se	25 Mn 35 Br									26 Fe 27 Co 28 Ni	36 Kr
5	37 Rb 47 Ag	38 Sr 48 Cd	39 Y 49 In	40 Zr 50 Sn	41 Nb 51 Sb	42 Mo 52 Te	43 Ms 53 J									44 Ru 45 Rh 46 Pd	54 X
6	55 Cs 79 Au	56 Ba 80 Hg	57—71 seltene Erden 81 Tl	72 Hf 82 Pb	73 Ta 83 Bi	74 W 84 Po	75 Re 85									76 Os 77 Ir 78 Pt	86 Em
7	87	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Eka-Re									94 Eka-Os 95 Eka-Ir 96 Eka-Pt	

Erst nach Überschreiten dieses kritischen Wertes ereignen sich auch unelastische Stöße, bei denen ein Atom von einem Elektron Energie übernimmt.

Aus den Experimenten ging somit deutlich hervor, daß ein Atom — wenigstens im normalen Zustand — keinerlei Energiebetrag aufzunehmen vermag, der unterhalb eines gewissen Minimums liegt. Dieses wird als *Anregungsenergie* bezeichnet, und diejenige Spannung, die ein Elektron zur Erlangung dieser Energie benötigt, die Anregungsspannung genannt. Sie beträgt für die meisten Grundstoffe einige wenige Volt. Mit großer Genauigkeit erweist sich die für die Atomphysik grundlegende theoretische Beziehung erfüllt, wonach die Anregungsenergie gleich ist dem Produkte aus dem elementaren Wirkungsquantum und der Frequenz derjenigen Linie, der im Spektrum des Grundstoffs die größte Intensität zukommt.

Sehr genau konnte durch Elektronenstöße auch die „*Ionisierungsspannung*“ bestimmt werden, bei deren Erreichung

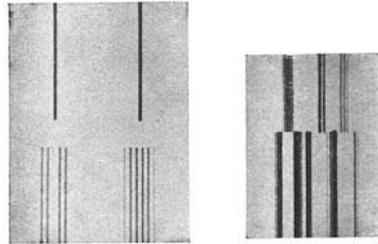


Abb. 81. Anomaler Zeeman-Effekt.

erstmalig eine Ionisierung beobachtet wird. Die Ionisierungsenergie ist natürlich stets größer als die Anregungsenergie.

§ 205. **Zeeman- und Stark-Effekt.** 1896 entdeckte Zeeman, daß in einem *Magnetfeld* eine *Aufspaltung* von *Spektrallinien* eintritt. Bei dem „normalen“ Effekt treten zu beiden Seiten der ursprünglichen Linie in gleichen Abständen noch zwei weitere Linien auf, und zwar ist die Aufspaltung der Feldstärke proportional; in Feldern von einigen zehntausend Gauß ist sie von der Größenordnung von 1 Å. Viel komplizierter als der normale ist der „*anomale*“ Zeeman-Effekt, der in schwächeren Feldern in Erscheinung tritt (Abb. 81).

1913 entdeckte Stark, daß Spektrallinien auch in einem *elektrischen Felde* aufgespalten werden (Abb. 82). Die Abstände zwischen den durch die Aufspaltung entstehenden Komponenten und der ursprünglichen Linie erweisen sich bei dem Stark-Effekt des Wasserstoffspektrums als genau *ganzzahlige* Vielfache einer und derselben Größe; doch treten nicht sämtliche ganze Zahlen

auf, sondern nur bestimmte. Welche es sind, läßt sich für die verschiedenen Linien des Spektrums auf Grund der Theorie berechnen, in bester Übereinstimmung mit dem experimentellen Befund.

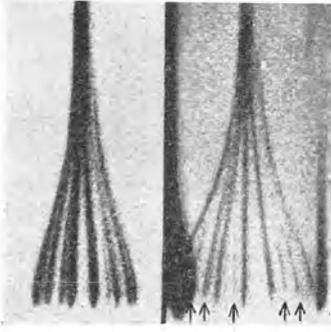


Abb. 82. Stark-Effekt in Helium (nach Foster).

m die Elektronenmasse und c die Lichtgeschwindigkeit bedeuten.

Für den Compton-Effekt ergibt sich eine mit der Erfahrung übereinstimmende theoretische Deutung, wenn man den Lichtquanten einen Impuls $\frac{h\nu}{c}$ und eine Energie $h\nu$ zuschreibt (ν die Frequenz) und annimmt, daß für Zusammenstöße zwischen

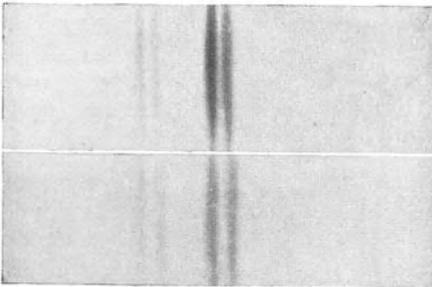


Abb. 83. Compton-Effekt (nach Kallmann und Mark).

den Lichtquanten und den locker gebundenen Elektronen leichter Atome sowohl der Satz von der Erhaltung des Impulses als auch jener von der Erhaltung der Energie gilt. Daß der Compton-Effekt nur bei Röntgenstrahlen in Erscheinung tritt, erklärt sich daraus, daß die relative Wellenlängen-

änderung bei ultraviolettem und sichtbarem Licht zu gering ist.

§ 207. Raman-Effekt und Bandenspektren. Ein für die Chemie sehr wichtiger spektroskopischer Effekt wurde 1928 durch den indischen Physiker Raman entdeckt. Als er einfarbiges Licht durch verschiedene Flüssigkeiten sandte, fand er in dem

Spektrum der *Streustrahlung* neue Linien, die gegen die primäre Strahlung Frequenzunterschiede aufwiesen, die sich als unabhängig von der primären Frequenz ergaben. Dieser sogenannte Raman-Effekt (vgl. Abb. 84) erklärt sich daraus, daß sich über die primäre Frequenz noch bestimmte der charakteristischen ultraroten „*Eigenfrequenzen*“ überlagern, mit denen die in einer Molekel verbundenen Atome gegeneinander schwingen. Die Erforschung der sogenannten Raman-Spektren hat viele wertvolle Aufschlüsse über die Struktur der Molekeln gebracht.

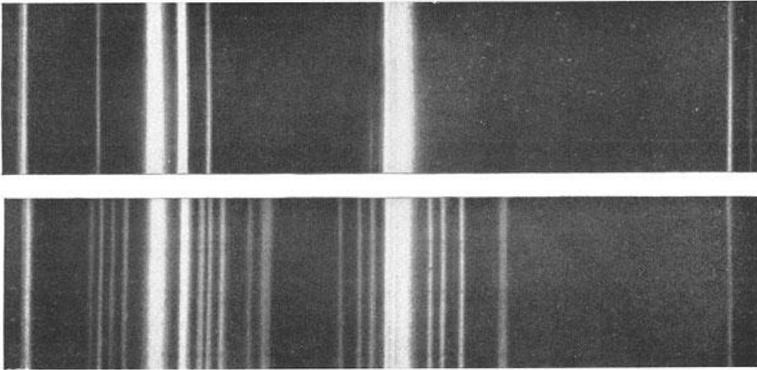


Abb. 84. Raman-Effekt.

Auf molekulare Bindungen ist auch das Auftreten der schon erwähnten *Bandenspektren* zurückzuführen. Sie sind für die Molekeln als solche charakteristisch und bestehen im sichtbaren und ultravioletten Gebiet aus zahlreichen Folgen dicht beisammenstehender Linien, die gegen sogenannte Bandenköpfe konvergieren (vgl. die frühere Abb. 59). Die richtige Deutung der Bandenspektren war ungemein kompliziert, ist aber doch um 1925 gelungen. Daß die Flammen und ebenso die elektrischen Entladungen meist reine *Atomspektren*, also Linien *ohne* Banden liefern, erklärt sich daraus, daß bei hohen Temperaturen und in starken elektrischen Feldern eine Dissoziation der Molekeln in ihre Atome eintritt.

§ 208. Die Materiewellen. Im Jahre 1924 gelangte Louis de Broglie zu der Vermutung, daß jedem bewegten *Materieteilchen* eine *Wellenlänge* (λ) zuzuordnen sei, die in derselben Weise mit dem Impuls (p) wie bei einem Lichtquant zusammenhängt (§ 116);

es soll nämlich $\lambda = \frac{h}{p}$ sein. Die Richtigkeit dieser Vermutung wurde 1927 experimentell von Davisson und Germer bestätigt. Sie konnten zeigen, daß Elektronenstrahlen von etwa 100 bis 10000 Volt bei ihrem Auftreffen auf Kristalle dieselben *Interferenz*-Erscheinungen aufweisen, wie sie seit Laue von den Röntgenstrahlen bekannt waren.

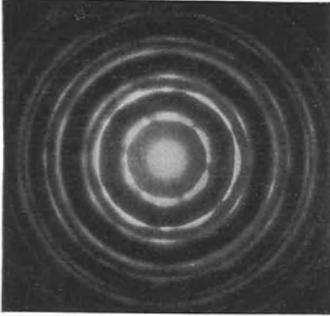


Abb. 85. Beugung von Elektronenstrahlen durch dünne Folien.

Durch mannigfache Experimente erscheint die de Brogliesche Beziehung heute für einen Geschwindigkeitsbereich von etwa 2 bis zu 75% der Lichtgeschwindigkeit mit einer Genauigkeit von ungefähr 1% bestätigt (vgl. Abb. 85). Außer an Elektronen-

strahlen wurden Beugungserscheinungen auch an Protonenstrahlen, ja sogar an Strahlen nachgewiesen, die aus *Molekeln* zusammengesetzt waren. So können heute Interferenz und Beugung von *Materiewellen* als ebenso sichere experimentelle Erkenntnisse gelten wie die analogen, längst bekannten Phänomene des Lichtes.

Namenverzeichnis.

- Abbe 85, 87, 101.
Ampère 135, 136.
Anderson 173.
Andrews 64.
Ångström 106.
Arago 98.
Archimedes 30.
Aston 176, 177.
Atwood 10.
August 64.
Avogadro 67, 73.
- Baeyer v.** 107.
Bainbridge 177.
Balmer 109.
Barkla 113.
Bartholinus 98.
Becquerel 178.
Behm 47.
Bell 45, 161.
Benson 65.
Bernoulli, D. 32.
Biot 100, 135.
Black 53, 60.
Blagden 67.
Boltzmann 117, 169.
Boyle 36.
Bradley 90.
Bragg, W. H. 112.
Bragg, W. L. 112.
Brewster 99.
Broek, van den 175.
Broglie, de, L. 191.
Broglie, de, M. 113.
Brown 72.
Bunsen 89, 104ff.
- Cagniard de la Tour 65.
Carlisle 148.
- Carnot 58.
Case 163.
Cavendish 12.
Celsius 50.
Chadwick 173, 175.
Charles 53.
Chladni 46.
Clausius 57, 71.
Clay 186.
Cockcroft 181, 182.
Compton 115, 186, 190.
Coolidge 155.
Coriolis 14.
Corti 49.
Coulomb 120, 121, 128.
Crookes 151.
Curie, I. 184, 185.
Curie, M. 178.
Curie, P. 178.
- Daguerre** 88.
Dalton 67.
Daniell 64, 146.
Davisson 192.
Davy 55, 144.
Dee 183.
Dewar 65, 66.
Diesel 70.
Doan 115.
Dollond 84.
Doppler 119.
Dufay 120.
Dulong 54, 72.
- Edison 49, 143.
Ehrenhaft 149.
Einstein 72, 92.
Elster 153.
Engel 163.

- Fahrenheit 50.
 Faraday 125, 127, 134, 148ff.,
 156.
 Feddersen 167.
 Fermi 184.
 Fizeau 90, 91, 93.
 Flettner 39.
 Forest, de 163.
 Foster 190.
 Foucault 14, 90, 91.
 Franck 187.
 Franklin 125.
 Franz 139.
 Fraunhofer 104.
 Fresnel 96, 98, 99.

Gaede 38.
 Galilei 1, 2, 7, 45, 87.
 Galvani 127.
 Gauß 131, 132, 144.
 Gay-Lussac 53.
 Geißler 37.
 Geitel 153.
 Germer 192.
 Gilbert 120, 131.
 Goldstein 152.
 Graham 40.
 Gray 121.
 Grimaldi 96.
 Guericke 37.
 Guillaume 52.

Haas, de 66.
 Hahn 184.
 Hallwachs 153.
 Hefner 89.
 Hefner-Alteneck 164.
 Helmholtz 33, 44, 56.
 Henry 39, 40.
 Herschel 88, 106.
 Hertz, G. 177, 187.
 Hertz, H. 168.
 Heß 185.
 Heusler 134.
 Higgins 119.
 Hittorf 148, 152.
 Hoff, van't 69.

 Hooke 26.
 Hughes 161.
 Huygens 28, 94, 95, 98, 99, 102.

Jansen 86.
 Joliot 184, 185.
 Joule 56, 65, 138.

Kallmann 190.
 Kamerlingh, Onnes 66, 139.
 Kaufmann 152, 153.
 Kayser 109.
 Keesom 66.
 Kepler 10, 11, 87, 89.
 Kerr 162.
 Kirchhoff 104, 105, 116, 139.
 Kohlrausch 137.
 Kolhörster 185.
 Kundt 42, 43.

Langmuir 38.
 Laue 110, 192.
 Laval, de 70.
 Lawrence 182.
 Leclanché 146.
 Lenard 153.
 Lenz 156.
 Lieben 155.
 Linde 65.
 Lorentz 92.
 Loschmidt 72.
 Lyman 108, 109.

Magnus 39.
 Malus 99.
 Marconi 169.
 Mariotte 36.
 Mark 190.
 Massolle 163.
 Maxwell 168, 169.
 Mayer, Robert 56.
 Meitner 184.
 Mendelejeff 187.
 Meyer, L. 187.
 Michelson 91ff.
 Millikan 108, 149, 150.
 Morse 144, 145.
 Moseley 113, 114.

- Nernst 60.
 Neumann 156.
 Newton 8, 11, 12, 80, 81, 88, 94,
 95, 102.
 Nicol 100.
 Niepce 88.

Oersted 33, 128, 135.
 Ohm 138.
 Otto 70.

Papin 61.
 Parsons 70.
 Pascal 29, 36.
 Paschen 109.
 Peltier 147.
 Perrin 152.
 Petit 54, 72.
 Planck 72, 92, 103, 118.
 Plücker 152.
 Poggendorff 76.
 Poiseuille 32.
 Porta 75.
 Prandtl 39.

Raman 190.
 Réaumur 50.
 Reis 161.
 Ressel 33.
 Richardson 154.
 Ritter 107.
 Ritz 108.
 Römer 90.
 Röntgen 110.
 Rosa 138.
 Rowland 106, 137.
 Rubens 107.
 Rumford 7, 89.
 Runge 109.
 Rutherford 174, 179, 181, 182.
 Rydberg 109.

 Sabine 47, 48.
 Savart 135.

 Schott 85.
 Schulze 88.
 Schumann 108.
 Seebeck 147.
 Siedentopf 102.
 Siegbahn 114.
 Siemens 163, 164.
 Snellius 78.
 Soddy 176, 179.
 Stark 189.
 Stefan 117.
 Stern 71.
 Stevin 8, 30.
 Stokes 39, 118.
 Straßmann 184.

Tesla 168.
 Thomson, J. J. 152, 153, 176.
 Thomson, W. 57, 65, 127, 167.
 Torricelli 31, 35, 36.
 Townsend 36.

Urey 178.

Vogt 163.
 Volta 127, 128.

Waals, van der 67.
 Walton 181, 182.
 Warburg 134.
 Watt 69.
 Weber 137, 144.
 Wehnelt 154.
 Weston 146.
 Wheatstone 141, 145.
 Wiedemann 139.
 Wien 117.
 Wiener 96.
 Wilson 173, 174.

Young 94, 95, 98.

Zeeman 189.
 Zsigmondy 102.

Sachverzeichnis.

- Aberration des Lichtes 90.
Absolute Temperatur 50.
Absoluter Nullpunkt 50.
Absorptionskoeffizient (von Gasen) 40.
— (von Strahlung) 116.
Absorptionsspektren 105.
Abweichung, chromatische 84.
—, sphärische 84.
Achromatische Linsen 84.
Achsen, freie 24.
Aderhaut 85.
Adhäsion 34.
Adiabatisch 57.
Adsorption 40.
Aggregatzustand 60ff.
Akkommodation 85.
Akkumulator 146, 147.
Aktivität, optische 100.
Alphastrahlen 172.
Alterssichtigkeit 86.
Ampere 136, 149.
Amplitude 7.
Analysator 100.
Ångström-Einheit 106.
Anker 163, 164.
Anode 148.
Anodenspannung 155.
Anregungsenergie 189.
Anregungsspannung 189.
Antenne 170.
Antikathode 155.
Aplanatisches System 84.
Achromat 87.
Equipotentialfläche 123.
Aräometer 31.
Arbeit 15.
Astasierungsmagnet 141.
Astatistische Nadelpaare 141.
Atmosphäre (Einheit) 36.
Atomhülle 186.
Atomkerne 174.
Atommodell 174.
AtomSchwingungen 72.
Atomstrahlen 71.
Atomwärme 54.
Audionschaltung 171.
Auflösung 68.
Auftrieb 30, 37.
Auge 85.
Ausdehnungskoeffizient 52.
Ausfluß 31.
Avogadrosches Gesetz 73.
Avogadrosche Zahl 73.
Azimutaleffekt 186.

Bandenköpfe 191.
Bandenspektren 105, 191.
Bar 45.
Barometer 36.
Barometrische Höhenmessung 36.
Basilarmembrane 49.
Batterien 147.
Beharrungsgesetz 9.
Beharrungsvermögen 2.
Beleuchtungsstärke 89.
Benetzung 35.
Benson-Verfahren 65.
Benzinmotor 70.
Betastrahlen 179.
Beugung des Lichtes 96ff.
— von Elektronen 192.
Beugungsgitter 97.
Beugungsspektren 97ff.

- Bewegungsaxiome 8, 9.
 Bewegungsgesetze 8, 9.
 Bewegungsgröße 15, 17.
 Bewegungsparallelogramm 3.
 Bifilarwicklung 158.
 Blitzableiter 126.
 Bogenlampe 144.
 Bolometer 107.
 Brechung 78.
 Brechungsexponent 78.
 Bremsung 28.
 Brennlinie 84.
 Brennpunkt 77.
 Brennweite 77, 83.
 Brownsche Bewegung 72.

 Chromatische Abweichung 84.
 — Polarisation 100.
 Compton-Effekt 190.
 Contractio venae 31.
 Coriolis-Kraft 14.
 Cortisches Organ 49.
 Coulomb (Einheit) 121.
 Coulombsches Gesetz 129.
 Curie-Punkt 134.

 Dampf 62.
 Dampfdichte 67.
 Dampfdruck 62.
 Dampfkochtopf 61.
 Dampfmaschine 69, 70.
 Dampfturbine 70.
 Dampf, überhitzter 62.
 Dämpfung 41, 47.
 Decibel 45.
 Deklination 131.
 Destillation 62.
 Detektoren 171.
 Deuterium 178.
 Deuteronen 173.
 Dewarsche Gefäße 65.
 Diamagnetismus 134.
 Dielektrikum 127.
 Dielektrizitätskonstante 127.
 Dieselmotor 70, 71.
 Diffusion 40.
 Dioptrienzahl 83.

 Dispersion 81.
 Dissoziation 148.
 Doppelbrechung 98.
 Doppelsterne 12.
 Doppler-Effekt 119.
 Drehfeld 165.
 Drehkondensator 126.
 Drehkristall 112.
 Drehspulengalvanometer 142.
 Drehstrom 165.
 Drehungsvermögen, spez. 100.
 Drosselspule 160.
 Dunkelkammer 74, 75.
 Dunkelraum 151.
 Dyn 9.
 Dynamoelektrisches Prinzip 164.
 Dynamomaschine 163.

 Ebbe 13.
 Echo 46.
 Echolot 47.
 Effekt 16.
 Eigenenergie 93, 183, 185.
 Eigenstrahlung 113.
 Eiskalorimeter 54.
 Elastizität 26.
 Elastizitätsgrenze 26.
 Elastizitätsmodul 26.
 Elektrischer Strom 135 ff.
 Elektrisches Feld 122.
 Elektrisiermaschine 126.
 Elektrizität, Erhaltung 121, 185.
 Elektrizitätsmenge 121.
 Elektrochemische Grundgesetze
 148.
 Elektrolyse 148.
 Elektromagnete 136.
 Elektromotor 165.
 Elektromotorische Kraft 138.
 Elektronen 153.
 —, positive 173.
 Elektronenbeugung 192.
 Elektronengruppierung 186.
 Elektronenstöße 187, 189.
 Elektronvolt 182.
 Elektrophor 125.
 Elektroskop 126.

- Elektrostatische Einheit 121.
 Element, galvanisches 146ff.
 Elementarquantum, elektrisches 149.
 Elementarwellen 96.
 Elevationswinkel 3.
 Elongation 7.
 Emissionslinien 105.
 Emissionsspektren 104ff.
 Emissionsvermögen 116.
 Empfangsantenne 171.
 Energie, Erhaltung 56.
 —, kinetische 15.
 —, Masse der 92.
 —, mechanische 17.
 —, potentielle 17.
 Entropie 57.
 Erdbebenpendel 25.
 Erdmagnetismus 131, 132.
 Erdrotation 14.
 Erg 16.
 Explosionsmotor 70.
 Extrastrom 157.

 Fadenpendel 7.
 Fallbeschleunigung 1.
 Fallgesetz, Stokessches 150.
 Fallmaschine 10.
 Farad 125.
 Faradaysche Konstante 148, 149.
 Federgalvanometer 160.
 Feldmagnet 163.
 Feldstärke, elektrische 122.
 —, magnetische 129.
 Fernrohr 87, 88.
 Fernsehen 172.
 Ferromagnetismus 134.
 Festigkeit 26.
 Feuchtigkeit 63.
 Fieberthermometer 51.
 Flaschenzug 21.
 Flettner-Rotoren 39.
 Fliehkraft 13.
 Flugzeug 39.
 Fluoreszenz 118.
 Flüssigkeit 29.
 Flüssigkeitsdruck 29.
 Flüssigkeitsstrahlpumpen 38.
 Flut 13.
 Formant 45.
 Foucaultsches Pendel 14.
 Franklinsche Tafel 125.
 Fraunhofersche Linien 104.
 Frequenz 41.
 Fundamentalpunkte 50.
 Funkeninduktor 167.

 Galvanometer 142.
 Gammastrahlen 113.
 Gase 35ff.
 —, ideale 67.
 Gasentladung 150ff.
 Gasgemisch 67.
 Gasionen 150.
 Gaskonstante 67.
 Gasmotor 70.
 Gastheorie, kinetische 71.
 Gasthermometer 51.
 Gasverflüssigung 64ff.
 Gauß (Einheit) 129.
 Gefrierpunkt 60.
 Gefrierpunktserniedrigung 68.
 Gegenstromapparat 65.
 Geißlersche Röhren 151.
 Geräusch 43.
 Gesättigter Dampf 62.
 Gewitterwolken 126.
 Gitterröhre 155.
 Gitterspannung 155.
 Gitterspektroskope 106.
 Glaskörper 85.
 Gleichgewicht 8, 21.
 Gleichrichter 166.
 Gleichstromgenerator 164.
 Gleitwinkel 112.
 Glimmentladung 151.
 Glimmlicht 151, 152.
 Glühelktrizität 154.
 Glühkathode 154, 155.
 Glühlampe 143, 144.
 Gramm 9.
 Gravitation 12.
 Gravitationskonstante 12.
 Grenzwellenlänge 154.

Grundstoffreihe 114.
Grundstoffumwandlungen 179.

Halbdurchlässigkeit 68.
Halbwertszeit 179.
Hauptebenen (Linse) 83.
Hauptsätze 57, 60.
Hauptserie 110.
Hauptträgheitsachsen 24.
Hebel 22.
Hefner-Kerze 89.
Helium, Bildung 180.
—, Verflüssigung 66.
Henry (Einheit) 157.
Hertz (Einheit) 44.
Hitzdrahtinstrumente 160.
Hochfrequenzgeneratoren 169.
Hochspannung 166.
Hohlspiegel 76ff.
Horizontalintensität 131.
Horizontalpendel 25.
Hydraulische Presse 29.
Hydraulischer Druck 32.
Hydrodynamik 31ff.
Hydrostatisches Paradoxon 30.
Hygrometrie 64.
Hysteresis 133.

Immersion 87.
Impuls 15.
Induktion, magnetische 133.
Induktionsgesetz 156.
Induktionsströme 156.
Induktivität 157.
Influenz 125.
Inklination 131.
Interferenz 42, 95ff.
Invar 52.
Ionen 148.
Ionisierungsspannung 189.
Irisieren 98.
Isodynamen 132.
Isogonen 132.
Isoklinen 132.
Isolatoren 121.
Isotherm 57.
Isotopie 176, 177.

Jenaer Gläser 51, 85.
Kalkspat 98.
Kalorie 53.
Kalorimeter 54.
Kältemaschine 71.
Kältemischungen 68.
Kammerton 44.
Kanalstrahlen 176.
Kapazität 125, 158, 159.
Kapillarität 35.
Kathode 148.
Kathodenschicht 151.
Kathodenstrahlen 152.
Keplersche Gesetze 10, 11.
Kernladungszahl 175.
Kerr-Zelle 162.
Kerze (Einheit) 89.
Kilogramm 16.
Kilowattstunde 138.
Kinematographie 89.
Klanganalyse 44.
Klangfarbe 44.
Koerzitivkraft 133.
Kohärenz 95.
Kohäsion 34.
Kolbenluftpumpe 37.
Kollektor 163.
Kolloidale Lösungen 102.
Kombinationstöne 48.
Kommunizierende Röhren 29.
Kompaß 128.
Kompensationspendel 52.
Kompressibilität 33.
Kompressionsmodul 27.
Kompressor 38.
Kondensation 61.
Kondensator, elektrischer 125.
— (Dampfmaschine) 69.
—, Parallelschaltung 159.
—, Serienschaltung 159.
Kondensatorschwingungen 167,
168.
Konduktoren 121.
Konsonanten 45.
Konstantan 139.
Konvektion von Wärme 55.
Konvektionsströme 137.

- Konvexspiegel 78.
 Kosmische Strahlung 185, 186.
 Kraft 8.
 Kräftepaar 20.
 Kräfteparallelogramm 8.
 Kraftgesetz 9.
 Kraftlinien 124, 134.
 Kreisbewegung 25.
 Kreiselkompaß 26.
 Kreisprozeß, thermodynamischer 58.
 Kristalle 110.
 Kristallinse 85.
 Kritische Temperatur 64.
 Kugellager 28.
 Kurzsichtigkeit 86.
 Kurzwellensender 172.

 Ladungsdichte 122.
 Längswellen 41.
 Latente Wärme 60.
 Lautsprecher 163.
 Lebendige Kraft 15.
 Leerlaufarbeit 165.
 Leidener Flasche 125.
 Leistung 16, 138.
 Leiter 121.
 Leitvermögen, elektrisches 139.
 Lenzsche Regel 156, 157.
 Leuchtbrunnen 79.
 Libelle 29.
 Licht, elektromagnetischer Natur 169.
 —, natürliches 99.
 —, polarisiertes 99.
 Lichtäther 94.
 Lichtbeugung 96ff.
 Lichtelektrischer Effekt 153.
 Lichtgeschwindigkeit 90ff., 138.
 Lichtkorpuskeln 102.
 Lichtquanten 103.
 Lichtsäule, positive 152.
 Lichtstärke 89.
 Lichtstrom 89.
 Lichtwellen, stehende 96.
 Linienspektren 104ff.
 Linsen 81ff.
- Lippenpfeifen 46.
 Lithium, Zertrümmerung 181.
 Lochsirene 43.
 Longitudinalwellen 41.
 Loschmidtsche Zahl 72.
 Lösungen 68.
 Lösungswärme 68.
 Luftdruck 35.
 Luftfeuchtigkeit 63.
 Luftpumpe 37.
 Luftverflüssigung 65.
 Luftwiderstand 38.
 Lumen 89.
 Lumineszenz 118.
 Lupe 86.
 Lux 89.

 Magnetfeld 129.
 Magnetisierung, spezifische 133.
 Magnetismus 128ff.
 Magnetismmenge 128.
 Magnetpole 128, 131.
 Magnuseffekt 39.
 Manometer 36.
 Maschine, mechanische 21.
 Masse 9.
 — der Energie 92.
 Massenmittelpunkt 17, 18.
 Massenspektroskopie 176, 177.
 Materialisation des Lichts 185.
 Materiewellen 191.
 Maxwellsche Relation 169.
 Membranen 46.
 Metalle 153.
 Metallthermometer 52.
 Michelsonscher Versuch 93.
 Mikroampere 136.
 Mikrofaraad 125.
 Mikrom 107.
 Mikrophon 161.
 Mikroskop 86.
 —, Auflösungsvermögen 101.
 Mikrowaage 22.
 Milliampere 136.
 Millimikron 107.
 Mineralien, Altersbestimmung 180.

- Mitführungskoeffizient 93.
 Modulierung 171.
 Molekulargewicht, thermometrische Bestimmung 68
 Molekularluftpumpe 38.
 Moment, magnetisches 129.
 —, statisches 19.
 Mondfinsternis 74.
 Multiplikator 142.
- Nachhall** 47.
 Nebenschluß 143.
 Nebenserien, optische 110.
 Neon, Isotopie 176.
 Nernstscher Wärmesatz 60.
 Netzhaut 85.
 Neutronen 173, 182, 183, 185.
 Newtonsche Ringe 94, 95.
 Nicolsches Prisma 100.
 Nitrobenzol 162.
 Niveaufläche 123.
 Normalelement 146.
- Oberflächenspannung** 34.
 Obertöne 44.
 Objektiv 87.
 Ohm (Einheit) 138.
 Ohr 48, 49.
 Oktave 44.
 Okular 87.
 Ordnungszahl, chemische 114, 175.
 Osmotischer Druck, 68, 69.
 Oszillator 168, 169.
- Parallelschaltung** 140, 141.
 Paramagnetismus 134, 135.
 Partialdruck 67.
 Passatwinde 55.
 Pendelbewegung 7.
 Pendel, physisches 24.
 Pendellänge, reduzierte 25.
 Periodisches System 187, 188.
 Permalloy 134, 135.
 Permeabilität 133.
 Pfeifen 46.
 Pferdestärke 16.
- Phon** 45.
 Phosphoreszenz 118.
 Photoeffekt 153.
 Photographie 88.
 Photometer 89.
 Photonen 103.
 Photostrom 154.
 Photozellen 154, 163.
 Piezometer 33.
 Planetenbewegungen 10ff.
 Planetenelektronen 175.
 Plattenkondensator 125.
 Polarisation, chromatische 100.
 Polarisation galvanischer Elemente 146.
 Polarisationsapparate 99, 100.
 Polarisationswinkel 99.
 Polarisator 100.
 Polonium 180.
 Positive Strahlen 176.
 Positronen 173.
 Potential, elektrostatisches 123.
 —, mechanisches 16.
 Prismenbrechung 79, 80.
 Prismenfernrohr 87, 88.
 Prismenspektroskopie 106.
 Protonen 173.
 Protonenstrahlen 181.
 Psychrometer 64.
- Quadrantenelektrometer** 127.
 Quarzsteuerung 170.
 Quecksilberlampe 144.
 Quecksilberluftpumpe 37.
- Radioaktivität** 178.
 Radium 178, 180.
 Radiumemanation 180.
 Radon 180.
 Raman-Effekt 190, 191.
 Raman-Spektren 191.
 Randwinkel 35.
 Raumdifferenz 110.
 Reaktanz 159.
 Reflexionsgesetz 75.
 Refraktometer 81.
 Regulierwiderstand 143.

- Reibung 28.
 —, innere 32.
 Reichweite 179.
 Relais 145.
 Remanenz 133, 164.
 Resonanz 41.
 Reststrahlen 107.
 Rheostat 143.
 Röhrensender 170.
 Rolle 21.
 Röntgenröhren 155, 156.
 Röntgenspektren 113, 114, 187.
 Röntgenstrahlen 115.
 Rotation 23.
 Ruhemasse 92.
 Rundfunk 172.
 Rydbergsche Konstante 109.
- Saccharimeter 100.
 Saitengalvanometer 143.
 Saitenschwingungen 45.
 Sammellinsen 82.
 Sättigung, magnetische 133.
 Sättigungsstrom 150.
 Sauerstoff, Isotopie 178.
 Schallempfänger 48.
 Schallisolierung 48.
 Schallwellen 42.
 Schattenbildung 74.
 Scherung 27.
 Schiefe Ebene 22.
 Schiffsschraube 33.
 Schmelzpunkt 60.
 Schmelzwärme 60.
 Schraube 22.
 Schwarzer Körper 116.
 Schwebungen 48.
 Schwerpunkt 17, 18.
 Schwimmerregel 135.
 Schwingung 40, 41.
 —, harmonische 6.
 Schwingungsbauch 42.
 Schwingungsknoten 42.
 Schwingungsweite 7.
 Schwingungszahlen des Lichtes 95.
 Schwungmaschine 13.
- Sehpurpur 85.
 Sehwinkel 86.
 Sekunde 1.
 Sekundenpendel 8.
 Selbstinduktion 157.
 Selbstinduktionskoeffizient 157.
 Selen 139.
 Sensibilisatoren 88.
 Serienschaltung 140, 141.
 Sicherheitslampe 55.
 Siedepunkt 61.
 Siedepunktserhöhung 68.
 Solenoid 136.
 Sonnenbildchen 75.
 Sonnenfinsternis 74.
 Sonnenspektrum 104, 106.
 Sonnentemperatur 117.
 Spannung, elektrische 123.
 Spektralanalyse 106.
 Spektralserien 108.
 Spektralterme 108.
 Spezifische Wärme 53.
 Spiegel 75 ff.
 Spiegelablesung 76.
 Spiegel, rotierender 91.
 Spiegelteleskop 88.
 Spiegelversuch, Fresnelscher 96.
 Spitzenwirkung 122.
 Stabiles Gleichgewicht 21.
 Standfestigkeit 21.
 Stark-Effekt 189, 190.
 Starkstromtechnik 163.
 Starrer Körper 18.
 Staubfiguren 43.
 Stefansches Gesetz 117.
 Steighöhe 2.
 Steigzeit 2.
 Steinsalzkristall 111.
 Stereoskop 86.
 Stickstoff, Zertrümmerung 181.
 Stimmbänder 46.
 Stimmgabel 44.
 Stokessches Gesetz 39, 150.
 Stoß 27, 28.
 Stoßionisation 151.
 Strahlungsgesetz 118.
 Stromgenerator 163.

- Stromleistung 159.
 Stromlinienform 38.
 Stromspirale 136.
 Stromspule 136.
 Stromstärke 136.
 Strömung 31.
 Stromverzweigung 139.
 Stromwärme 138.
 Sublimation 62.
 Supraleitung 139.
 Suszeptibilität 133.
 Sylvin 107.

 Taupunkt 63.
 Telegraphie 144ff.
 —, drahtlose 169.
 Telephonie 161.
 —, drahtlose 171.
 Telephonkabel 162.
 Temperatur 50.
 Temperaturen, tiefste 66.
 Thermoelektrizität 147.
 Thermoelement 147.
 Thermometer 51.
 Thermosflasche 55.
 Tiefenwahrnehmung 86.
 Töne 43.
 Tonfilm 162, 163.
 Tonhöhe 43, 44.
 Tonleiter 44.
 Torsion 27.
 Totaldispersion 79.
 Totalreflexion 79.
 Trägerwellen 171.
 Trägheit 2.
 Trägheitsgesetz 9.
 Trägheitsmoment 23.
 Transformator 160.
 Translation 23.
 Transversalität des Lichtes 98, 99.
 Transversalwellen 41.
 Treibriemen 28.
 Triergeronverfahren 163.
 Tripelpunkt 63.
 Trockenelement 146.
 Tropfenbildung 34.
 Turbulenz 32.
 Turmalinplatte 100.

 Überhitzter Dampf 62.
 Übersetzungsverhältnis 21.
 Übersichtigkeit 86.
 Ultrakurzwellen 172.
 Ultramikroskop 102.
 Ultrarot 106, 107.
 Ultrastrahlung 185, 186.
 Ultraviolett 107.
 Umlaufzeit 6.
 Untersee-telegraphie 145.
 Uranblei 180.
 Uran-Radium-Reihe 180.

 Vakuum 38.
 Valenzelektronen 187.
 Variometer 157.
 Verdampfung 61.
 Verdampfungswärme 61.
 Verdunstung 62.
 Verschiebungsgesetz 117.
 Verstärkeröhre 155.
 Viertaktmotor 70.
 Vokale 45.
 Volt 123.
 Voltmeter 149.
 Voltmeter 143.

 Waage 22.
 Wärmeäquivalent, mechanisches 56.
 Wärmeisolatoren 55.
 Wärmekonvektion 55.
 Wärmeleitung 55.
 Wärmemenge 53.
 Wärmeschutz 55.
 Wärmestrahlung 116ff.
 Wasser, schweres 178.
 Wasserdampf 65.
 Wasserräder 33.
 Wasserstoffisotope 178.
 Wasserstoffspektrum 109.
 Wasserstoffthermometer 52.
 Wasserstoffverflüssigung 66.
 Wasserturbine 33.
 Wasserwaage 29.
 Watt (Einheit) 138.
 Webersche Konstante 168.

- Wechselströme 158.
Wechselstromgeneratoren 164,
165.
Weglänge, freie 72.
Wellen 41.
Wellengeschwindigkeit 41.
Wellenlänge 41.
— des Lichtes 95.
Wellrad 21.
Weston-Element 145.
Wheatstonesche Brücke 141.
Widerstand 138.
Wilson-Kammer 173, 174.
Winkelgeschwindigkeit 23.
Wirbelbewegung 32ff.
Wirbelringe 38.
Wirkungsgrad 59.
Wirkungsquantum 72, 103.
Wirkungssphäre 34.
Wolframlampe 144.
Wurf 2ff.
Wurfbahn 5.
Wurfweite 4.
- X-Einheit 113.
- Zahnräder 21.
Zahnrad, rotierendes 90.
Zapfenreibung 28.
Zeeman-Effekt 189, 190.
Zeit, Relativität 94.
Zeitlupe 89.
Zeitraffer 89.
Zentimeter 1.
Zentralwasserheizung 56.
Zentrifugalkraft 13.
Zentrifugen 14.
Zentripetalbeschleunigung 5.
Zeppelinform 38.
Zerstäuber 32.
Zerstreuungslinsen 82.
Zirkulation 32.
Zugfestigkeit 26.
Zungenpfeifen 46.
Zustandsgleichung 67ff.

Verlag von Julius Springer in Berlin

Physik für Jedermann mit besonderer Berücksichtigung der modernen technischen Anwendungen. Von Prof. Dr. phil. **Arthur Haas** (Wien). (Verständliche Wissenschaft, Band XX.) Mit 76 Abbildungen. X, 274 Seiten. 1933. Geb. RM 6.80

Einführung in die Physik. Von Prof. Dr. **Ph. Broemser** (Basel). Mit 206 Textabbildungen. VIII, 404 Seiten. 1925. RM 9.45; geb. RM 10.80

Handbuch für Physikalische Schülerübungen. Von Geh. Reg.-Rat **Hermann Hahn** (Berlin). Dritte, verbesserte und umgearbeitete Auflage. Mit 340 Textabbildungen. XVI, 453 Seiten. 1929. RM 24.30; geb. RM 25.56

Physik. Ein Lehrbuch für Studierende an den Universitäten und Technischen Hochschulen. Von Prof. **Wilhelm H. Westphal** (Berlin). Dritte Auflage. Mit 503 Abbildungen. XVI, 596 Seiten. 1933. Geb. RM 19.80

Einführung in die Physik. Von Prof. Dr.-Ing. e. h. **R. W. Pohl** (Göttingen).

Erster Band: Einführung in die Mechanik und Akustik. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 440 Abbildungen, darunter 14 entlehnte. VIII, 251 Seiten. 1931. Geb. RM 15.80

Zweiter Band: Einführung in die Elektrizitätslehre. Vierte, größtenteils neu verfaßte Auflage. Mit 497 Abbildungen, darunter 20 entlehnte. VIII, 268 Seiten. 1935. Geb. RM 13.80

Dritter Band: Einführung in die Wärmelehre und Optik. In Vorbereitung.

Physikalisches Handwörterbuch. Zweite Auflage. Mit 1114 Textfiguren. VI, 1428 Seiten. 1932. RM 96.—; geb. RM 99.60

Die Bausteine der Körperwelt. Eine Einführung in die Atomphysik. Von Prof. P. **Theodor Wulf** (Valkenburg). (Verständliche Wissenschaft, 25. Band.) Mit 40 Abbildungen. VI, 186 Seiten. 1935. Geb. RM 4.80

Zu beziehen durch jede Buchhandlung

Verlag von Julius Springer in Wien

Einführung in die theoretische Physik. Von Professor **Reinhold Fürth** (Prag). Mit 128 Abbildungen im Text. XIV, 483 Seiten. 1936. RM 18.—; gebunden RM 19.80

Inhaltsübersicht: Aufgaben und Methoden der theoretischen Physik. — Mathematische Darstellung physikalischer Größen. — Theorie der Felder. — Kinematik. — Wellenbewegung und Wellenfelder. — Physikalische Statistik. — Mechanik der Massenpunkte und starren Körper. — Mechanik elastischer Festkörper. — Mechanik der Gase und Flüssigkeiten. — Atommechanik. — Thermodynamik. — Statistische Mechanik. — Kinetische Theorie der Materie. — Magneto- und Elektrostatik. — Elektrodynamik stationärer Ströme. — Elektrodynamik nichtstationärer Vorgänge. — Strahlen- und Wellenoptik.

Einführung in die physikalischen Grundlagen der Rundfunktechnik. Von Dr. **Otto Franke** (Wien). Mit 167 Textabbildungen. VIII, 272 Seiten. 1937. RM 9.60

Verlag von Julius Springer in Berlin

Einführung in die klassische Elektrodynamik. Von Dozent Dr. **Johannes Fischer**. Mit 120 Abbildungen. VIII, 199 Seiten. 1936. RM 12.—; gebunden RM 13.80

Einführung in die technische Thermodynamik. Von Professor Dr.-Ing. **Ernst Schmidt** (Danzig). Mit 182 Abbildungen im Text und 2 Dampf tafeln. VIII, 314 Seiten. 1936. Gebunden RM 15.—

Einführung in die technische Strömungslehre. Von Dr.-Ing. **Bruno Eck** (Köln).

Erster Band: Theoretische Grundlagen. Mit 155 Abbildungen. VI, 134 Seiten. 1935. RM 6.60; gebunden RM 7.80

Zweiter Band: Strömungstechnisches Praktikum. Mit 140 Abbildungen. VI, 96 Seiten. 1936. RM 5.70; gebunden RM 6.90

Technisches Denken und Schaffen. Eine leichtverständliche Einführung in die Technik. Von Professor Dipl.-Ing. **Georg v. Hanffstengel** (Berlin). Fünfte, neubearbeitete Auflage. Mit 172 Textabbildungen. XII, 220 Seiten. 1935. Gebunden RM 6.60

Zu beziehen durch jede Buchhandlung