

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

3533

1977

Voew und Maßdorff

Biologisches Unterrichtswerk

In drei Abteilungen.

Erste Abteilung: Pflanzenkunde von Prof. Dr. E. Voew.

Ausgabe A: Für Gymnasien.

Bearbeitet von Professor Dr. E. Adolph.

1. Teil: Für Sexta und Quinta. Mit 63 Abbildungen. 2., durchgesehene Auflage. Gebunden Mk. 1,50
2. Teil: Für Quarta und Tertia. Mit 197 Abbildungen und 5 Farbentafeln. 2., durchgesehene Auflage. Gebunden Mk. 2,75

Ausgabe B: Für Realschulen.

Neubearbeitung von Professor Dr. F. Pschl.

1. Teil: Für Sexta bis Quarta. Mit 136 Abbildungen im Text und 3 farbigen Tafeln. 5., neu bearbeitete Auflage. Gebunden Mk. 3,—
2. Teil: Für Tertia und Sekunda. Mit 181 Abbildungen, 8 Farbentafeln und 1 Karte. 4., durchgesehene Auflage. Gebunden Mk. 2,75

Zweite Abteilung: Tierkunde von Prof. Dr. E. Maßdorff.

Ausgabe A: Für Gymnasien.

- I. Band: Für Sexta und Quinta. Mit 134 Abbildungen in Schwarz- und Farbendruck und 6 farbigen Tafeln. Gebunden Mk. 2,20
- II. Band: Für Quarta und Untertertia. Mit 118 Abbildungen in Schwarzdruck sowie 8 Tafeln und 1 Karte in vielfachem Farbendruck. Gebunden Mk. 2,80
- III. Band: Für Obertertia. Mit 85 Abbildungen in Schwarzdruck sowie 5 Tafeln und 1 Karte in vielfachem Farbendruck. Gebunden Mk. 1,50

Ausgabe B: Für Realschulen.

- | | |
|---|---|
| 1. Teil: Für Sexta. Mit 32 Abbild. u. 1 farb. Tafel. 3. Auflage. Kart. Mk. —,60 | 4. Teil: Für Untertertia. Mit 67 Abb. und 6 farbigen Tafeln. 2. Auflage. Kart. Mk. 1,50 |
| 2. Teil: Für Quinta. Mit 40 Abbild. u. 2 farb. Tafeln. 3. Auflage. Kart. Mk. —,80 | 5. Teil: Für Obertertia. Mit 51 Abb., 2 farbigen Tafeln und 1 farbigen Karte. 2. Auflage. Kart. Mk. 1,50 |
| 3. Teil: Für Quarta. Mit 81 schwarzen und farbigen Abbildungen und 3 farb. Tafeln. 2. Auflage. Kart. Mk. 1,25 | 6. Teil: Für Untersekunda. Mit 74 Abbildungen, 5 ein- u. mehrfarb. Tafeln und 1 farbigen Karte. 2. Aufl. Kart. Mk. 1,20 |

Dritte Abteilung: Biologie von Prof. Dr. E. Maßdorff.

- Fünf Teile in einem Bande. Mit 300 Abbildungen, 18 ein- und mehrfarbigen Tafeln und 3 farbige
I. Die allgemeinen Gesetze der Pflanzen- und Tierwelt.
II. Die Pflanzen- und Tierwelt.
III. Die Pflanzen- und Tierwelt.
IV. Die Pflanzen- und Tierwelt.
V. Die Pflanzen- und Tierwelt.
Gebunden Mk. 4,50

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000294342

Schilling's Lehrbücher der Naturgeschichte.

Schilling's Grundriß der Naturgeschichte

des Tier-, Pflanzen- und Mineralreichs.

- I. Teil: Das Tierreich.** Mit Berücksichtigung der Naturgeschichte des Menschen und Hinweisen auf die Gesundheitspflege. 20. Bearbeitung (2., durchgef. Neudruck von Professor Dr. H. Reichenbach). Mit 550 teilweise farbigen Abbildungen im Text sowie einer Karte und 15 Tafeln in Farbendruck. 464 S. Uwb. Mk. 4.50
- II. Teil Ausg. B: Das Pflanzenreich** nach dem natürlichen System. 19. Bearbeitung besorgt von Prof. Dr. F. Huisgen. Mit 319 Abbildungen in Schwarzdruck sowie 23 Tafeln und 1 Karte in Farbendruck. 328 S. Geb. Mk. 4.50
- III. Teil: Das Mineralreich** bearbeitet von Dr. Ad. Mahrenholz. In zwei Abteilungen. In einem Bande Mk. 3.—
- Einzeln:** 1. Abtlg.: **Dryklognoſie** unter Hinweis auf die Technik der Mineralstoffe. 16. Bearbeitung. Mit 225 Abbildungen im Text. 148 S. Kart. Mk. 1.50
2. Abtlg.: **Petrographie und Geologie.** 16. Bearbeitung. Mit 104 Abb. und einer farbigen Karte. 108 S. Kart. Mk. 1.50

Schilling-Waebler's Kleine Schul-Naturgeschichte

der drei Reiche.

Mit vielen, teilweise farbigen Abbildungen im Text sowie 4 Tafeln in Farbendruck.

- | | |
|---|---|
| Teil I: Das Tierreich. 23. Aufl.
Geb. Mk. 1.65 | Teil II B: Das Pflanzenreich nach dem natürlichen System. 23. Aufl.
Geb. Mk. 1.65 |
| Teil II A: Das Pflanzenreich nach dem Linné'schen System. 21. Aufl.
Gebunden Mk. 1.50 | Teil III: Das Mineralreich. 21. Aufl.
Geb. Mk. 1.— |

Vollständige Ausgabe in einem Bande:

- | | |
|--|--|
| Ausgabe A: Mit dem Pflanzenreich nach dem Linné'schen System. Geb. Mk. 3.60 | Ausgabe B: Mit dem Pflanzenreich nach dem natürlichen System. Geb. Mk. 3.75 |
|--|--|

Neben obige Bearbeitungen ist eine auf Grund der preußischen Lehrpläne von 1901 vorgenommene und in erster Linie für Gymnasien bestimmte Umarbeitung getreten unter dem Titel:

Schilling-Seiwert's Kleine Schul-Naturgeschichte.

- | | |
|---|--|
| I. Teil: Der Mensch und das Tierreich. Mit 316, teilweise farbigen Abbildungen im Text sowie 9 Tafeln in vielfachem Farbendruck. Geb. Mk. 2.50 | II. Teil: Das Pflanzenreich nach dem natürlichen System. Mit 221 Abb. im Text sowie 12 Tafeln in Schwarz- u. vielfachem Farbendr. Geb. Mk. 2.50 |
|---|--|

Summel's Leitfaden der Naturgeschichte.

In drei Heften neu bearbeitet von Seminarlehrer R. Werner.

- | | |
|---|---|
| 1. Heft: Lehre vom Menschen, Tierkunde. Mit 3 Farbentafeln u. 93 Textbildern. 25. Aufl. 128 S. Kart. Mk. 1.— | 2. Heft: Pflanzenkunde. Mit 64 Abbildungen. 23. Aufl. 120 S. Kart. Mk. 1.— |
| 3. Heft: Mineralkunde. Mit 17 Abbild. 12. Aufl. 32 S. Kart. Mk. —,35 | |

Noll, Naturgeschichte des Menschen (Anthropologie), nebst Hinweisen auf die Pflege der Gesundheit. Für den Gebrauch an höheren Lehranstalten und Lehrerbildungsanstalten bearbeitet von Prof. Dr. H. Reichenbach. Mit 116 Abbild., 3 Tafeln und einer Karte in Farbendruck. 6. Aufl. 128 S. Kart. Mk. 1.60

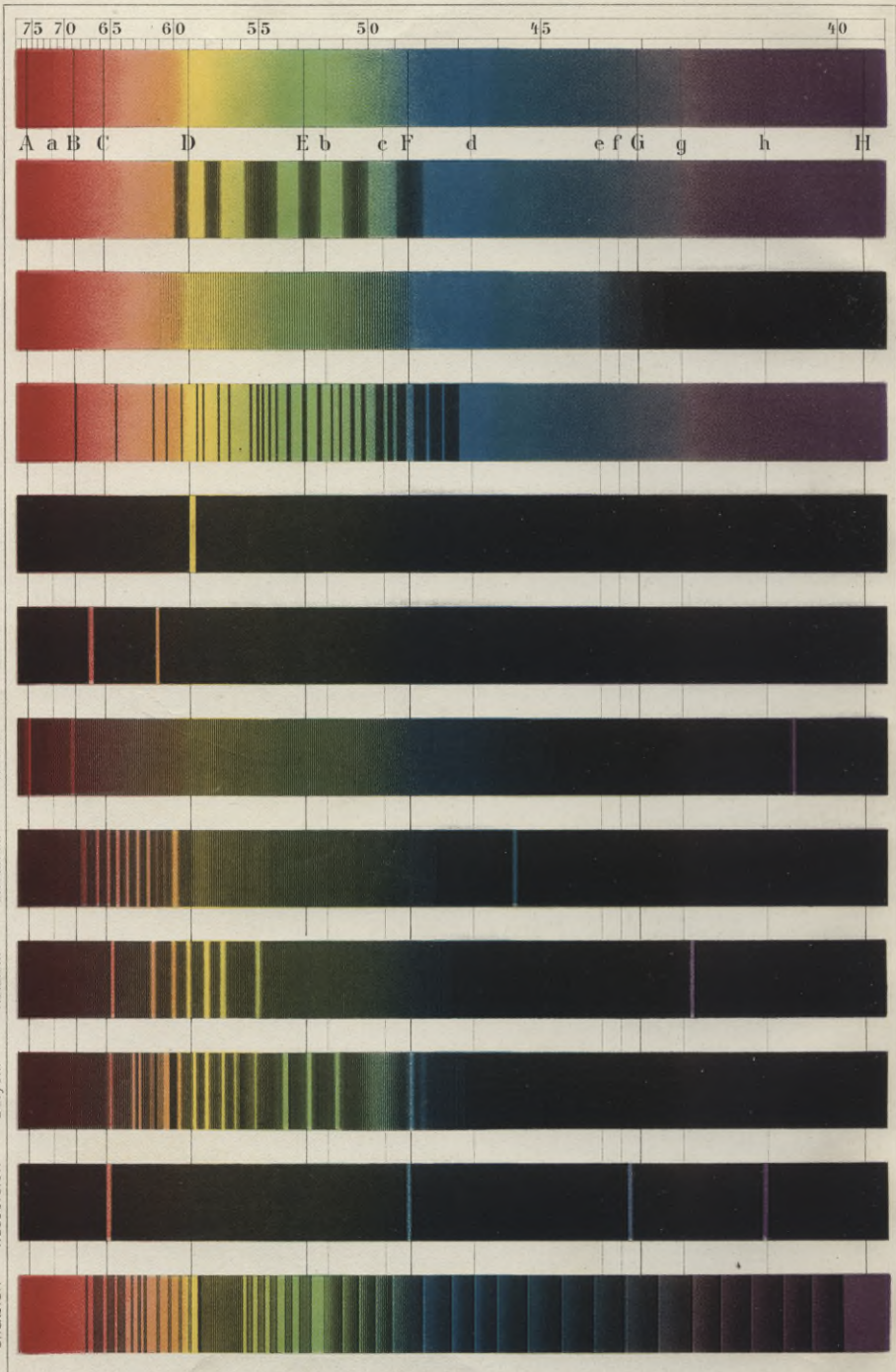
F

1562

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Absorptionsspektren

Emissionsspektren



H. Lengner, Leipzig.

F. Hirt, Breslau.

Spektraltafel

Trappe's Schul-Physik

Sechzehnte Auflage

neu bearbeitet von

Professor Dr. Theodor Maschke
am Kgl. König Wilhelms-Gymnasium in Breslau

Nebst einem Anhang:
Die einfachsten chemischen Erscheinungen
mit Berücksichtigung der Mineralogie

von

Professor Dr. Julius Schiff
am Städt. Johannes-Gymnasium in Breslau

Mit einer farbigen Spektrealtafel und
vielen schwarzen Abbildungen im Text



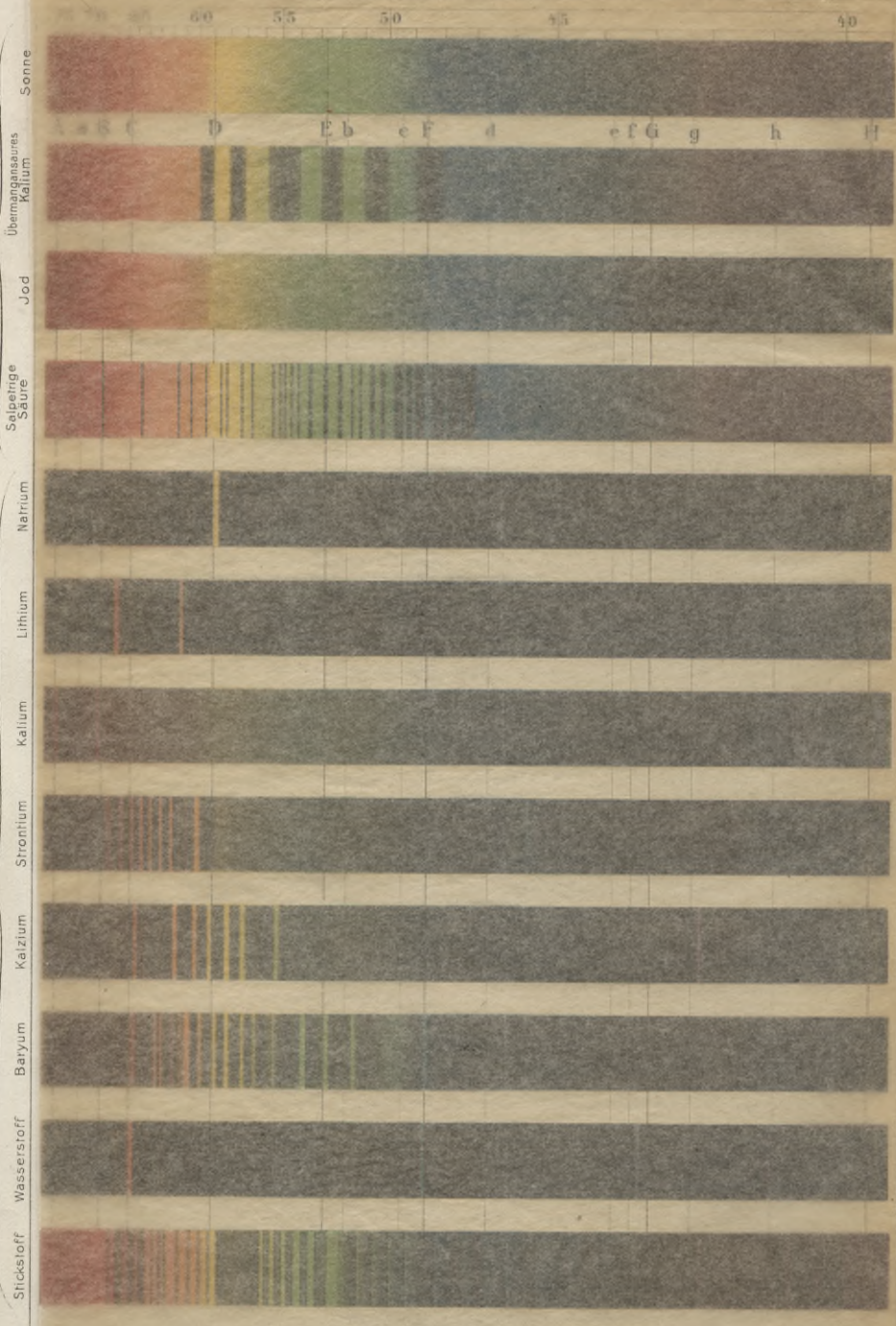
Ferdinand Hirt

Königliche Universitäts- und Verlagsbuchhandlung
Breslau 1909

Wo/
373

Absorptionspektre

Emissionsspektre



Spektraltafel

Trappe's Schul-Physik

Sechzehnte Auflage

neu bearbeitet von

Professor Dr. Theodor Maschke
am Kgl. König Wilhelms-Gymnasium in Breslau

Nebst einem Anhang:
Die einfachsten chemischen Erscheinungen
mit Berücksichtigung der Mineralogie

von

Professor Dr. Julius Schiff
am Städt. Johannes-Gymnasium in Breslau

Mit einer farbigen Spekraltafel und
vielen schwarzen Abbildungen im Text



Ferdinand Sirt

Königliche Universitäts- und Verlagsbuchhandlung
Breslau 1909

Wo/
373

Alle Rechte vorbehalten.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA

KRAKÓW

II 3533

Akc. Nr.

4080/49

Vorwort zur fünfzehnten Auflage.

Die erste Ausgabe der Trappeschen Schulphysik erschien im Jahre 1853. Sie hat seitdem 14 Auflagen erlebt, von denen die zehnte noch von dem Verfasser selbst 1886 herausgegeben wurde. Wie ein Vergleich dieser zehn Auflagen zeigt, ist Trappe († 1889) fortgesetzt bemüht gewesen, sein Buch möglichst vor dem Veralten zu bewahren.

Die Durchsicht und Verbesserung der 11. Auflage (1890) besorgte Herr Prof. Dittrich (Breslau), der auf ausdrücklichen Wunsch des Verfassers zunächst von größeren Änderungen ab sah.

Die 12. Auflage (1893) wurde von Herrn Prof. Dr. Kündel (Berlin) bearbeitet. Sie enthält umfangreiche Vermehrungen und auch dankenswerte Verbesserungen. Eine gründliche Umarbeitung wollte Herr Kündel erst später vornehmen, wenn die beteiligten Kreise sie wünschen sollten. Da er hieran durch Krankheit verhindert wurde, so waren die 13. und 14. Auflage, die 1895 und 1899 erschienen, ein fast unveränderter Abdruck der 12.

In der vorliegenden 15. Auflage sind neu bearbeitet die Mechanik der festen Körper (§ 1—71), die Wellenlehre (§ 94—102), die Lehre vom Magnetismus und der Elektrizität (§ 202—319). Hinzugekommen sind ferner: Tropfenbildung (§ 81), Manometer (§ 90), Schwebungen (§ 117b), Vergrößerung (§ 153), Projektionsapparat (§ 158), ein Schulversuch über Interferenz (§ 168), Thermoskope (§ 176). Eine wesentlich andere Darstellung als bisher haben erfahren: Lösung (§ 83), barometrische Höhenmessung (§ 89), Diffusion (§ 92), Absorption (§ 93), Minimum der Ablenkung in Prismen (§ 142), Ableitung des Satzes 5 (§ 144), Akkommodationsvermögen (§ 147), Galileisches Fernrohr (§ 159d), Ansichten über die Natur des Lichtes (§ 167), Regenbogen (§ 173₁), Ausdehnung der Gase (§ 178₆), Eigenschaften der Dämpfe (§ 182), Luftfeuchtigkeit (§ 200), Energiegesetz (§ 320). — Weggelassen wurden die Kreisbewegungen und die allgemeine Theorie des Foucault'schen Pendels, da eine einwandfreie Behandlung dieser Kapitel über das Verständnis des Durchschnittsschülers hinausgeht.

Das Lehrbuch ist für Anstalten mit neunjährigem Kursus berechnet. Von der Herausgabe einer besonderen Vorstufe konnte abgesehen werden, da

die Teile der Physik, deren Durchnahme die Lehrpläne in Obertertia und Untersekunda vorschreiben, auf einfacher, experimenteller Grundlage dargestellt sind und da außerdem ein von Herrn Prof. Dr. Schiff verfaßter Anhang über Chemie und Mineralogie beigelegt ist.

Die unleugbaren Fortschritte, die der physikalische und chemische Schulunterricht in methodischer Beziehung während der letzten beiden Jahrzehnte gemacht hat, wurden bei der Neubearbeitung soweit als möglich berücksichtigt. Der Beobachtung und dem Versuch wurde die gebührende erste Stelle eingeräumt, die Grundbegriffe wurden nicht bloß definiert, sondern entwickelt, die Gesetze eingehend nach der experimentellen und mathematischen Seite hin begründet.

Bei der geringen Stundenzahl, die der Physik auf unseren höheren Lehranstalten zugewiesen ist, erscheint es ausgeschlossen, die Schüler mit allen Gebieten gleichmäßig vertraut zu machen. Es muß also eine Auswahl stattfinden. Nun gehen aber die Ansichten der Sachkundigen beträchtlich darüber auseinander, welche Erscheinungen und Gesetze für die Schule die wichtigsten sind. Deshalb kann sich auch der Verfasser einer Schulphysik nicht darauf beschränken, nur die Kapitel ausführlicher zu behandeln, die er persönlich für die geeignetsten hält. Will er nicht eine unerträgliche Tyrannei ausüben, so muß er notwendig mehr Stoff bieten, als auf der Schule in der vorgeschriebenen Zeit zu bewältigen ist. Sache des Lehrers ist es, die Auswahl zu treffen, die ihm nach dem gerade vorhandenen Schülermaterial die beste zu sein scheint.

Um an einem Beispiel zu zeigen, wie sich der Unterzeichnete die Benutzung des vorliegenden Lehrbuches denkt, möge hier eine kurze Angabe gestattet sein über die Behandlung der Mechanik in der Prima eines Gymnasiums.

Da es üblich und auch berechtigt ist, an die Mechanik die Wellenlehre und Akustik anzuschließen und für diese drei Gebiete ein Jahr zu verwenden, so stehen für die Mechanik höchstens drei Vierteljahre zur Verfügung. Der mechanische Vorkursus in Obertertia pflegt sich besonders mit den Flüssigkeiten und Gasen zu beschäftigen, in der Prima ist der Hauptnachdruck auf die Mechanik der festen Körper zu legen. Man beginnt mit der Bewegung des materiellen Punktes (§ 1—8) und macht in den ersten Wochen weder vom Kraft- noch vom Massenbegriff Gebrauch. Erst wenn den Schülern die Begriffe Geschwindigkeit und Beschleunigung geläufig geworden sind, wenn sie hinlänglich geübt in der Zusammensetzung und Zerlegung dieser Größen sind und auch eine anschauliche Vorstellung von den verschiedenartigen Bewegungen durch Versuche (z. B. § 14 und § 16 erster Teil) gewonnen haben, geht man zur eigentlichen Mechanik über. Als deren Grundlage sind die drei Bewegungs-

gesetze Newtons anzusehen. Sie werden jedoch nicht als selbstverständlich, etwa wie Axiome, an die Spitze gestellt, sondern durch zahlreiche Erfahrungstatsachen und Versuche begründet (§§ 11—21). Das absolute Maßsystem (§ 18) wird nach Klarstellung des Massenbegriffes und des zweiten Bewegungsgesetzes eingeführt. Die Entwicklung der Begriffe Arbeit, Effekt, lebendige Kraft (§ 22 bis § 22c) schließt sich naturgemäß an die Bewegungsgesetze an. Hierauf folgt die Behandlung der in einem Punkt eines Körpers angreifenden Kräfte, der parallelen Kräfte, des Schwerpunktes, des Gleichgewichts (§ 23 bis § 30). Von den sogenannten einfachen Maschinen brauchen durchaus nicht sämtliche angeführten (§ 30 bis § 38) besprochen zu werden. Nur ist auf ein klares Verständnis des Momentensatzes (§ 31), des Gesetzes von der Erhaltung der Arbeit (§ 39) und seiner Erweiterung: des Energiegesetzes (§ 40) zu dringen. Jetzt erst würden die gleichförmige Bewegung auf einem Kreise (§ 9, § 47, § 47a) und die einfachen Schwingungen (§ 10 und eventuell § 96) durchzunehmen sein. Hieran schließen sich die üblichen Pendelversuche und die Ableitung für die Schwingungsdauer des Fadenpendels (§ 44). Man wird sich in der Regel auf dieses beschränken, so wünschenswert es auch sein mag, Trägheitsmomente und physisches Pendel zu behandeln. — Die Zentralbewegungen und die Gravitation bereits im ersten Jahre (UI) zu besprechen, erscheint nicht zweckmäßig. Man hat Gelegenheit, auf diese Kapitel (§ 48 bis § 59) ausführlich im nächsten Jahre (OI) bei der mathematischen Geographie zurückzukommen. Es ist dann auch auf dem Gymnasium sehr wohl möglich, die Zentralbewegung auf einem Kegelschnitt zu behandeln. Die Schüler erlangen dadurch ein weit tieferes Verständnis, als wenn man sich notgedrungen auf die Kreisbewegung beschränkt, wo Zentral- und Zentripetalbeschleunigung gleichbedeutende Begriffe sind. — Für das erste Jahr (UI) bleibt dann noch Teil IV (§ 60 bis § 93) und § 193. Da das hauptsächlichste über Flüssigkeiten und Gase (§ 72 bis § 93) bereits in Obertertia, das wichtige Boyle'sche Gesetz (§ 88) in Obersekunda bei der Wärmelehre durchgenommen wird, so behält man ausreichend Zeit für die Abschnitte § 60 bis § 71 und § 193.

Was über die Notwendigkeit einer Stoffauswahl in der Mechanik gesagt ist, gilt auch für alle anderen Teile, ganz besonders aber für die Elektrizitätslehre. Man wird immer gezwungen sein, gewisse, an und für sich wichtige Kapitel wegzulassen, um die nötige Zeit zu gewinnen für die Erreichung der beiden Hauptziele: Ausbildung der Beobachtungsgabe und Erziehung zu einer physikalischen Auffassung der Naturerscheinungen.

Breslau, im November 1903.

Dr. Th. Maschke.

Vorwort zur sechzehnten Auflage.

Die in der 15. Auflage neu bearbeiteten Abschnitte über Mechanik, Wellenlehre, Magnetismus und Elektrizität haben nur wenige Zusätze (§ 9 a, 284, 318, 321, 322, 332, 333) und einige Kürzungen (§ 98 b und 257) erfahren. Dagegen war für die Wärmelehre und Optik, bei denen ich mich in der letzten Auflage auf die notwendigsten Änderungen beschränkt hatte, eine vollständige Umarbeitung erforderlich. Die Wärmelehre hat Herr Realschuldirektor Prof. Dr. Ahrendt (Haynau), der bis Michaelis 1907 mein Fachkollege am hiesigen Wilhelm-Gymnasium war, zum größten Teil verfaßt.

Über den Zweck und die Benutzung des Buches habe ich mich im Vorwort der 15. Auflage ausgesprochen.

Breslau, im Dezember 1908.

Prof. Dr. Ch. Maschke.

Inhaltsübersicht.

Einleitung: Zweck und Einteilung der Physik	Seite 1
---	------------

Erster Abschnitt: Mechanik § 1—102.

Teil I: Geometrische Bewegungslehre. § 1—10.

	Seite		
A. Geradlinige Bewegungen § 2—4.		2. Zusammenfügung gleichförmiger Bewegungen	§ 6 9
1. Gleichförmige Bewegung . . . § 3	3	3. Zusammenfügung gleichförmig beschleunigter Bewegungen	§ 7 10
2. Ungleichförmige Bewegung . . . § 4	4	4. Zusammenfügung einer gleichförmigen und einer gleichförmig beschleunigten Bewegung	§ 8 11
B. Zusammenfügung geradliniger Bewegungen § 5—10.		5. Gleichförmige Kreisbewegung § 9, 9a	13
1. Das Parallelogramm der Bewegungen	§ 5 8	6. Einfache Schwingungen § 10 u. 10a	15

Teil II: Physikalische Grundbegriffe und Grundgesetze. § 11—22.

1. Begriff der Kraft	§ 11	8. Terrestrisches und absolutes Maßsystem	§ 18	19	27
2. Begriff der Trägheit	§ 12	9. Spezifisches Gewicht und Dichte	§ 19	21	28
3. Messen der Kräfte durch Druck oder Zug	§ 13	10. Prinzip der Aktion und Reaktion	§ 20	22	29
4. Fallversuche	§ 14	11. Trägheitswiderstand	§ 21	24	29
5. Wurfbewegung	§ 15	12. Begriff der Arbeit, des Effektes, der lebendigen Kraft	§ 22	25	30
6. Messen der Kräfte durch Beschleunigungen	§ 16			24	
7. Begriff der Masse	§ 17			25	

Teil III: Gleichgewicht und Bewegung starrer Körper. § 23—59.

A. Zusammenfügung, Zerlegung und Gleichgewicht von Kräften § 23—29.		3. Satz von der Erhaltung der Arbeit, Prinzip der virtuellen Verschiebungen. — Satz von der Erhaltung der Energie § 39—40			
1. Kräfte, die in einem Punkt angreifen	§ 23	C. Drehbewegungen um eine feste Achse § 41—46.			
2. Gleichgewicht dreier Kräfte an verschiedenen Angriffspunkten	§ 24 37	1. Gleichförmige Drehungen	§ 41	58	
3. Erweiterung d. Arbeitsbegriffes	§ 25 37	2. Ungleichförmige Drehungen	§ 42	58	
4. Zusammenfügung paralleler Kräfte	§ 26	3. Bestimmung von Trägheitsmomenten	§ 43	59	
5. Schwerpunkt	§ 27	4. Das Pendel	§ 44	61	
6. Gleichgewicht eines Körpers	§ 28 41	5. Das physikalische Pendel	§ 45	64	
7. Stabilität	§ 29	6. Die Pendeluhr	§ 46	67	
B. Einfache Maschinen § 30—40.		D. Krümmliche Bewegungen § 47—51.			
1. Zweck der Maschinen	§ 30	1. Gleichförmige Kreisbewegung	§ 47	68	
2. Gleichgewicht bei den einfachen Maschinen	§ 31—38	2. Gleichförmige Bewegung auf einer beliebigen Kurve	§ 48	73	
a) Der Hebel	§ 31—33	3. Ungleichförmige Bewegung auf einer Kurve	§ 49	73	
b) Die Seilmaschinen	§ 34—35				
c) Die schiefe Ebene	§ 36—38				

Dritter Abschnitt: Die Wärme. § 119—147.

	Seite		Seite
A. Von der Wärme u. ihren Hauptwirkungen im all-gemeinen § 119—120	172	E. Verbreitung der Wärme § 135—136.	
B. Ausdehnung durch die Wärme § 121—125.		1. Drei Arten der Wärmeverbreitung § 135	199
1. Thermoskope § 121	174	2. Wärmeleitung und Wärme-strömung § 136	199
2. Thermometer § 122	174	F. Wärmequellen, Äquivalenz von Wärme und Arbeit. Natur der Wärme § 137 bis 139.	
3. Ausdehnung fester Körper § 123	177	1. Die Wärmequellen § 137	202
4. Ausdehnung der tropfbaren Flüssigkeiten § 124	179	2. Mechanisches Wärme-äquivalent § 138	204
5. Ausdehnung der Gase § 125	180	3. Ansichten über die Natur der Wärme § 139	206
C. Kalorimetrie. Spezifische Wärme § 126—127.		G. Wärme- <i>kr</i> af <i>t</i> ma <i>sch</i> inen § 140—141.	
1. Kalorie, Richmann'sche Regel § 126	182	1. Die Dampfmaschine § 140	207
2. Spezifische Wärme. Wärme-kapazität § 127	183	2. Verbrennungskraftmaschinen § 141	211
D. Veränderung d. Aggregat-zustandes § 128—134.		H. Meteorologische Er <i>sch</i> e-i-nungen § 142—147.	
1. Allgemeine Übersicht § 128	186	1. Wärme auf d. Erdoberfläche § 142	212
2. Schmelzen und Erstarren § 129	187	2. Temperatur des Erdbodens § 143	213
3. Verdampfung und Kondensation § 130	190	3. Temperatur der Gewässer § 144	215
4. Verdunsten § 131	192	4. Temperatur der Atmosphäre § 145	216
5. Eigenschaften der Dämpfe § 132	193	5. Feuchtigkeit der Luft § 146	219
6. Der Leidenfrost'sche Tropfen § 133	196	6. Atmosphärische Niederschläge § 147	221
7. Verflüssigung von Dämpfen und Gasen § 134	197		

Vierter Abschnitt: Das Licht. § 148—218.

1. Licht und Lichtempfindung § 148	224	2. Ebene Spiegel	230
2. Selbstleuchtende und dunkle Körper § 149	224	a) Reflexionsgesetz § 157	230
3. Durchsichtigkeit § 150	224	b) Spiegelbilder § 158	231
A. Ausbreitung des Lichtes § 151—155.		c) Homozentrische Büschel § 159	231
1. Lichtstrahlen § 151	225	d) Unbelegte Spiegel § 160	232
2. Schatten § 152	225	e) Winkelspiegel § 161	232
3. Bilder durch kleine Öffnungen § 153	226	f) Spiegelsextant § 162	232
4. Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, Helligkeit § 154	227	3. Kugelspiegel	233
5. Photometrie § 155	228	a) Erklärungen § 163	233
B. Reflexion des Lichtes § 156—167.		b) Hohlspiegel § 164	233
1. Diffuse und regelmäßige Reflexion § 156	229	c) Bilder kleiner Flächen § 165	234
		d) Bildkonstruktion § 166	235
		e) Versuche und Anwen-dungen § 167	236
		C. Brechung des Lichtes § 168 bis 186.	
		1. Brechungsgesetz § 168	236

	Seite		Seite
2. Demonstration des Snelliſchen Geſetzes . . . § 169	238	E. Das menſchliche Auge und das Sehen § 191—197.	
3. Umkehrbarkeit des Lichtweges . . . § 170	238	1. Bau des Auges . . . § 191	261
4. Konſtruktion des gebrochenen Lichtſtrahls . . . § 171	239	2. Akkommodationsvermögen . . . § 192	262
5. Abbildung durch Brechung an einer ebenen Fläche . . . § 172	240	3. Erregung des Sehnerven . . . § 193	264
6. Totalreflexion . . . § 173	241	4. Geſichtswinkel . . . § 194	265
7. Gefrümmte Strahlen . . . § 174	242	5. Sehen mit zwei Augen . . . § 195	266
8. Luſtſpiegelung . . . § 175	243	6. Körperliches Sehen . . . § 196	266
9. Brechung in Priſmen § 176 u. 177	243	7. Schätzung der Entfernung . . . § 197	267
10. Minimum der Ablenkung in Priſmen . . . § 178	245	F. Optiſche Inſtrumente § 198—204.	
11. Sphäriſche Linien . . . § 179	245	1. Vergrößerung . . . § 198	268
12. Optiſcher Mittelpunkt . . . § 180	246	2. Einfaches Mikroſtop . . . § 199	269
13. Sammellinſen . . . § 181	247	3. Zuſammengeſetztes Mikroſtop . . . § 200	269
14. Abbildung einer Ebene . . . § 182	249	4. Sonnenmikroſtop . . . § 201	270
15. Bildkonſtruktion . . . § 183	249	5. Projektionsapparat . . . § 202	271
16. Zerſtreungslinſen . . . § 184	250	6. Dunkelkammer . . . § 203	271
17. Sphäriſche Abweichung . . . § 185	250	7. Fernrohre . . . § 204	272
18. Brennweitenbeſtimmung . . . § 186	252	G. Geſchwindigkeit d. Lichtes § 205	274
D. Farbenzerſtreuung § 187 bis 190.		H. Das Licht als Wellenbewegung § 206—218.	
1. Grundverſuche . . . § 187	252	1. Anſichten über die Natur des Lichtes . . . § 206	278
2. Komplementärfarben . . . § 188	257	2. Interferenz u. Beugung § 207—208	280
3. Achromatie . . . § 189	257	3. Polarisation . . . § 209—212	286
4. Regenbogen . . . § 190	258	4. Emission u. Abſorption § 213—218	294

Fünfter Abſchnitt: Magnetismus und Elektrizität. § 219—337.

Teil I: Magnetismus. § 219—234.

Natürliche Magnete . . . § 219	302	Magnetische Kraft. Coulombſches Geſetz . . . § 227	305
Stahl und Eiſen . . . § 220	302	Magnetfeld und Kraftlinien . . . § 228	306
Künſtliche Magnete . . . § 221	302	Eiſen im Magnetfelde . . . § 229	307
Richtung eines beweglichen Magneten . . . § 222	302	Das magnetiſche Feld der Erde . . . § 230	308
Geſetz der Polarität . . . § 223	303	Magnetſtab im Felde der Erde . . . § 231	309
Magnetismus von Stahl und Eiſen . . . § 224	303	Beſtimmung des magnetiſchen Moments . . . § 232	309
Elementarmagnete . . . § 225	303	Variationen des Erdmagnetismus . . . § 233	311
Verteilung d. freien Magnetismus in einem Stahlſtabe . . . § 226	304	Dimensionsformeln der abſoluten magnetiſchen Einheiten . . . § 234	312

Teil II: Elektroſtatik. § 235—270.

Hiſtoriſche Grundverſuche . . . § 235	312	Schirmwirkung . . . § 243	319
Leiter und Iſolatoren . . . § 236	313	Faradaſches Gefäß . . . § 244	320
Zwei Arten von Elektrizität . . . § 237	313	Elektroſtatiſcher Druck, Spigenwirkung . . . § 245	320
Das Blattelektroſkop . . . § 238	314	Elektrophor . . . § 246	321
Sitz der Ladung . . . § 239	315	Der Elektrophor als Arbeitstransformator . . . § 247	322
Elektriſche Dichte . . . § 240	316	Die Reibungselektriſiermaſchine . . . § 248	322
Elektriſierung durch Inſtuenz . . . § 241	316		
Die Symmerſche Hypotheſe . . . § 242	317		

	Seite		Seite		
Das Multiplikationsprinzip . . .	249	323	Das elektrische Feld . . .	260	337
Die Holz'sche Influenzmaschine . . .	250	324	Leiter im Felde . . .	261	338
Die Holz'sche Maschine als Arbeits- transformator . . .	251	326	Ubereinanderlagerung elektrischer Felder . . .	262	339
Versuche m. der Elektrifiziermaschine . . .	252	327	Das Potential Null . . .	263	339
Elektrische Kraft. Coulomb'sches Gesetz . . .	253	328	Elektrische Ladungsenergie . . .	264	340
Eichung eines Elektrometers nach Ladungseinheiten . . .	254	330	Kondensatoren . . .	265	340
Grad des elektrischen Zustandes . . .	255	331	Leidener oder Klei'sche Flasche . . .	266	342
Kapazität . . .	256	332	Wirkungen der Flaschen- entladung . . .	267	344
Ausgleich von Zustandsgraden . . .	257	333	Einfluß des Dielektrikums . . .	268	346
Elektrisches Potential . . .	258	333	Erscheinungen im elektrischen Felde der Erde . . .	269	347
Potential und Zustandsgrad . . .	259	336	Bligableiter . . .	270	350

Teil III: Strömende Elektrizität. § 271—337.

A. Stromerzeugung auf chemischem Wege § 271—278.		D. Das Ohm'sche Gesetz § 291 bis 294.	
1. Voltas Entdeckung . . .	271 351	1. Stromstärke u. Widerstand § 291 a	367
2. Das Volta-Element . . .	272 351	2. Stromstärke und elektro- motorische Kraft . . .	291 b 368
3. Elektroskopische Erschei- nungen am offenen Element . . .	273 352	3. Elektromotorische Kraft und Widerstand . . .	291 c 368
4. Die Zambonis'sche Säule . . .	274 353	4. Einfache Form d. Ohm'schen Gesetzes . . .	291 d 368
5. Elektromotorische Kraft . . .	275 353	5. Änderung des Potentials längs eines Stromkreises . . .	292 369
6. Das geschlossene Volta-Element . . .	276 354	6. Stromverzweigung . . .	293 372
7. Vergleich des Volta-Elements mit einer hydromechanischen Vorrichtung . . .	277 355	7. Schaltung von Elementen . . .	294 373
8. Verschiedene Elemente . . .	278 356	E. Stromwirkungen inner- halb eines Leiters § 295 bis 307.	
B. Erklärung u. Messung der Stromstärke § 279—285.		1. Wärmewirkungen § 295—297	
1. Stromstärke . . .	279 358	a) Joulesches Gesetz . . .	295 375
2. Dersted's Entdeckung . . .	280 358	b) Arbeitsfähigkeit eines Stromes . . .	296 376
3. Magnetisches Feld eines geradlinigen Stromes . . .	281 359	c) Elektrisches Licht . . .	297 377
4. Magnetisches Feld einer Stromschleife . . .	282 360	2. Elektrolyse § 298—307	
5. Tangentenbussole . . .	283 360	a) Bezeichnungen . . .	298 380
6. Messung der Stromstärke in elektromagnetischen Einheiten . . .	284 362	b) Zerlegung des Wassers . . .	299 380
7. Empfindliche Stromanzeiger und Strommesser . . .	285 363	c) Zerlegung der Metalle und geschmolzener Chlor- metalle . . .	300 382
C. Leitungswiderstände § 286—290.		d) Zerlegung gelöster Salze . . .	301 382
1. Widerstände metallischer Leiter . . .	286 364	e) Erstes Gesetz Faradays . . .	302 383
2. Widerstände elektrolytischer Leiter . . .	287 365	f) Zweites Gesetz Faradays . . .	303 383
3. Einfluß der Wärme auf die Leitfähigkeit . . .	288 366	g) Theorie der Elektrolyse . . .	304 384
4. Widerstandsapparate . . .	289 366	h) Galvanische Polarisation . . .	305 385
5. Äußerer und innerer Wider- stand . . .	290 367	i) Akkumulatoren . . .	306 386
		k) Chemische Vorgänge in d. galvanischen Elementen . . .	307 387
		F. Wirkungen außerhalb der Strombahn § 308—335.	
		1. Elektromagnetismus § 308—313	
		a) Elektromagnet . . .	308 388
		b) Diamagnetismus . . .	309 388

	Seite		Seite
c) Anwendungen des Elektromagnets	§ 310 389	h) Das dynamoelektrische Prinzip	§ 326 408
a) Klingelapparat	§ 311 390	i) Die Grammeische Gleichstrommaschine	§ 327 409
β) Telegraphie	§ 312 390	k) Übertragung elektrischer Energie	§ 328 411
γ) Elektromotor	§ 313 392	l) Telephon und Mikrophon	§ 329 411
2. Elektrodynamik § 314—318		m) Transformatoren für Wechselstrom	§ 330 413
a) Mechanische Wirkung eines Magneten auf einen Stromleiter	§ 314 393	n) Transformatoren für Gleichstrom	§ 331 414
b) Mechanische Wirkung zweier Stromleiter auf einander	§ 315 395	o) Entladungserscheinungen hochgepannter Ströme in Gasen	§ 332 416
c) Ampères Theorie des Magnetismus	§ 316 395	p) Elektrische Schwingungen und fortschreitende Wellen	§ 333 419
d) Rotation beweglicher Magnete und Ströme	§ 317 396	q) Stehende elektrische Wellen	§ 334 421
e) Größe der elektromagnetischen Kräfte	§ 318 396	r) Funken Telegraphie	§ 335 422
3. Induktion § 319—335		G. Thermoelektrizität	§ 336 423
a) Entstehung von Induktionsströmen	§ 319 398	H. Dimensionsformeln der absoluten magnetischen, elektrostatischen u. elektromagnetischen Einheiten	§ 337 424
b) Richtung des Induktionsstromes	§ 320 400	Gesetz von der Erhaltung der Energie	§ 338 427
c) Elektromotorische Kraft des Induktionsstromes	§ 321 401	Maß- und Gewichtstabelle	429
d) Das Faraday'sche Modell	§ 322 403	Register	430
e) Selbstinduktion	§ 323 405		
f) Foucault'sche Ströme	§ 324 407		
g) Siemens'scher Doppel-T-Anker	§ 325 408		

Anhang.

Die einfachsten chemischen Erscheinungen.

A. Eigenschaften einiger wichtigen Stoffe (metallischer u. nicht-metallischer Zustand)	§ 1—3 1	G. Atomtheorie	§ 32—38 35
B. Verhalten der Schwermetalle zum Schwefel	§ 4—11 6	H. Kohlenstoff und Silizium	§ 39—48 41
C. Leichte Metalle	§ 12 14	J. Salzsäure und Chlor	§ 49—54 49
D. Verhalten der Metalle und d. Phosphors beim Erhitzen an der Luft	§ 13—16 15	K. Verbindungen des Wasserstoffs mit Schwefel, Stickstoff und Kohlenstoff	§ 55—60 55
E. Untersuchung der atmosphärischen Luft, Stickstoff und Sauerstoff	§ 17—24 18	L. Die Volumenverhältnisse der Gase; Molekulartheorie	§ 61—63 62
F. Untersuchung des Wassers, Wasserstoff und Knallgas § 25—31 26		M. Reduktionsvorgänge	§ 64—66 66
		N. Fernäre Verbindungen (Säuren und Basen)	§ 67—73 70
		O. Säuren und Salze	§ 75—78 75
		Register	84

Einleitung.

Unsere Sinne vermitteln uns die Kenntniss einer außer uns befindlichen Körperwelt. Durch die Sprache können wir unsere Sinneindrücke anderen mittheilen und mit den Wahrnehmungen, die sie gemacht haben, vergleichen. Wäre der Einzelne lediglich auf die eigenen Erfahrungen angewiesen, so würde bei der großen Mannigfaltigkeit der Dinge außer uns und ihrer Erscheinungen unsere Kenntniss von der Natur notwendig sehr lückenhaft bleiben, denn der Erfahrungsbereich unserer Sinne ist verhältnismäßig eng begrenzt. Um durch Tasten oder Schmecken Eigenschaften eines Dinges festzustellen, bedarf es einer direkten Berührung. Die Entfernungen, auf die unser Geruchs- und Gehörsinn wirkt, messen wir nach Zentimetern oder Metern. Selbst das Auge, das Lichteindrücke aus scheinbar unendlichen Fernen noch wahrzunehmen vermag, gestattet doch nur innerhalb eines kleinen Gesichtskreises eine genauere Beobachtung.

Wir sind deshalb darauf angewiesen, von anderen zu lernen. Dadurch, daß wir uns die Erfahrungen aneignen, die die Menschen seit Jahrtausenden gemacht haben, erweitern wir gleichsam den Wirkungskreis der eigenen Sinne räumlich und zeitlich fast ins Unbegrenzte.

Um aber ein solches Aneignen zu ermöglichen, war es notwendig, jene Erfahrungen zu sammeln, zu sichten und zu ordnen. So ist das entstanden, was wir Naturwissenschaft nennen. Sie enthält alle systematisch geordneten und auf die einfachste Form gebrachten Beobachtungen der körperlichen Außenwelt.

Damit ist ihre Aufgabe aber nicht erschöpft. Der menschliche Geist fühlt sich erst dann befriedigt, wenn es gelingt, einen unserem Verstande angemessenen Zusammenhang der Tatsachen nachzuweisen, die die Körperwelt und ihre Erscheinungen betreffen. Diesen Teil der Naturwissenschaft nennt man häufig Naturlehre im Gegensatz zur Naturbeschreibung, wie sie in der Zoologie, Botanik, Mineralogie üblich ist. Die Naturlehre teilt man wieder in Physik und Chemie, je nachdem sie es mehr mit den äußerlichen, vorübergehenden oder den innerlichen, materiellen Veränderungen der Körper zu tun hat. Von der Physik im engeren Sinne, die sich nur mit den unorganischen Körpern beschäftigt, unterscheidet man die Physiologie, deren Gegenstand die organische Natur ist.

Eine scharfe Grenzlinie zwischen den einzelnen Naturwissenschaften läßt sich übrigens nicht ziehen. Die verschiedenen Gebiete greifen so vielfach ineinander über, daß jede Einteilung mehr oder weniger willkürlich sein wird.

Dies gilt auch für die übliche Einteilung der Physik in Mechanik, Akustik, Wärme, Optik, Magnetismus und Elektrizität. Wir behalten sie trotzdem bei, da sie historisch berechtigt und naturgemäß ist, denn sie beruht auf der Grundlage jedes physikalischen Erkennens, der Wahrnehmung durch unsere Sinne.

Die einfachsten, gleichsam greifbaren Erscheinungen sind die Bewegungen der Körper. Sie sind deshalb auch zuerst genauer beobachtet und erklärt worden. Mit ihnen beschäftigt sich die Mechanik.

Die Erscheinungen, die besonders auf das Ohr wirken, werden in der Akustik oder der Lehre vom Schall behandelt.

Die Wärmelehre beschäftigt sich mit den Veränderungen, die unsere Wärmeempfindung erregen.

Alles, was vorzugsweise vom Auge wahrgenommen wird, bildet den Gegenstand der Optik oder der Lehre vom Licht.

Für die magnetischen und elektrischen Wirkungen haben wir kein besonderes Organ. Wir besprechen sie getrennt von den anderen physikalischen Vorgängen. Hierzu berechtigt die vielfache Übereinstimmung, die magnetische und elektrische Erscheinungen bei ihrem Entstehen und ihrem weiteren Verlauf zeigen.

Erster Abschnitt: Mechanik.

Teil I: Geometrische Bewegungslehre.

§ 1. Alle Bewegungen der Körper geschehen im Raume und in der § 1.
Zeit. Ob ein Körper sich bewegt, erkennen wir daran, daß seine Entfernungen von anderen Körpern sich ändern. Deshalb kann man stets nur von relativen Bewegungen sprechen. Sieht man von den Ursachen ab, die die Bewegungen hervorrufen, so handelt es sich allein darum, die Beziehungen aufzusuchen, die zwischen den räumlichen und den ihnen entsprechenden zeitlichen Veränderungen bestehen. Da wir uns jeden Körper aus sehr vielen, sehr kleinen Teilchen zusammengesetzt denken können, so nehmen wir noch eine weitere Vereinfachung unserer Aufgabe vor und untersuchen erst die Bewegungen eines solchen Teilchens, d. h. eines materiellen Punktes. Hierbei kommen nur Bewegungen in einer geraden oder krummen Linie in Betracht. Gleichzeitig damit verbundene Drehungen um eine Achse oder gegenseitige Verschiebungen einzelner Teile sind ausgeschlossen. Die Bewegungsgesetze, die für einen materiellen Punkt gelten, sind auch für einen ausgedehnten Körper richtig, wenn die Bahnen der sämtlichen, ihn zusammensetzenden materiellen Punkte parallel sind.

A. Geradlinige Bewegungen.

§ 2. Ändert sich die Bewegungsrichtung nicht, so ist die Bahn eine § 2.
geradlinige Strecke. Nun kann ein materieller Punkt gleiche Strecken entweder in gleichen oder verschiedenen Zeiten durchlaufen, man sagt dann, er bewegt sich mit derselben oder verschiedener Geschwindigkeit, und nennt die Bewegung gleichförmig oder ungleichförmig.

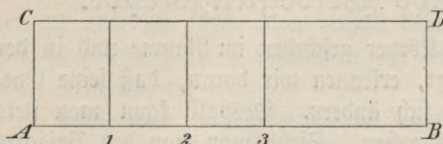
1. Gleichförmige Bewegung.

§ 3. Ein Maß der Geschwindigkeit bei der gleichförmigen Bewegung § 3.
ist der in der Zeiteinheit, z. B. 1 Sekunde, zurückgelegte Weg. Hat ein Körper in der Zeit t den Weg s mit der Geschwindigkeit c durchlaufen, so ist $c = \frac{s}{t}$. Das Messen einer Geschwindigkeit ist so auf das Messen einer Länge und einer Zeit zurückgeführt. Mit der Geschwindigkeitseinheit

bewegt sich ein Körper, der in der Zeiteinheit die Wegeinheit zurücklegt. Je nach der Wahl der Längen- und Zeiteinheit wird die Maßzahl für die Geschwindigkeit verschieden ausfallen. Um jede Unbestimmtheit zu vermeiden, müssen die zugrunde gelegten Einheiten ersichtlich gemacht werden. Durchläuft ein Körper in jeder Sekunde einen Weg von 15 m, so bezeichnet man seine Geschwindigkeit mit $15 \frac{\text{m}}{\text{sec}} = 15 [\text{m sec}^{-1}]$.

Die gerade Linie AB (Fig. 1) enthalte so viel Längeneinheiten als die Dauer der betrachteten Bewegung Zeiteinheiten, dann stellt jeder Punkt dieser Geraden z. B. 1, 2, 3 usw. einen bestimmten Zeitpunkt der Bewegung

Fig. 1.



dar, und wir nennen $AB = t$ deshalb die Zeitlinie. In den Punkten A, 1, 2, 3 ... errichten wir Senkrechte $= c$ auf AB und verbinden ihre Endpunkte. Die Linie CD heißt dann die Geschwindigkeitslinie, sie ist in unserem Falle eine Parallele zur Zeitlinie. Nun ist der Inhalt des Rechtecks $ABCD = c \cdot t$. Da der in t Sek. mit der Geschwindigkeit c zurückgelegte Weg $s = c \cdot t$ war, so erhalten wir folgenden Satz:

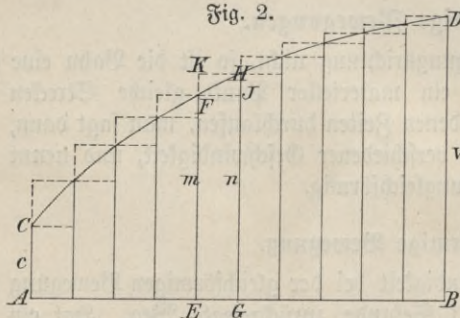
Die von der Zeitlinie AB, der Geschwindigkeitslinie CD, der Anfangsgeschwindigkeit AC und der Endgeschwindigkeit BD eingeschlossene Fläche enthält so viel Flächeneinheiten als der zurückgelegte Weg Längeneinheiten.

2. Ungleichförmige Bewegung.

§ 4.

§ 4. Bei einer ungleichförmigen Bewegung ändert sich die Geschwindigkeit in jedem Augenblick. Ist bei einer derartigen Bewegung im Zeitmoment t die Geschwindigkeit v , so soll das heißen: Würde der Körper

Fig. 2.

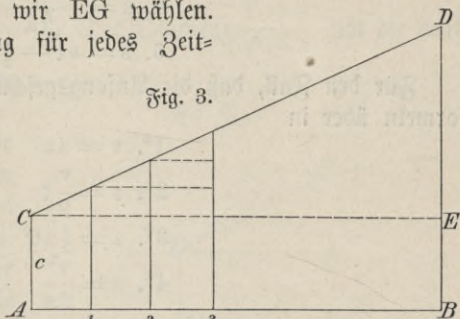


sich von jenem Moment ab gleichförmig bewegen, so würde er in jeder Sekunde einen Weg von v Metern zurücklegen.

AB (Fig. 2) stelle wieder die Zeitlinie dar, auf der wir in den verschiedenen Punkten Senkrechte errichten gleich den Geschwindigkeiten, die der Körper in den einzelnen Zeitmomenten hat, z. B. sei $AC = c$ die Geschwindigkeit im Anfange der zu untersuchenden Bewegung, $EF = m$ die Geschwindigkeit im Zeitpunkt E, $GH = n$ die Geschwindigkeit im Zeitpunkt G, $BD = v$ die Endgeschwindigkeit, die der Körper im Moment B erreicht, d. h. nach t Sekunden vom Anfangspunkt A aus gerechnet.

Verbindet man die so erhaltenen Endpunkte C... F, H... D, so ergibt sich eine gebrochene Linie, die in eine Kurve übergeht, wenn wir die Zeiteilchen EG, in die die Zeitlinie AB zerlegt wurde, unendlich klein annehmen. Die so erhaltene krumme Linie heißt die Geschwindigkeitskurve. Hätte sich der Körper während des Zeiteilchens EG gleichförmig mit der Geschwindigkeit EF bewegt, so würde nach obigem Satz das Rechteck EGIF so viel Flächeneinheiten enthalten als der in dieser Zeit zurückgelegte Weg Längeneinheiten. Dagegen würde das Rechteck EGHK den zurückgelegten Weg messen, wenn der Körper sich in dieser Zeit gleichförmig mit der Geschwindigkeit GH bewegt hätte. Die wirkliche Wegeslänge muß notwendig zwischen diesen Grenzen liegen, die um so näher aneinander rücken, je kleiner wir EG wählen.

Stellen wir dieselbe Überlegung für jedes Zeiteilchen der ganzen Bewegungsdauer t an, so erhalten wir für die Weglänge s in der Zeit t als untere und obere Grenze zwei treppenförmige Flächen, wie dies die Figur 2 angibt. Die Inhalte dieser Flächen fallen für unendlich kleine Zeiteilchen mit dem Inhalt der Fläche zusammen, die durch die Zeitlinie, die Anfangs- und Endgeschwindigkeit und die Geschwindigkeitskurve begrenzt wird. Hiermit ist die Richtigkeit des obigen Satzes auch für eine ungleichförmige Bewegung erwiesen.



§ 4a. Gleichförmig beschleunigte Bewegung. Stellt die § 4a. Gerade CD die Geschwindigkeitskurve dar (Fig. 3), dann ist die Geschwindigkeit von $AC = c$ gewachsen bis $BD = v$, hat also um $ED = v - c$ zugenommen. Diese Zunahme hat gleichmäßig, wie aus der Figur ersichtlich ist, in t Sekunden stattgefunden. Die Änderung beträgt demnach in 1 Sek. $\frac{v-c}{t}$. Eine derartige Bewegung, bei der in gleichen Zeiten die Geschwindigkeit um gleichviel wächst, heißt gleichförmig beschleunigt, und die Zunahme $\frac{v-c}{t}$ in 1 Sek. nennt man die Beschleunigung. Das Messen einer Beschleunigung läßt sich also auf das Messen einer Geschwindigkeit und einer Zeit zurückführen. Nimmt die Geschwindigkeit z. B. in 1 Sekunde um 10 [cm sec⁻¹] zu, so beträgt die Beschleunigung 10 [cm sec⁻²].

Nach Figur 3 ist $\text{tang DCE} = \frac{DE}{CE} = \frac{v-c}{t}$, d. h. die trigonometrische

Tangente des Winkels, den die Geschwindigkeitslinie mit der Zeitlinie bildet, gibt hier den Zahlenwert der Beschleunigung an.

Wir bezeichnen die Beschleunigung mit a und können aus der Figur die Gleichung ablesen.

$$1. v = c + at.$$

Da der in t Sekunden zurückgelegte Weg s soviel Längeneinheiten enthält als das Trapez $ABDC$ Flächeneinheiten, so finden wir

$$2. s = \frac{v+c}{2} t.$$

Sind von den fünf Größen, die in den Gleichungen 1. und 2. vorkommen, drei gegeben, so sind die beiden anderen bestimmt; z. B.

$$3. s = ct + \frac{1}{2} at^2$$

$$4. s = \frac{v^2 - c^2}{2a}$$

$$5. s = vt - \frac{1}{2} at^2$$

Für den Fall, daß die Anfangsgeschwindigkeit $c = 0$ ist, gehen diese Formeln über in

$$1^*. v = at$$

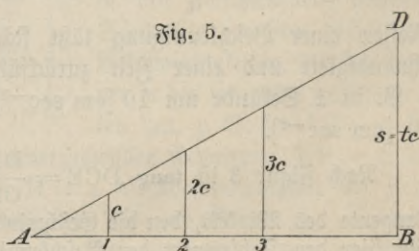
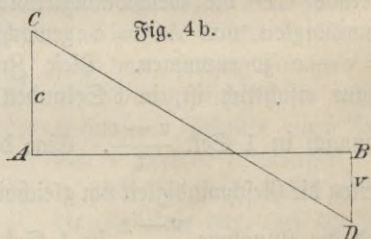
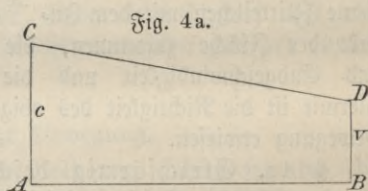
$$2^*. s = \frac{v}{2} t$$

$$3^*. s = \frac{1}{2} at^2$$

$$4^*. s = \frac{v^2}{2a}$$

Für die gleichförmig verzögerte Bewegung ist CD (Fig. 4 a und b) die Geschwindigkeitskurve. Nach obigem Satz ergeben sich hier entsprechende Formeln, die mit den eben aufgestellten bis auf das Vorzeichen von a übereinstimmen. Man kann also eine gleichförmig verzögerte Bewegung ansehen als eine gleichförmig beschleunigte, bei der die Beschleunigung negativ ist.

Wir hatten bisher die Geschwindigkeitskurve benutzt, um eine geradlinige Bewegung zu untersuchen. Es läßt sich dieser Zweck noch in anderer Weise durch Zeichnung erreichen. Errichten wir auf der Zeitlinie in den einzelnen Punkten wieder Senkrechte, machen sie aber diesmal gleich den zurückgelegten Wegen, so erhalten wir im allgemeinen eine krumme Linie,



die Wegkurve, deren Gestalt und Lage ebenfalls die fragliche Bewegung vollkommen bestimmt. Für die gleichförmige Bewegung mit der Geschwindigkeit c war $s = ct$. Die Wegkurve ist in diesem Falle eine Gerade AD , die mit der Zeitlinie den $\angle BAD$ bildet, dessen trigonometrische Tangente gleich der Geschwindigkeit c ist (Fig. 5).

§ 4b. Ungleichförmig beschleunigte Bewegung. Die krumme Linie APP' ... (Fig. 6) stelle die Wegkurve einer beliebigen ungleichförmigen Bewegung dar, die von den Kurvenpunkten P und P' auf die Zeitlinie gefällten Senkrechten PQ und $P'Q'$ messen dann die Wege s und s' , die in den Zeiten $AQ = t$ und $AQ' = t'$ zurückgelegt wurden. Schneidet die durch P zur Zeitlinie gezogene Parallele die $P'Q'$ in R , so ist $\text{tang } PPR = \frac{PR}{PQ} = \frac{s' - s}{t' - t}$. Der Quotient $\frac{s' - s}{t' - t}$ gibt die mitt-

lere Geschwindigkeit während der Zeit $t' - t$ an. Je weniger sich t' von t unterscheidet, desto mehr nähert sich dieser Quotient einem Grenzwerte, der augenblicklichen Geschwindigkeit im Zeitpunkt t . Die Sehne PP' geht dann über in die Tangente in P , und die ungleichförmige Bewegung kann für den Zeitpunkt t durch eine gleichförmige ersetzt werden, deren Wegkurve die Tangente T in P ist.

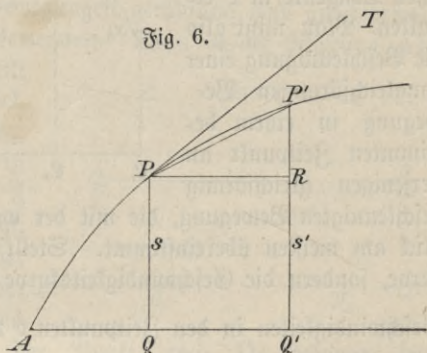


Fig. 6.

Unsere Betrachtung führt demnach zu derselben Erklärung der Geschwindigkeit einer ungleichförmig veränderten Bewegung, von der wir in § 4 ausgegangen sind. Mathematisch können wir diese Definition durch

die Gleichung $v = \limes \left[\frac{s' - s}{t' - t} \right]_{t'=t} = \frac{ds}{dt}$ wiedergeben.

Beispiel. Die Wegkurve sei durch die Gleichung $s = ct + \frac{1}{2}at^2$ gegeben, dann ist $s' = ct' + \frac{1}{2}at'^2$, demnach

$$s' - s = c(t' - t) + \frac{1}{2}a(t'^2 - t^2), \text{ mithin}$$

$$\frac{s' - s}{t' - t} = c + \frac{1}{2}a(t' + t) \text{ und für } t' = t$$

$$v = \limes \left[\frac{s' - s}{t' - t} \right]_{t'=t} = \frac{ds}{dt} = c + at.$$

Diese Gleichung für v charakterisiert die Bewegung als eine gleichförmig beschleunigte mit der Anfangsgeschwindigkeit c und der Beschleunigung a .

Um zu erkennen, was man unter Beschleunigung einer ungleichförmig veränderten Bewegung zu verstehen hat, zeichnen wir die Geschwindigkeitskurve (Fig. 7) einer derartigen Bewegung und erzeugen zunächst die Kurve durch den gebrochenen Sehnenzug $P_1P_2P_3 \dots$, die ungleichförmige

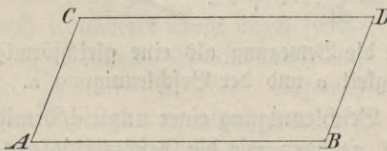
Bewegung also durch viele gleichförmig beschleunigte Bewegungen. Die Steigungsverhältnisse $\operatorname{tg} a_1, \operatorname{tg} a_2 \dots$ der einzelnen Sehnen stellen dann die Beschleunigungen der Teilbewegungen dar (§ 4a). Je näher wir die Punkte $P_1 P_2 \dots$ wählen, um so mehr fallen die Richtungen der Sehnen mit den Richtungen der entsprechenden Kurventangenten zusammen, so daß wir für die wahre Bewegung als Beschleunigung in einem bestimmten Zeitpunkt Q das Steigungsverhältnis $\operatorname{tg} a$ der geometrischen Tangente in P erhalten. Man mißt also die Beschleunigung einer ungleichförmigen Bewegung in einem bestimmten Zeitpunkt an derjenigen gleichförmig beschleunigten Bewegung, die mit der wahren Bewegung in jenem Augenblick am meisten übereinstimmt. Stellt in Fig. 6 APP' nicht die Wegkurve, sondern die Geschwindigkeitskurve dar, dann sind PQ und $P'Q'$ die Geschwindigkeiten in den Zeitpunkten t und t' , der Quotient $\frac{P'R}{PR} = \frac{v' - v}{t' - t}$ gibt die mittlere Beschleunigung während der Zeit $t' - t$ an, und für die Beschleunigung im Zeitpunkt t erhält man den Grenzwert

$$a = \limes \left[\frac{v' - v}{t' - t} \right]_{t' = t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}.$$

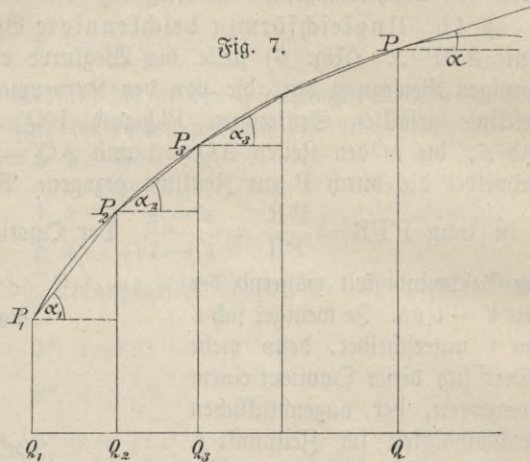
B. Zusammensetzung geradliniger Bewegungen.

1. Das Parallelogramm der Bewegungen.

§ 5. § 5. Zieht man eine Gerade längs des Lineals AB , und verschiebt man gleichzeitig das Lineal parallel mit sich in der Richtung AC , so kann man den Ort, wo sich die Schreibspitze nach irgend einer Zeit t befindet, stets angeben, sobald die Art der beiden Seitenbewegungen bekannt ist (Fig. 8).



Führt man nämlich die beiden Bewegungen nacheinander aus, verschiebt man z. B. zuerst das Lineal AB parallel mit sich während der Zeit t in die Lage CD und bewegt dann die Schreibspitze längs des



Lineals während der Zeit t , so gelangt man zu demselben Punkt D , den man bei gleichzeitiger Ausführung beider Bewegungen in der Zeit t erreicht hätte. Die Erfahrungstatsache, die sich hierin ausspricht, heißt **das Prinzip von der Unabhängigkeit der Bewegungen**. Da D die vierte Ecke des aus den beiden Seitenbewegungen AC und AB gebildeten Parallelogramms ist, so nennt man das Gesetz, nach dem sich die beiden Bewegungen zusammensetzen, **das Gesetz vom Parallelogramm der Bewegungen**. Die Bahn, die der bewegte Punkt in Wirklichkeit beschreibt, ergibt sich, wenn man die Bewegungsdauer in beliebig kleine Zeitabschnitte zerlegt und obige Parallelogrammkonstruktion für jeden Zeitabschnitt wiederholt.

2. Zusammensetzung gleichförmiger Bewegungen.

§ 6. Sind die beiden Seitenbewegungen geradlinig und gleichförmig, § 6. so ist es auch die resultierende Bewegung. Denn in der Richtung AB

(Fig. 9) würde ein materieller Punkt bei der Geschwindigkeit c in t_1 Sek. den Weg $AB_1 = ct_1$ beschreiben, während er in der Richtung AC in t_1 Sek. bei der Geschwindigkeit d den Weg $AC_1 = dt_1$ zurücklegt. In Wirklichkeit befindet sich der Punkt nach t_1 Sek. in D_1 , der vierten Ecke des Parallelogramms

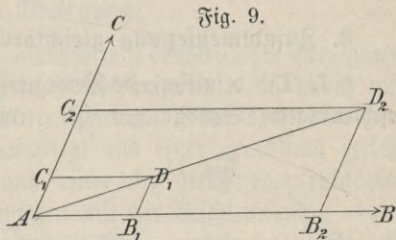


Fig. 9.

Nach t_2 Sek. ist der Punkt nach D_2 gelangt, der vierten Ecke des Parallelogramms $AB_2C_2D_2$, wo $AB_2 = ct_2$ und $AC_2 = dt_2$ ist. Nun sind die Parallelogramme $AB_1C_1D_1$ und $AB_2C_2D_2$ ähnlich und ähnlich gelegen, mithin muß AD_1D_2 eine Gerade

Fig. 10 a.

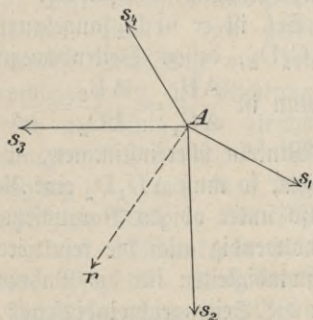
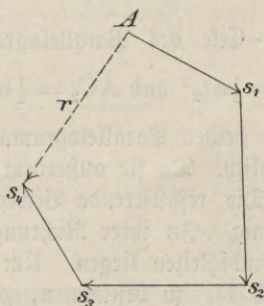


Fig. 10 b.



sein. Da dieselbe Betrachtungsweise für irgend zwei Zeitabschnitte t_1 und t_2 gilt, so ist die ganze resultierende Bewegung geradlinig. Es ist ferner:

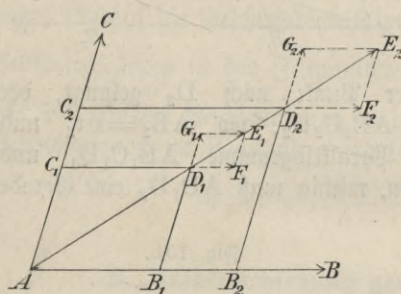
$\frac{AD_1}{AD_2} = \frac{ct_1}{ct_2} = \frac{t_1}{t_2}$, die zurückgelegten Wege verhalten sich also wie die dazu verwendeten Zeiten; die resultierende Bewegung ist demnach auch gleichförmig. Für den Fall, daß $t_1 = 1$ Sek. ist, stellen AB_1 und AC_1 die Seitengeschwindigkeiten c und d dar, während die Diagonale die resultierende Geschwindigkeit angibt (Parallelogramm der Geschwindigkeiten).

Werden einem Punkte mehr als zwei geradlinige und gleichförmige Bewegungen erteilt, so kann man zunächst zwei zu einer einzigen Bewegung zusammensetzen, diese mit der dritten zu einer neuen Resultierenden usw. Die Konstruktion läßt sich dadurch abkürzen, daß man nur die Seitenbewegungen oder Geschwindigkeiten ihrer Größe und Richtung nach aneinander anträgt. Die schließende Seite des Polygons ist dann die gesuchte Resultante. Ihre Richtung ist dem Linienzug der Seitenbewegungen entgegengesetzt. (S. d. Fig. 10a und b.)

3. Zusammensetzung gleichförmig beschleunigter Bewegungen.

§ 7. § 7. Die resultierende Bewegung zweier geradlinigen und gleichförmig beschleunigten Bewegungen ist geradlinig und gleichförmig beschleunigt,

Fig. 11.



wenn beide Anfangsgeschwindigkeiten Null sind. Bezeichnen wir die Beschleunigungen in den Bewegungsrichtungen AB und AC (Fig. 11) mit a und b , dann würden die in t_1 Sek. in diesen Richtungen zurückgelegten Wege $AB_1 = \frac{1}{2}at_1^2$ und $AC_1 = \frac{1}{2}bt_1^2$ sein. Der beiden Bewegungen folgende Punkt befindet sich nach t_1 Sek. in D_1 , der vierten Ecke des Parallelogramms $AB_1C_1D_1$. Nach t_2 Sek. ist er in D_2 angelangt, der vierten Ecke des Parallelogramms $AB_2C_2D_2$, dessen Seitenbewegungen $AB_2 = \frac{1}{2}at_2^2$ und $AC_2 = \frac{1}{2}bt_2^2$ sind. Nun ist $\frac{AB_1}{AC_1} = \frac{AB_2}{AC_2} = \frac{a}{b}$, und da die beiden Parallelogramme in den Winkeln übereinstimmen, so sind sie ähnlich. Da sie außerdem ähnlich liegen, so muß AD_1D_2 eine Gerade sein. Die resultierende Bewegung ist also unter obigen Voraussetzungen geradlinig. In ihrer Richtung müssen notwendig auch die resultierenden Geschwindigkeiten liegen. Um diese Geschwindigkeiten für die Bahnpunkte D_1 und D_2 zu bestimmen, zeichnen wir die Seitengeschwindigkeiten, die jede Bewegung für sich allein in D_1 und D_2 hervorbringen würde. Wir machen also $D_1F_1 = at_1$, $D_1G_1 = bt_1$, $D_2F_2 = at_2$ und $D_2G_2 = bt_2$ und erhalten nach dem Gesetz vom Parallelogramm der Geschwindigkeiten

die Resultanten $v_1 = D_1E_1$ und $v_2 = D_2E_2$. Aus der Ähnlichkeit der Parallelogramme $D_1F_1E_1G_1$ und $D_2F_2E_2G_2$ folgt $\frac{v_1}{v_2} = \frac{at_1}{at_2} = \frac{t_1}{t_2}$, d. h. die resultierende Bewegung ist eine gleichförmig beschleunigte. Für den Fall, daß $t_1 = 1$ Sek. ist, stellen D_1F_1 und D_1G_1 die Seitenbeschleunigungen a und b dar, während die Diagonale D_1E_1 der Größe und Richtung nach die resultierende Beschleunigung angibt. (Parallelogramm der Beschleunigungen.)

Was wir oben über die Zusammensetzung oder Zerlegung von mehr als zwei geradlinigen und gleichförmigen Bewegungen und Geschwindigkeiten gesagt haben, gilt auch für geradlinige und gleichförmig beschleunigte Bewegungen. Neu hinzu tritt noch die Zusammensetzung und Zerlegung von Beschleunigungen.

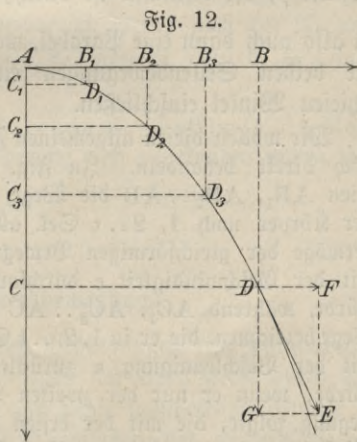
4. Zusammensetzung einer gleichförmigen und einer gleichförmig beschleunigten Bewegung.

§ 8. a) Für eine geradlinige und gleichförmig beschleunigte Bewegung, § 8. deren Anfangsgeschwindigkeit c und deren Beschleunigung a ist, haben wir bereits in § 4a die geltenden Formeln abgeleitet. Man kann eine derartige Bewegung ansehen als zusammengesetzt aus einer geradlinig gleichförmigen mit der Geschwindigkeit c und einer ihr gleich oder entgegengesetzt gerichteten, gleichförmig beschleunigten mit der Beschleunigung a und der Anfangsgeschwindigkeit Null. Der in t Sek. zurückgelegte Weg ist dann die algebraische Summe der Wege ct und $\frac{1}{2}at^2$, die in t Sek. erreichte Endgeschwindigkeit v die algebraische Summe der Geschwindigkeiten c und at . Es ergeben sich so dieselben Gleichungen wie auf Seite 6.

$$s = ct \pm \frac{1}{2}at^2 \text{ und } v = c \pm at.$$

b) Wir betrachten nun den Fall, daß einem Punkte eine geradlinig gleichförmige Bewegung mit der Geschwindigkeit c in der Richtung AB und eine geradlinig und gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Beschleunigung a und der Anfangsgeschwindigkeit Null in der Richtung AC , die auf AB senkrecht steht, erteilt wird (Fig. 12). Nach dem Gesetz

vom Parallelogramm der Bewegungen können wir für die Zeitpunkte $1, 2 \dots t$ die Bahnpunkte $D_1D_2 \dots D$ konstruieren. Wir finden dann für die resultierende Bahn eine Kurve, deren Natur durch die beiden Seitenbewegungen vollkommen bestimmt ist. Bezeichnen wir mit x den Weg



AC, den der Körper nach t Sek. vermöge der gleichförmig beschleunigten Bewegung allein zurücklegen würde, mit y den Weg AB, den der Körper machen müßte, wenn er nur der gleichförmigen Seitenbewegung folgte, so bestehen die Gleichungen $x = \frac{1}{2}at^2$ und $y = ct$, welche die Lage eines Bahnpunktes D bestimmen, der nach irgend einer Zeit t erreicht wird. Durch Elimination von t ergibt sich $y^2 = \frac{2c^2}{a}x$.

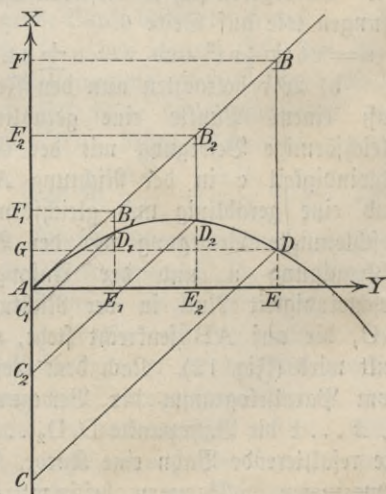
Die Bahn ist also eine Parabel, deren Scheitel der Anfangspunkt A der Bewegung ist und deren Hauptachse mit der Richtung der gleichförmig beschleunigten Seitenbewegung zusammenfällt. Die Parabel ist bestimmt durch den halben Parameter $p = \frac{c^2}{a}$. Die Geschwindigkeit DE = v für irgend einen Bahnpunkt D findet man nach dem Parallelogrammgesetz aus den Seitengeschwindigkeiten DF = c und DG = at , es ist $v = \sqrt{c^2 + a^2t^2} = \sqrt{c^2 + 2ax}$. Da die augenblickliche Bewegungsrichtung in D mit der Parabeltangente in diesem Punkte zusammenfällt, so gibt die Tangente auch die Richtung der Geschwindigkeit in D an.

c) Sieht man D als Anfangspunkt der Bewegung an, so kann man sich die weitere resultierende Bewegung auch hervorgerufen denken durch eine geradlinig gleichförmige in der Richtung DE mit der Geschwindigkeit $v = \sqrt{c^2 + a^2t^2}$ und eine geradlinige und gleichförmig beschleunigte Bewegung in der Richtung DG mit der Anfangsgeschwindigkeit Null und der Beschleunigung a . Die beiden Seitenbewegungen bilden dann einen Winkel φ , der bestimmt ist durch $\operatorname{tg} \varphi = \frac{DF}{DG} = \frac{c}{at}$. Die resultierende Bahn

ist also auch dann eine Parabel, wenn die beiden Seitenbewegungen einen schiefen Winkel einschließen.

Wir wollen diesen allgemeinen Fall noch direkt behandeln. In Fig. 13 seien $AB_1, AB_2 \dots AB$ die Wege, die der Körper nach 1, 2... t Sek. allein vermöge der gleichförmigen Bewegung mit der Geschwindigkeit c durchlaufen würde, während $AC_1, AC_2 \dots AC$ die Wege bezeichnen, die er in 1, 2, ... t Sek. mit der Beschleunigung a zurücklegen würde, wenn er nur der zweiten Bewegung folgte, die mit der ersten den Winkel $BAC = \varphi$ bildet. Nach dem Parallelogrammgesetz konstruieren wir die Bahnpunkte $D_1, D_2 \dots D$ der resultierenden Bewegung. Die Projektionen dieser Punkte auf die zu AC senkrechte

Fig. 13.



Gerade AY seien $E_1E_2 \dots E$. Beziehen wir die Lage der Punkte $D_1D_2 \dots D$ auf das feste Achsensystem AX, AY , wo AX entgegengesetzt AC gerichtet sein soll, dann ist Punkt D festgelegt durch seine Koordinaten $AE = y$ und $DE = x$. Nun ist 1. $y = AB \cos(\varphi - 90) = ct \cos a$, wenn wir $\varphi - 90^\circ$ mit a bezeichnen, und 2. $x = BE - BD = BE - AC = ct \sin a - \frac{1}{2}at^2$. Durch Elimination von t aus 1. und 2. folgt:

$$x = y \operatorname{tang} a - \frac{a}{2c^2 \cos^2 a} y^2$$

oder $\left(y - \frac{c^2 \sin 2a}{2a} \right)^2 = \frac{2c^2 \cos^2 a}{a} \left(\frac{c^2 \sin^2 a}{2a} - x \right)$, d. h.

die Bahnkurve ist eine Parabel, deren Scheitelpunkt durch die Koordinaten $x = \frac{c^2 \sin^2 a}{2a}$ und $y = \frac{c^2 \sin 2a}{2a}$ bestimmt ist.

zerlegt man die Anfangsgeschwindigkeit $AB_1 = c$ nach der X - und Y -Achse in die Komponenten $AE_1 = c \cos a$ und $AF_1 = c \sin a$, so kann man die wirkliche Bewegung ersetzen durch 1. eine gleichförmige mit der Geschwindigkeit $c \cos a$ in der Richtung AY , 2. eine gleichförmige mit der Geschwindigkeit $c \sin a$ in der Richtung AX , 3. eine gleichförmig beschleunigte Bewegung in der AX entgegengesetzten Richtung AC mit der Beschleunigung a . In t Sec. würde der Körper

$$\begin{array}{lll} \text{vermöge der 1. Bewegung den Weg } AE = y = ct \cos a \\ \text{'' '' 2. '' '' '' } AF = ct \sin a \\ \text{'' '' 3. '' '' '' } AC = \frac{1}{2}at^2 \end{array}$$

durchlaufen. Die 2. und 3. Bewegung ergeben den Weg $AG = x = ct \sin a - \frac{1}{2}at^2$. Wir gelangen so zu denselben Gleichungen wie oben 1. $y = ct \cos a$ und 2. $x = ct \sin a - \frac{1}{2}at^2$. Hat der Körper im Bahnpunkt D die Geschwindigkeit v , und nennen wir die Komponenten von v nach der X - und Y -Achse v_x und v_y , so ist $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$. Nun ist aber $v_x = c \sin a - at$ und $v_y = c \cos a$, demnach

$$v = \sqrt{c^2 + a^2t^2 - 2atc \sin a} = \sqrt{c^2 - 2a(ct \sin a - \frac{1}{2}at^2)} = \sqrt{c^2 - 2ax}.$$

Die tangentielle Beschleunigung oder Verzögerung nach t Sekunden finden wir

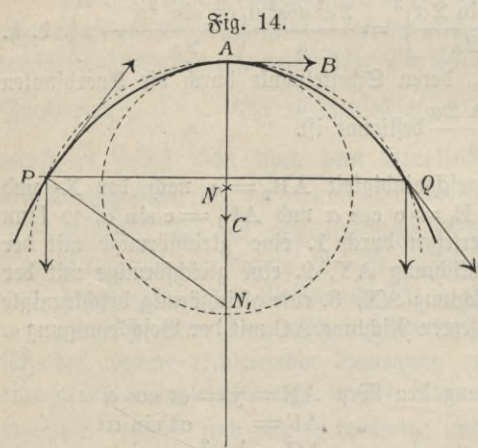
$$\text{aus dem Grenzwerte } \left[\frac{v' - v}{t' - t} \right]_{t=t} = \frac{dv}{dt} = \frac{a(at - c \sin a)}{v}.$$

5. Gleichförmige Kreisbewegung.

§ 9. Um zu erkennen, unter welchen Bedingungen eine parabolische § 9. Bewegung in eine kreisförmige übergeht, legen wir einen Kreis durch den Scheitel A der Parabelbahn und zwei zur Achse symmetrische Punkte P und Q (Fig. 14). In A ist der Winkel zwischen der augenblicklichen Bewegungsrichtung AB und der Richtung AC der beschleunigten Seitenbewegung gleich 90° , in P ist dieser Winkel größer, in Q um ebensoviel kleiner. Die Bahngeschwindigkeit nimmt nach dem vorigen Paragraphen von P ab bis A und wächst dann wieder, bis sie in Q so groß ist wie

in P. Im Scheitelpunkt, wo ein Übergang vom Abnehmen zum Wachsen stattfindet, ist also die Geschwindigkeitsänderung Null.

Man erkennt hieraus, daß die beschleunigte Seitenbewegung nur dann nicht abändernd auf die Bahngeschwindigkeit wirkt, wenn ihre Richtung senkrecht zur augenblicklichen Bewegungsrichtung ist. Zeichnen wir in P die Parabelnormale, die die Achse in N_1 schneidet, so ist $AN_1 = p + x_1$, wenn p den halben Parameter und x_1 den Abstand



des Punktes P von AB bedeutet. Je näher wir die Punkte P und Q an A herandrücken, desto genauer gibt der Kreis durch PAQ die Krümmung der Parabel in A an. Lassen wir P und Q mit A zusammenfallen, dann wird $x_1 = 0$, also $AN_1 = p =$ dem Radius AN des Krümmungskreises für den Parabelpunkt A. Für p hatten wir den Wert $\frac{c^2}{a}$ gefunden (§ 8b), wo c die Geschwindigkeit im Scheitel A und a die Beschleunigung

in der Richtung AC bezeichnete. Der Radius des Krümmungskreises in A ist somit $r = \frac{c^2}{a}$. Nun können wir jeden Punkt dieses Kreises als Scheitel einer Parabel von gleicher Krümmung ansehen. Die Achsen dieser Parabeln laufen dann alle durch den Kreismittelpunkt, und ihre Halbparameter sind gleich dem Krümmungsradius r . Demnach können wir eine kreisförmige Bewegung in jedem Bahnpunkt ersetzen durch eine geradlinige und gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit Null und der Beschleunigung a , deren Richtung stets durch den Kreismittelpunkt geht, und eine geradlinig gleichförmige Bewegung mit der Geschwindigkeit c , die zur ersten Bewegung stets senkrecht ist.

Ein materieller Punkt muß sich stets gleichförmig auf einem Kreise vom Radius r bewegen, wenn wir ihm in irgend einem Peripheriepunkte eine Anfangsgeschwindigkeit c in der Richtung der Tangente geben, und wenn wir ihm ferner in jedem Augenblick eine nach dem Zentrum gerichtete Beschleunigung $a = \frac{c^2}{r}$ erteilen.

Eine derartige Bewegung nennt man Zentralbewegung und die

auf tretende Beschleunigung Zentripetalbeschleunigung. Macht ein Punkt in t Sekunden einen Umlauf, so legt er in 1 Sek. den Weg $\frac{2 r \pi}{t}$ zurück. Da dies die Bahngeschwindigkeit c ist, so finden wir für die Zentripetalbeschleunigung auch den Wert $a = \frac{4 r \pi^2}{t^2}$.

§ 9a. Zweite Ableitung der Formel $a = \frac{c^2}{r}$. Ein Punkt be- § 9a.

wege sich gleichförmig mit der Geschwindigkeit c auf dem Kreise O (Fig. 14a). In einem bestimmten Augenblicke befinde er sich in A , τ Sekunden später in A' . Die Tangenten AB und $A'B'$ in A und A' geben der Größe und Richtung nach die jedesmalige Geschwindigkeit an. Zieht man $A'C'$ parallel und gleich AB und ergänzt das Dreieck $A'B'C'$ zum Parallelogramm $A'D'B'C'$, so können wir annehmen, daß die während der Zeit τ erfolgte Richtungsänderung der Geschwindigkeit durch das Hinzutreten der Geschwindigkeitskomponente $A'D'$ bewirkt worden ist. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke AOA' und $A'B'D'$

folgt nun $A'D' = \frac{A'B'}{AO} \cdot AA' = \frac{c}{r} \cdot AA'$.

Da $A'D'$ den Geschwindigkeitszuwachs in τ Sekunden darstellt, so ist $\frac{A'D'}{\tau} = \frac{c}{r} \cdot \frac{AA'}{\tau}$

der Zuwachs in 1 Sekunde, d. h. die mittlere Beschleunigung während der Zeit τ (§ 4 b). Der Grenzwert des Quotienten $\frac{A'D'}{\tau}$

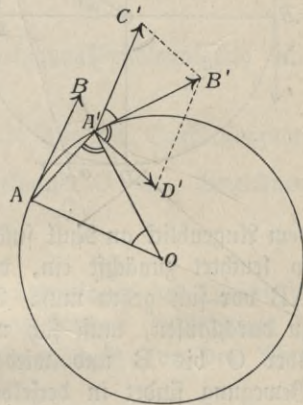
für ein unendlich kleines τ mißt die Be-

schleunigung a im Punkte A , und der Grenzwert des Quotienten $\frac{AA'}{\tau}$

ist gleich der Bahngeschwindigkeit c , da für ein unendlich kleines τ die Sehne AA' durch den zugehörigen Bogen ersetzt werden kann. Wir erhalten somit für die Beschleunigung im Punkte A den Wert $a = \frac{c^2}{r}$.

Diese Beschleunigung ist radial nach dem Mittelpunkt O gerichtet, denn aus der Figur folgt, daß $A'D'$ senkrecht zur Sehne AA' steht, für ein unendlich kleines τ also senkrecht zum Bogen.

Fig. 14a.



6. Einfache Schwingungen.

§ 10. In dem Kreise O vom Radius r sind zwei senkrechte Durch- § 10.
messer AB und CD gezogen (Fig. 15 a, b). Ein Punkt bewege sich

gleichförmig mit der Geschwindigkeit c auf dem Kreise von A über C, B, D. Für einen beliebigen Bahnpunkt P zerlegen wir die tangentiale Geschwindigkeit c und die zentripetale Beschleunigung a nach den Richtungen AB und CD. Ist Winkel $POA = \alpha$, so ergeben sich für die Geschwindigkeitskomponenten die Werte $c \sin \alpha$ und $c \cos \alpha$, während die Komponenten der Beschleunigung $a \cos \alpha$ und $a \sin \alpha$ sind. Wir untersuchen nun, welche Bewegung die in der Richtung AB wirkenden Komponenten allein hervorbringen würden. Nehmen wir an, daß die vertikalen Komponenten von

Fig. 15 a.

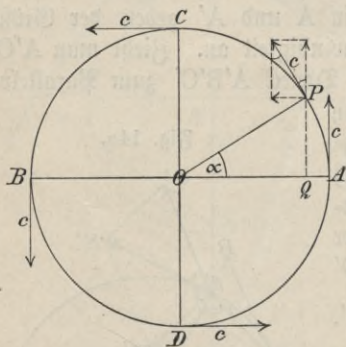
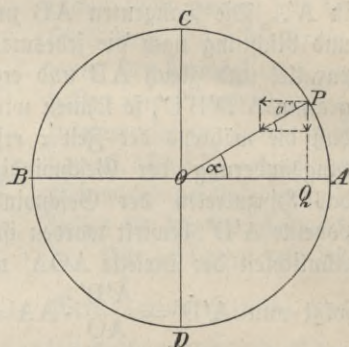


Fig. 15 b.



dem Augenblick an Null sind, wo sich der materielle Punkt in A befindet, so leuchtet zunächst ein, daß die weitere Bewegung in der Geraden AB vor sich gehen muß. Anstatt den Kreis von A über C, B, D bis A zu durchlaufen, muß sich nun der Punkt auf dem Durchmesser von A über O bis B und wieder über O zurück nach A bewegen. Diese Bewegung findet in derselben Zeit t statt, in der ein Umlauf auf dem Kreise vollendet sein würde. Dabei entspricht jedem Bahnpunkt Q auf dem Durchmesser AB wegen des Gesetzes von der Unabhängigkeit der Bewegungen ein Kreispunkt P, dessen Projektion auf AB der Punkt Q ist. Wenn wir aus weiter Ferne die gleichförmige Kreisbewegung eines Punktes beobachten, während unser Auge sich in der Ebene des Kreises befindet, so bewegt sich der Punkt scheinbar nur auf dem zur Sehrichtung senkrechten Durchmesser pendelartig hin und her.

Die neue Bewegung ist eine ungleichförmig beschleunigte oder verzögerte.

Denn setzen wir $\cos \alpha = \frac{OQ}{r}$, so ist im Punkt Q die Beschleunigung =

$a \cos \alpha = \frac{a}{r} \cdot OQ$, also proportional mit OQ, d. h. der Entfernung des

bewegten Punktes vom Mittelpunkt O der Bewegung. Ihren größten Wert a hat die Beschleunigung in A, hierauf nimmt sie ab bis Null in O, kehrt dann ihre Richtung um und wächst wieder, bis sie in B ihr

Maximum a erreicht. Nun nimmt sie wieder ab, wird Null in O , kehrt abermals ihre Richtung um und nimmt wieder zu bis a in A .

Die Geschwindigkeit $c \sin \alpha$ wächst von dem Werte Null in A bis zur Größe c in O , nimmt dann ab bis Null in B , kehrt ihre Richtung um, erreicht abermals ihr Maximum c in O und nimmt dann wieder bis Null ab in A . Damit ist ein Hin- und Hergang vollendet, und es kehren nun dieselben Bewegungszustände nach gleichen Zeitabschnitten wieder.

Derartige Bewegungen, bei denen periodisch dieselben Bewegungszustände wiederkehren, nennt man Schwingungen, die größte Ausweichung OA heißt die Schwingungsweite oder Amplitude, der augenblickliche Bewegungszustand während einer Schwingung wird Phase genannt. Die Zeit, die für einen Hin- und Hergang nötig ist, heißt Schwingungsdauer. Da sie gleich ist der Umlaufszeit für die kreisförmige Bewegung, so ergibt sich $t = \frac{2r\pi}{c}$ oder, wenn man für c den im § 9 abgeleiteten Wert \sqrt{ar}

einsetzt, $t = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{a}{r}}}$. Nun war $\frac{a}{r} \cdot OQ$ die Schwingungsbeschleunigung für

irgend einen Bahnpunkt Q . Der Bruch $\frac{a}{r}$ gibt also die Beschleunigung in der Entfernung l vom Schwingungsmittelpunkt O an. Bezeichnen wir diesen Bruch mit q , so wird $t = \frac{2\pi}{\sqrt{q}}$, d. h.

die Schwingungsdauer ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Schwingungsbeschleunigung in der Entfernung l vom Schwingungsmittelpunkt, demnach unabhängig von der Amplitude.

Ersetzen wir in der Gleichung $c = \sqrt{ar}$ die Größe a durch rq , so finden wir $c = r\sqrt{q}$, d. h.

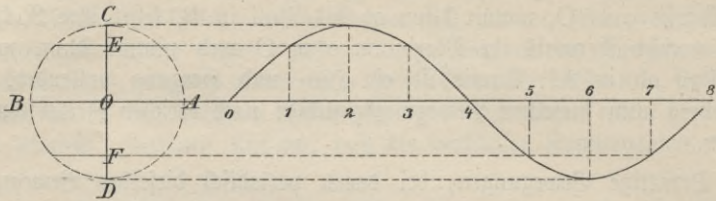
die größte Geschwindigkeit, die der schwingende Punkt beim Durchgang durch das Schwingungszentrum erlangt, ist der Amplitude direkt proportional.

Wir haben bisher nur die Bewegung auf dem Durchmesser AB untersucht. Es war dies die eine Komponente, in die sich die gleichförmige Kreisbewegung zerlegen ließ. Die zweite Komponente ist eine Schwingungsbewegung auf dem Durchmesser CD , die denselben Gesetzen gehorcht, gegen die erste Bewegung aber um ein Viertel der Schwingungsdauer verschoben ist.

Um die Wegkurve für eine der Schwingungskomponenten, z. B. CD , zu zeichnen, zerlegen wir den Kreis von C aus in eine beliebige Anzahl, etwa 8, gleicher Teile und ziehen durch die Teilpunkte die zu AB parallelen

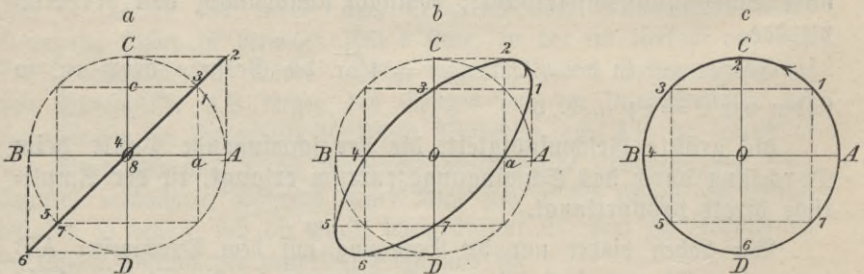
Sehnen, die den Durchmesser CD in den Punkten E und F schneiden (Fig. 16).

Fig. 16.



Sehen wir den Schwingungsmittelpunkt O als Anfangspunkt der Bewegung an, so ist nach $\frac{t}{8}$ Sek. die Bewegung in E, nach $2 \cdot \frac{t}{8}$ Sek. in C, nach $3 \cdot \frac{t}{8}$ wieder in E, nach $4 \cdot \frac{t}{8}$ in O usw. Die Zeitabschnitte $\frac{t}{8}$, $2 \cdot \frac{t}{8}$, . . . tragen wir als Strecken auf einer beliebigen Geraden, z. B. der Verlängerung von AB, von einem Punkte Null ab und errichten in den Teilpunkten Senkrechte gleich den zugehörigen, zurückgelegten Wegen. Die so erhaltenen Endpunkte gehören dann der gesuchten Wegkurve an, die eine Sinuskurve ist. Deshalb nennt man die hier betrachteten Schwingungen auch Sinusschwingungen. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß die Beschleunigung proportional der Entfernung von einem festen Punkte wächst und stets nach diesem Punkte hin gerichtet ist.

Fig. 17.



§ 10a. § 10a. Zusammensetzung von Sinusschwingungen. Wird ein Punkt von zwei Schwingungen ergriffen, so läßt sich die resultierende Bewegung in jedem Falle nach dem Parallelogrammgesetz bestimmen. In den Fig. 17 a, b, c ist die Zusammensetzung zweier senkrechten Schwingungen AB und CD von gleicher Dauer t und gleicher Amplitude $OA = OC$ für die Phasendifferenzen 0 , $\frac{t}{8}$, $\frac{t}{4}$ gezeichnet.

Im ersten Fall (Fig. 17 a) beginnen beide Schwingungen gleichzeitig mit derselben Phase. Ist der Massenpunkt anfangs in O, so würde er nach $\frac{t}{8}$ Sek. vermöge der horizontalen Bewegung nach a, vermöge der vertikalen nach c gelangen. In Wirklichkeit befindet er sich in 1, der vierten Ecke des aus den Seiten Oa und Oc gebildeten Parallelogramms.

In entsprechender Weise erhält man die Bahnpunkte 2, 3, ... 8, die sämtlich auf der Halbierungslinie des Winkels AOC liegen.

Im zweiten Fall (Fig. 17 b) ist die horizontale Bewegung der vertikalen um $\frac{t}{8}$ Sek. voraus, der materielle Punkt befindet sich also im Augenblick, wo die vertikale Bewegung einsetzt, bereits in a. Unter der Einwirkung beider Schwingungen gelangt er $\frac{t}{8}$ Sek. später nach 1, nach abermals $\frac{t}{8}$ Sek. nach 2 usw. und durchläuft so in der Richtung des Pfeils eine Ellipse.

Im dritten Fall (Fig. 17 c) beträgt die Phasendifferenz $\frac{t}{4}$. Die vertikale Schwingung beginnt erst, nachdem der Massenpunkt vermöge der horizontalen bereits nach A gekommen ist. Der gleichzeitige Einfluß beider Schwingungen führt ihn $\frac{t}{8}$ Sek. später nach 1, nach wiederum $\frac{t}{8}$ Sek. nach 2 usw. Als Resultat erhalten wir die links herum durchlaufene Kreisbahn, deren Radius OA ist.

Konstruiert man in gleicher Weise die Bahnkurven für irgend welche Phasendifferenzen, so ergibt sich als resultierende Schwingung im allgemeinen eine mehr oder weniger gestreckte Ellipse, die bei der Phasenverschiebung 0 und $\frac{1}{2}t$ in gerade Linien, bei $\frac{1}{4}t$ und $\frac{3}{4}t$ in einen Kreis übergeht.

Aufgabe. Man zeichne für verschiedene Phasendifferenzen die Schwingungskurven, die durch Zusammensetzung zweier senkrecht zueinander gerichteten Sinusschwingungen von gleicher Amplitude entstehen, wenn die Schwingungsdauern sich wie 1:2, 2:3, 3:4, 4:5 verhalten.

Teil II: Physikalische Grundbegriffe und Grundgesetze der Mechanik.

1. Begriff der Kraft.

§ 11. Wenn wir einen Körper in Bewegung setzen oder bei einem § 11. sich bewegenden Körper die Geschwindigkeit nach Größe oder Richtung abändern, so nehmen wir außer der hervorgebrachten Wirkung auch eine Anstrengung unserer Muskeln wahr. Sehen wir ein anderes Mal die gleiche Wirkung ohne unser Zutun eintreten, so schließen wir, daß auch in diesem Falle ähnliche, wenn auch verborgene Ursachen außer uns vorhanden sein müssen. Wir schreiben jede Änderung, die ein Körper in seinem Bewegungszustande erfährt, gewissen Ursachen zu, die wir Kräfte nennen.

Bewegung hervorbringende Kräfte sind z. B. die Muskelkraft der Menschen und Tiere, die Federkraft elastischer Körper, die Expansion

luftförmiger Körper, besonders derer, die beim Verdampfen und bei der Explosion der Sprengstoffe, wie Pulver, Dynamit, Schießbaumwolle, entstehen; die Schwerkraft. Man nennt diese Kräfte mechanische. Lasten schaffen wir auf Wagen fort, die von Menschen oder Tieren gezogen werden. Die Uhren werden durch eine Spiralfeder oder vermittelst der Gewichte durch die Erdanziehung in Bewegung gesetzt, der Pfeil durch die Federkraft des Bogens, die Eisenbahnzüge durch die Expansion des Wasserdampfes, die Büchsenkugel durch die Expansion der durch Verbrennung des Pulvers entstehenden Gase.

2. Begriff der Trägheit.

§ 12. § 12. Ein ruhender Körper kann nicht in Bewegung und ein sich bewegender nicht in Ruhe kommen, wenn nicht eine Kraft da ist, die seinen Zustand ändert.

Die Kugel, die von einer schiefen Ebene herunterrollt, ebenso das Wasser in den Flüssen, bewegt sich nicht von selbst, sondern wird von der Erdanziehung in Bewegung gesetzt. Wollen wir eine rollende Kugel aufhalten, so müssen wir eine gewisse Kraft anwenden. Ein Schlitten oder Wagen, der von einer Höhe herabgefahren ist, bewegt sich in der Ebene noch eine ganze Strecke von selbst fort. Soll ein Eisenbahnzug anhalten, so wird nicht nur die Lokomotive außer Tätigkeit gesetzt, sondern es wird auch gebremst.

Die Erfahrung lehrt zwar, daß jeder sich bewegende Körper, wenn die bewegende Kraft zu wirken aufhört, nach einiger Zeit wieder zur Ruhe kommt; es lassen sich aber auch stets entgegenwirkende Kräfte oder Störungen der Bewegung nachweisen, die die Bewegung wieder aufheben. Solche Störungen sind: der Widerstand der Luft, des Wassers, die Reibung; man nennt sie Hindernisse der Bewegung. Jeder sich bewegende Körper muß z. B. die Luft, die in seiner Bahn liegt, verdrängen, wodurch die Bewegung verzögert und allmählich aufgehoben wird. Ist ein Körper bei seiner Bewegung mit einem anderen in Berührung, der an seiner Bewegung nicht teilnimmt, z. B. wenn er auf einer Ebene fortrollt oder gleitet, so greifen die Erhöhungen seiner Oberfläche in die Vertiefungen der Bahn und umgekehrt ein, und es müssen nun, soll die Bewegung fort dauern, die Erhöhungen abgerissen werden, oder er muß über diese hinwegsteigen; dem Abreißen setzt sich die Festigkeit der Körper und dem Darüberhinwegsteigen die Erdanziehung entgegen. Irgend eine von allen Hindernissen freie Bewegung sind wir nicht imstande herzustellen. Da die Erfahrung aber zeigt, daß eine Bewegung desto länger dauert, je mehr wir die entgegenwirkenden Hindernisse beseitigen, so schließen wir:

Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern. (Trägheitsgesetz Galileis 1602; erstes Bewegungsgesetz Newtons 1686.)

Ein Eisenbahnzug bleibt länger in Bewegung als ein Wagen auf der Chaussee, wenn die bewegende Kraft aufhört. Ein auf der Erde fortgerollter Stein kommt eher zur Ruhe als ein auf eine Eisfläche geworfener Stein,

und dieser wieder eher als eine Kugel auf einer Eisfläche. Ein Rad, das frei an seiner Achse herumgedreht wird, dreht sich desto länger, je geringer die Reibung an dieser ist.

Auch das Umgekehrte ist richtig: So oft eine Kraft, sei sie auch noch so klein, auf einen Körper wirkt, so ändert sie dessen Bewegungszustand, wenn nicht eine andere Kraft ihre Wirkung aufhebt. Je mehr die entgegengewirkenden Kräfte beseitigt werden, eine um so geringere Kraft reicht hin, um einen Körper zu bewegen. Ein Schiff, das mehr als 1000 Zentner wiegt, kann bei ruhigem Wasser und ruhiger Luft von einem einzigen Manne fortgezogen werden. Die schwerste Last, die frei an einem Seile hängt, kann man mit einem Finger in Bewegung bringen. Ein Kind, das im Zimmer herumspringt, bringt die Mauern des Gebäudes oft so in Bewegung, daß die Fenster zittern.

Der Bewegungszustand eines Körpers läßt sich nicht plötzlich ändern, wir können ihn nicht augenblicklich aus der Ruhe in eine rasche Bewegung versetzen und umgekehrt. Hierauf beruhen viele Erscheinungen, die auf den ersten Blick etwas Überraschendes haben.

Legt man über ein Trinkglas ein Kartenblatt, auf dieses ein Geldstück und schnellt das Blatt mit dem Finger fort, so fällt das Geldstück in das Glas. Drückt man langsam mit einem Stock gegen die Scheibe eines offenstehenden Fensters, so bewegt sich daselbe, ohne daß die Scheibe zerbricht; sie zerbricht aber, wenn man den Stock mit größerer Geschwindigkeit bewegt; die Scheibe erhält gewöhnlich nur ein rundes Loch, ohne daß sie zertrümmert wird und ohne daß sich das Fenster merklich bewegt, wenn man eine Kugel durch daselbe schießt. Steht man in einem Wagen, und ziehen die Pferde plötzlich an, so fällt man rückwärts; hält der Wagen im Fahren plötzlich an, so fällt man vorwärts. Springt man von einem fahrenden Wagen ab, so verliert man nicht sofort seine Geschwindigkeit in der Bewegungsrichtung des Wagens. Wie muß man daher abspringen, um nicht zu fallen? Die auf dem Stiele locker gewordene Axt befestigt man, indem man mit dem Stiel gegen den Boden stößt. Der Reiter stürzt nach vorn, wenn das Pferd im schnellen Laufe plötzlich stillsteht.

3. Messen der Kräfte durch Druck oder Zug.

§ 13. Die Größe einer Kraft können wir, da sie selbst unserer Anschauung § 13. unzugänglich ist, nur nach der Größe ihrer Wirkung beurteilen. Ersetzen wir bei einem ruhenden Körper die Unterlage durch unsere Hand, so nehmen wir einen senkrecht nach unten gerichteten Druck wahr, den wir das Gewicht des Körpers nennen. Die Ursache dieses Druckes sehen wir in einer Anziehung, die zwischen dem Körper und der Erde vorhanden zu sein scheint (Schwerkraft). Hängen wir den Körper an einer Gummischur oder einer Spiralfeder auf, so übt dieselbe Kraft, die sich vorher als Druck äußerte, einen Zug aus, Schur oder Feder verlängern sich, und diese Verlängerung kann uns als Maß für die Größe des Zuges oder des ihm gleichen Druckes dienen. Messen wir jene Kraft mit einer Federwage am Fuße eines Turmes und an der Spitze, so läßt sich eine

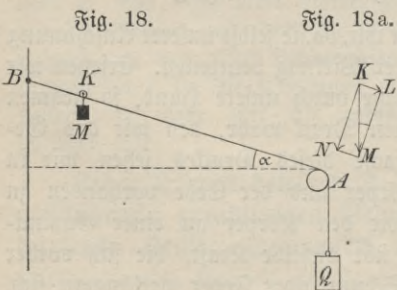
merkliche Verschiedenheit nicht wahrnehmen. Lassen wir nun den Körper von der Spitze des Turmes frei fallen, so machen wir unschwer die Beobachtung, daß die Bewegung in vertikaler Richtung erfolgt und immer schneller wird, je länger der Körper fällt. Der Grund für diese beschleunigte Bewegung kann nur jene konstante Kraft sein, die wir vorher als vertikalen Druck oder Zug wahrgenommen hatten. Allerdings gelingt es nicht ohne weiteres, durch direkte Beobachtung die Zunahme der Geschwindigkeit zu messen, und es bedurfte des Genies eines Galilei, um die Gesetzmäßigkeit der Fallbewegung zu erkennen.

4. Fallversuche.

§ 14. § 14. Galilei vermutete, daß die Fallbewegung eine gleichförmig beschleunigte wäre und daß, entgegen der bisher herrschenden Ansicht, alle Körper gleich schnell fielen. Um dies durch den Versuch zu bestätigen, ließ er Kugeln eine glatte Rinne, deren Steigung gegen den Horizont beliebig verändert werden konnte, hinabrollen und bestimmte die Wege, die nach 1, 2, 3 Zeiteinheiten durchlaufen wurden. Die Zeit maß er in origineller Weise genau bis auf Zehntel eines Pulsschlages, indem er Wasser aus der engen Bodenöffnung eines Timers ausströmen ließ, die ausgeflossene Wassermenge in einem Becher auffing und auf einer empfindlichen Wage wog. So fand er, bei wohl hundertfacher Wiederholung der Versuche, daß die zurückgelegten Wege den Quadraten der dazu verwendeten Zeiten proportional waren. Diese Gesetzmäßigkeit charakterisiert aber die Bewegung bereits als eine gleichförmig beschleunigte (§ 4a). Stellt man die Fallrinnen steiler, so ändert sich nicht die Art der Bewegung, nur die Beschleunigung nimmt zu.

Für eine Neigung der Bahn von 90° fällt der Körper frei. Es muß also auch diese Bewegung eine gleichförmig beschleunigte sein.

Zur Wiederholung der Fallversuche Galileis eignet sich außer der Fallrinne ein schräg gespannter Draht, auf dem ein kleines Rädchen mit einem an der Achse aufgehängten Gewichtstück ohne Schwanken herunterläuft. Man befestigt das eine Draht-



ende B an einer Zimmerwand, führt den Draht über eine Rolle A und spannt ihn durch ein Gewicht Q. Durch Heben und Senken der Rolle kann man den Neigungswinkel α , den der Draht mit der Horizontalen bildet, verändern. Das Rädchen K und das Gewichtstück M würden frei nach unten fallen mit einer Beschleunigung

$g = KM$ (Erdbeschleunigung) Fig 18a, wenn sie nicht durch den Draht gehalten würden. Wir zerlegen KM nach dem Gesetz vom Parallelogramm der Beschleunigungen (§ 7) in eine Komponente $KL = g \sin \alpha$ in der

Richtung AB und eine Komponente $KN = g \cos \alpha$ senkrecht AB. Für die Bewegung längs AB ist nur die Komponente KL von Einfluß, da die Festigkeit des Drahtes eine Bewegung in der Richtung KN verhindert. Gebraucht das Rädchen zur Zurücklegung der Strecke l die Zeit t , so muß $l = \frac{1}{2} g \sin \alpha t^2$ sein. Messen wir l und α und bestimmen t aus einer Reihe von Versuchen, so erhalten wir in erster Annäherung einen Wert für g .

Die Proportionalität der Fallräume mit den Quadraten der Fallzeiten kann man auch angenähert aus folgendem einfachen Versuch erkennen. Man läßt vier an einem Faden befestigte Bleikugeln, die vom Boden um $1 \cdot 50$, $4 \cdot 50$, $9 \cdot 50$, $16 \cdot 50$ cm entfernt sind, gleichzeitig fallen. Sie schlagen dann nacheinander in den Zeiträumen 1, 2, 3, 4 auf.

Um die Unabhängigkeit der Fallbeschleunigung vom Stoff der Körper zu zeigen, kann man gleich große Kugeln aus Blei, Eisen, Messing in einem langen, schräg gestellten Glasrohre hinunterrollen lassen. Bei derselben Neigung legen sie gleiche Wege in gleichen Zeiten zurück, sie fallen also alle gleich schnell. Da sich dasselbe Gesetz für die verschiedensten Neigungen der Rinne ergibt, so kann man annehmen, daß es auch für den freien Fall der Körper zutrifft. Wenn uns die tägliche Erfahrung scheinbar lehrt, daß eine Bleikugel schneller zur Erde fällt als z. B. eine Flaumfeder, so liegt dies an dem Luftwiderstande. Schalten wir diesen Einfluß aus, indem wir Feder und Bleikugel in einer möglichst luftleeren Röhre fallen lassen, so ist ein Unterschied nicht mehr vorhanden. Ein Geldstück und ein kleineres daraufgelegtes Papierblättchen fallen auch in der Luft gleich schnell. Warum?

Aufgaben. Es ist zu beweisen: 1. Läßt man Körper auf Fallrinnen von verschiedener Länge, aber gleicher Höhe herabfallen, so kommen sie am Fuße aller mit derselben Geschwindigkeit an, und zwar mit derjenigen, die sie, von derselben Höhe frei herunterfallend, erreichen würden.

2. Zieht man in einem lotrecht stehenden Kreise den senkrechten Durchmesser und von seinem Fußpunkte beliebig viele Sehnen, so haben die Fallrinnen, die durch diese Sehnen dargestellt werden, die Eigentümlichkeit, daß ein Körper, um vom höchsten bis zum tiefsten Punkt zu gelangen, dieselbe Zeit gebraucht wie zum Durchfallen des senkrechten Durchmessers.

5. Wurfbewegung.

§ 15. Nachdem Galilei die Fallbewegung als eine gleichförmig § 15. beschleunigte erkannt hatte, bot ihm die Behandlung des vertikalen und schrägen Wurfs keine Schwierigkeit mehr. Erteilt irgend eine Kraft, z. B. die Muskelkraft unseres Armes oder die Explosionskraft von Pulvergasen, einem Körper eine Anfangsgeschwindigkeit, so sucht der sich selbst überlassene Körper nach dem Trägheitsgesetz diese Geschwindigkeit nach Größe und Richtung beizubehalten. Gleichzeitig und unabhängig von dieser Bewegung setzt aber die durch die Schwerkraft verursachte Fallbewegung ein. Da bei den in Betracht kommenden Wurfweiten und Wurfhöhen die Schwerkraft

als konstant und stets in derselben Richtung wirkend angesehen werden kann, so läßt sich der Wurf als ein spezieller Fall der im § 8b und c behandelten Bewegung auffassen, sobald wir vom Einfluß des Luftwiderstandes absehen. Wir haben in den dort abgeleiteten Gleichungen nur überall für die Beschleunigung a die Erdbeschleunigung $g = 981$ [cm sec⁻²] zu setzen.

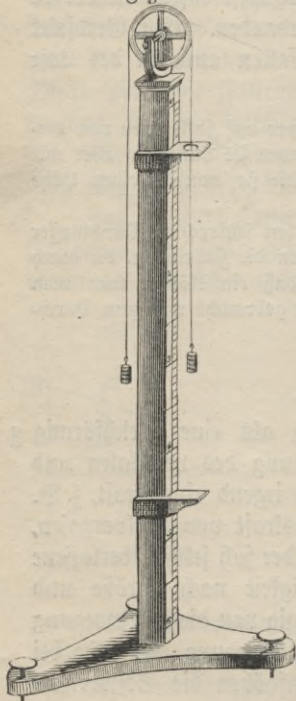
Aufgaben. 1. Es ist zu beweisen, daß ein Körper, der mit der Geschwindigkeit c senkrecht nach oben geworfen wird, $\frac{c}{g}$ Sekunden steigt, bis er die größte Höhe $\frac{c^2}{2g}$ erreicht hat, daß er die gleiche Zeit braucht, um wieder herabzufallen, und mit der Geschwindigkeit c unten ankommt. 2. Wie weit steigt ein horizontal geworfener Körper, ehe er zur Erde kommt, wenn er mit einer Geschwindigkeit von 300 [m sec⁻¹] geworfen wird und die Höhe seines Ausgangspunktes 3 m beträgt? 3. Ein Körper wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $c = 600$ [m sec⁻¹] und unter einem Erhebungswinkel von $\alpha = 6^\circ$ geworfen. Welche Höhe hat er nach $t = 3$ Sek. erreicht? Welche Geschwindigkeit besitzt er dann und wie ist diese gerichtet? Wie groß ist die Wurfhöhe und die Wurfweite, d. h. wie hoch liegt der höchste Punkt, den der Körper erreicht, und wie weit vom Ausgangspunkt kommt er wieder zur Erde? Wie groß muß Winkel α sein, damit entweder die Wurfhöhe oder die Wurfweite ein Maximum wird? Warum sind die Wurfweiten bei den Erhebungswinkeln $45^\circ - \alpha$ und $45^\circ + \alpha$ einander gleich? Welchen Zweck haben Visier und Korn bei den Feuerwaffen?

6. Messen der Kräfte durch Beschleunigungen.

§ 16.

§ 16. Als Ursache des freien Falls hatten wir die in vertikaler

Fig. 19.



Richtung wirkende und für ein und denselben Beobachtungsort konstante Schwerkraft erkannt. Die Erfahrung zeigte, daß unter ihrem Einfluß ein Körper sich gleichförmig beschleunigt bewegt. Wir schließen deshalb: Eine konstante, in derselben Richtung wirkende Kraft erteilt einem Körper eine konstante Beschleunigung in ihrer Richtung. So gelangen wir zu einem allgemeinen Verfahren, Kräfte zu messen durch die Beschleunigungen, die sie ein und demselben Körper erteilen. Wie weit dieses Verfahren berechtigt ist, muß durch Versuche gezeigt werden. Atwood hat zu diesem Zweck einen Apparat konstruiert (Fig. 19), der auch häufig zur Bestätigung der Gesetze einer gleichförmig beschleunigten Bewegung benutzt wird. Er besteht im wesentlichen aus einer Rolle, die von einer etwa $2\frac{1}{2}$ m hohen, mit einem Maßstab versehenen Säule getragen wird. Über die Rolle geht eine Schnur, an deren Enden zwei gleiche Gewichte von q Gramm hängen, die also in jeder Stellung im Gleichgewicht sind. Vor Beginn des Versuches setzt man das eine Gewicht q auf eine am Nullpunkt des Maßstabes angebrachte Klampe und legt auf

dasselbe ein kleines Übergewicht von p Gramm. In einem bestimmten Moment, der durch den Schlag eines Sekundenpendels angegeben wird, drückt man die Klappe herunter, das Gewicht $p + q$ gleitet längs des Maßstabes herab und schlägt nach t Sek. auf eine Platte auf, die man vorher an dem Maßstabe in einer beliebigen Höhe befestigt hat. Da hier die Kraft von p Gramm nicht nur das Gewicht p , sondern auch die Gewichte $2q$ und die Rolle in Bewegung setzen muß, so ist die Bewegung weit langsamer als beim freien Fall und kann deshalb bequem beobachtet werden. Hat man das Übergewicht so gewählt, daß der Fallraum nach

	1 Sek.	5	cm	beträgt, dann findet man, daß
nach	2	"	5 · 4	"
"	3	"	5 · 9	"

"	t	"	5 · t ²	"

durchlaufen werden. Die zurückgelegten Wege sind daher den Quadraten der Fallzeiten proportional, die Bewegung ist also eine gleichförmig beschleunigte, und gemäß der Beziehung $s = \frac{1}{2} a t^2$ liefert der Versuch für die Beschleunigung a den Wert 10 [cm sec⁻²]. Man gibt dem Übergewicht meistens eine längliche Form, so daß es durch eine durchbrochene Platte, die man in passender Höhe am Maßstab festschraubt, abgehoben wird, während sich das fallende Gewicht q ungehindert weiterbewegen kann. Diese Weiterbewegung geschieht, da keine Kraft mehr wirkt, infolge der Trägheit gleichförmig mit einer Geschwindigkeit, die das fallende Gewicht q im Moment des Abhebens von p hatte. Der in 1 Sek. nach dem Abheben zurückgelegte Weg mißt dann diese Geschwindigkeit v . Sind bis zum Moment des Abhebens $1, 2, 3 \dots t$ Sek. verflossen, so ergeben sich für v die Werte $10, 20, 30 \dots 10 t$ cm, woraus wiederum für die Beschleunigung a der Wert 10 [cm sec⁻²] folgt. Hiermit sind durch den Versuch die beiden Grundgleichungen $s = \frac{1}{2} a t^2$ und $v = a t$ bestätigt.

Wir wiederholen nun diese Versuche, indem wir als treibende Kraft das $n = 2, 3, 4 \dots$ fache Übergewicht, also np Gramm benutzen, die Laufgewichte aber so abändern, daß die Summe sämtlicher bewegten Gewichte stets dieselbe bleibt. Dies ist der Fall, wenn wir für jedes der Laufgewichte $q - \frac{n-1}{2} p$ Gramm wählen. Für die Beschleunigungen erhalten wir alsdann die Werte $2a, 3a \dots na$, woraus folgt:

Die bewegenden Kräfte verhalten sich wie die Beschleunigungen, die sie gleich schweren Körpern erteilen.

7. Begriff der Masse und zweites Bewegungsgesetz Newtons.

§ 17. Die angegebenen Versuche wurden an ein und demselben § 17. Beobachtungsort vorgenommen. Würden wir sie mit derselben Fallmaschine, denselben Laufgewichten und Übergewichten an einem zweiten Ort der

Erde anstellen, der beträchtlich nördlicher oder südlicher, höher oder tiefer als der erste gelegen ist, so erhielten wir die Beschleunigungen $a^1, 2a^1, 3a^1 \dots na^1$, wo a^1 im allgemeinen nicht gleich a wäre. Um die Ursache dieser Verschiedenheit zu erkennen, könnten wir mit derselben Federwage, die am ersten Beobachtungsort die Zugkraft der Übergewichte zu $p, 2p, 3p \dots np$ Gramm angab, auch für den zweiten Ort diese Zugkräfte oder Gewichte bestimmen und würden $p^1, 2p^1, 3p^1 \dots np^1$ Gramm finden. Das Gewicht eines Körpers ist demnach keine unveränderliche Größe, es ist abhängig von seiner Lage zur Erde. Bilden wir dagegen die Quotienten $\frac{p}{a}, \frac{2p}{2a}, \frac{3p}{3a} \dots \frac{np}{na}$ und

$\frac{p^1}{a^1}, \frac{2p^1}{2a^1}, \frac{3p^1}{3a^1} \dots \frac{np^1}{na^1}$ so sind diese nicht nur für den 1. und 2. Ort

unter sich gleich, sondern es ist auch $\frac{p}{a} = \frac{p^1}{a^1}$. Der Quotient aus bewegender Kraft und erteilter Beschleunigung ist also für ein und denselben Körper ein konstantes, vom Gewicht verschiedenes Merkmal. Man nennt die jedem Körper eigentümliche, quantitative Eigenschaft, die durch jenen Quotienten gemessen werden kann, seine Masse.

Im gewöhnlichen Sprachgebrauch verstehen wir unter Masse die Stoffmenge. Beständen alle Körper aus demselben Stoff, dann könnten wir ihre Masse einfach durch ihr Volumen messen. Daß 2 cdm Wasser unter gleichen äußeren Bedingungen doppelt soviel Wasser enthalten als 1 cdm, leuchtet jedem ein. Diese anschauliche Bedeutung des Begriffs Masse läßt uns aber sofort im Stich, wenn wir z. B. das Massenverhältnis von 1 cdm Wasser und 1 cdm Quecksilber feststellen wollen. Erst der Versuch, daß eine Kraft, die einem cdm Wasser eine Beschleunigung a erteilt, einer Menge von $\frac{1}{13,69}$ cdm Quecksilber dieselbe Beschleunigung erteilt, zeigt uns die Gleichheit dieser Massen.

Da sich für alle Körper, die an demselben Ort der Erde das gleiche Gewicht haben, derselbe Quotient $\frac{p}{a}$ ergibt, so müssen wir allen diesen Körpern die gleiche Masse zuschreiben. Hierauf stützt sich das Verfahren, die Massen durch ihre Gewichte zu messen, was in einfacher und sehr genauer Weise mit der Wage geschieht. Unterwerfen wir einen Körper allen möglichen physikalischen oder chemischen Veränderungen, ohne etwas Materielles von ihm wegzunehmen oder hinzuzufügen, so zeigt uns die Wage die Unveränderlichkeit der Stoffmenge an. Wir kommen so zu der Erkenntnis, daß wir weder imstande sind, etwas von Materie zu vernichten, noch neu zu erschaffen. (Satz von der Erhaltung der Materie.)

Erteilt eine Kraft, die den Druck oder Zug von p Grammgewichten ausübt, einem Körper, dessen Masse wir mit m bezeichnen wollen, die Beschleunigung a cm sec⁻², so besteht nach dem Obigen die Gleichung

$m = \frac{p}{a}$ oder $p = am$, d. h.:

Die auf einen Körper wirkende Kraft ist gleich dem Produkt seiner Masse und der Beschleunigung seiner Bewegung. (Zweites Newtonsches Bewegungsgesetz.)

Wir hatten dieses Gesetz aus einer Versuchsreihe geschlossen, bei der verschiedene bewegende Kräfte auf gleichschwere Körper oder, wie wir nun sagen können, auf dieselbe Masse wirkten. Ist das Gesetz richtig, dann muß ein und dieselbe Kraft verschiedenen Massen Beschleunigungen erteilen, die sich umgekehrt wie die bewegten Massen verhalten, und es müssen ferner verschiedene Kräfte sich wie die bewegten Massen verhalten, denen sie gleiche Beschleunigungen erteilen. Beide Folgerungen lassen sich mit der Fallmaschine auf ihre Richtigkeit prüfen. In der Formel $p = am$ fassen wir die Resultate der drei Versuchsreihen in einfacher und übersichtlicher Weise zusammen und erkennen dabei den ökonomischen Wert, den die Anwendung der mathematischen Zeichensprache für die Physik hat.

Da beim freien Fall die bewegende Kraft gleich dem Gewicht q Gramm des fallenden Körpers und die Beschleunigung g cm sec^{-2} ist, so muß $q = mg$ sein, d. h.

das Gewicht eines Körpers ist gleich dem Produkt aus seiner Masse und der Erdbeschleunigung.

Bei der Fallmaschine ist die bewegende Kraft das Übergewicht (p Gramm). Es erteilt seiner eigenen Masse und der der Laufgewichte ($2q$ Gramm) die beobachtete Beschleunigung a cm sec^{-2} . Nun verhalten sich die Beschleunigungen, die dieselbe Kraft verschiedenen Körpern erteilt, umgekehrt wie die bewegten Massen, also auch umgekehrt wie die Gewichte dieser Massen.

Hieraus folgt $\frac{a}{g} = \frac{p}{p + 2q}$ und $g = \frac{a(p + 2q)}{p}$. Bei dieser Bestimmung von g ist weder die Masse des Rades noch die Reibung in Betracht gezogen (s. § 43 und § 71 Aufg. 2). Der erhaltene Wert kann deshalb nur ein ungefährer sein. — Man hat durch Pendelversuche (s. § 44, 45 b, 55) viel genauer als dies mit Federwaage und Fallmaschine möglich ist, die Erdbeschleunigung für Orte unter den verschiedensten Breitengraden bestimmt und $g_0 = 978,06$, $g_{45} = 980,6$, $g_{70} = 982$ cm sec^{-2} gefunden. Ein Körper, der unter 45° Breite ein Kilogramm wiegt, ist unter dem Äquator 997, unter 70° Breite 1001 Gramm schwer.

8. Terrestrisches und absolutes Maßsystem.

§ 18. Wir hatten bisher willkürlich als Einheit der Kraft das § 18. Grammgewicht, als Längeneinheit das cm benutzt. Wiegt ein Körper

q Gramm, so muß nach der Gleichung $q = mg$ seine Masse $m = \frac{q}{g}$

und die Masse eines Grammgewichts $\frac{1}{g}$ sein. Die Einheit der Masse

müssen wir also einem Körper zuschreiben, der unter 45° Breite 980,6 oder abgerundet 981 Gramm wiegt. Werden die größeren Einheiten

Kilogramm und Meter zugrunde gelegt, so besitzt die Masseneinheit ein Körper, der 9,81 kg schwer ist. In jedem Fall ist die Masseneinheit bestimmt, sobald man außer der Zeiteinheit (1 Sekunde) die Einheiten für Kraft und Länge festgesetzt hat. Dieses Maßsystem, das vielfach in der Technik angewendet wird, heißt das terrestrische. Es leidet an dem Übelstande, daß das Gewicht eines Körpers nicht an allen Orten der Erde dasselbe ist. Man hat deshalb in der Physik ein anderes, sogenanntes absolutes Maßsystem eingeführt, bei dem man von einer willkürlich gewählten Masseneinheit ausgeht. Gewöhnlich ist dies die Masse eines ccm Wasser bei 4° Celsius. Das Gewicht dieser Wassermenge unter 45° Breite wird ein Gramm genannt. Da alle Gewichtsstücke nach einem Platinblock von 1000 Gramm geeicht werden, den man mit möglichster Sorgfalt hergestellt hat und der in Paris aufbewahrt wird, so kann man die Masse eines beliebigen Körpers an allen Orten der Erde mit einer gewöhnlichen Wage in absoluten Einheiten, also Gramm Massen, bestimmen. Als Längeneinheit dient das Zentimeter, als Zeiteinheit die Sekunde. Die Kräfteinheit (1 Dyn) ist nun eindeutig definiert als diejenige Kraft, die der Grammmasse die Beschleunigung von 1 [cm sec⁻²] erteilt. Da die Erdbziehung der Grammmasse ungefähr die Beschleunigung 981 [cm sec⁻²] erteilt, so ist der Druck eines Grammgewichtes, d. h. die Kräfteinheit im terrestrischen Maßsystem, gleich 981 Dyn und eine Kilogrammkraft gleich 981 · 10³ Dyn.

Das angeführte absolute Maßsystem baut sich aus den Grundeinheiten Zentimeter, Grammmasse, Sekunde auf, man nennt es deshalb auch das CGS-System. Von den aus den Grundeinheiten abgeleiteten Maßen kennen wir bereits das Maß einer Fläche [cm²], eines Körpers [cm³], einer Geschwindigkeit [cm sec⁻¹], einer Beschleunigung [cm sec⁻²], wo cm², cm³, cm sec⁻¹, cm sec⁻² die Benennungen der neuen Einheiten sind. Diese Benennungen stellen sich in Form von Potenzen der Grundeinheiten dar, die Exponenten geben die Dimensionen der abgeleiteten Einheiten an. Eine Kraft hat demnach im CGS-System die Dimension cm gr sec⁻², wo unter gr die Grammmasse zu verstehen ist.

9. Spezifisches Gewicht und Dichte.

§ 19. § 19. Unter dem spezifischen Gewicht eines Körpers versteht man das Gewicht der Volumeneinheit, unter Dichte die Masse der Volumeneinheit. Es ist demnach

$$s = \frac{q}{v} \text{ und } d = \frac{m}{v},$$

wenn s das spezifische Gewicht, d die Dichte, v das Volumen, q das absolute Gewicht und m die Masse eines Körpers bedeutet. Da wir für das Gewicht q das Produkt mg aus Masse und Erdbeschleunigung setzen können, so folgt $s = \frac{mg}{v} = dg$.

Nimmt man im terrestrischen Maßsystem als Volumeneinheit das Kubikzentimeter, als Gewichtseinheit das Gramm, also das Gewicht von 1 cem Wasser bei 4° C, so geben die Zahlenwerte der spez. Gewichte an, wievielmals so schwer ein Körper ist als das gleiche Volumen Wasser. Diese Zahlenwerte ermittelt man durch den Versuch. (S. § 80.) Die Masse der Volumeneinheit, d. h. die Dichte in diesem System, wird dann durch Division der gefundenen Zahlenwerte mit der Erdbeschleunigung g erhalten.

Im CGS-System ist das cem die Volumeneinheit und die Grammasse, d. h. die Masse eines cem Wasser von 4° C, die Masseneinheit. Die Bestimmung der Dichtigkeit eines Körpers in diesem System muß deshalb zu denselben Zahlenwerten führen, die sich für die spez. Gewichte im terrestrischen System ergeben. Das Gewicht der Volumeneinheit, also das spez. Gewicht im CGS-System dagegen ist g mal so groß als jene Zahlenwerte.

10. Prinzip der Aktion und Reaktion.

(Drittes Bewegungsgesetz Newtons.)

§ 20. Ersetzen wir bei einem ruhenden Körper die Unterlage durch § 20. unsere Hand, so nehmen wir einen senkrecht nach unten gerichteten Druck wahr. Gleichzeitig müssen wir mit unserer Muskelkraft einen gleich großen Druck nach oben leisten, um den Körper vor dem Fallen zu bewahren. Diese Erfahrung hat wohl zuerst zu der Erkenntnis geführt, daß keine Kraft für sich allein wirkend auftreten kann, daß alle Kräfte in der Natur paarweise vorkommen. Ein Stück Eisen wird von einem Magneten mit einer gewissen Kraft angezogen. Hängen wir den Magneten frei beweglich auf, so zeigt sich, daß das Eisen den Magneten mit derselben Kraft anzieht. Ebenso stoßen die beiden gleichnamig geladenen Kügelchen eines elektrischen Pendels sich gegenseitig mit derselben Kraft ab. Auf diesen Tatsachen beruht das von Newton aufgestellte dritte Bewegungsgesetz:

Die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

Da die Erde einen Körper von der Masse m mit der Kraft mg anzieht, so muß umgekehrt auch der Körper auf die Erde diese Kraft ausüben. Es muß also $mg = E\gamma$ sein, wenn E die Erdmasse und γ die ihr erteilte Beschleunigung bezeichnet. Daß wir nur den Fall eines Körpers zur Erde und nicht auch die umgekehrte Bewegung wahrnehmen, liegt allein an der verschwindend kleinen Masse, die alle irdischen Körper im Vergleich zur Erde haben. Der auf einer festen Unterlage ruhende Stein wird durch den Gegendruck der gesamten Erde im Gleichgewicht gehalten.

11. Trägheitswiderstand.

§ 21. Wenn wir einen Eisenbahnwagen auf horizontaler, gerader § 21. Schienenbahn fortstoßen wollen, so ist der zu überwindende Widerstand anfangs sehr groß. Der Grund hierfür kann nicht das Gewicht des Wagens sein, da dieses durch den Gegendruck der Schienen aufgehoben

wird. Es kann auch nicht die Reibung sein, denn sobald der Wagen sich bewegt, reicht eine viel kleinere Kraft aus, sie zu überwinden und den Wagen gleichförmig fortzuschieben. Der Grund liegt darin, daß wir dem anfangs ruhenden Wagen eine gewisse Beschleunigung a erteilen müssen. Vermöge ihrer Trägheit setzt eine Masse der Veränderung ihres Bewegungszustandes einen Widerstand entgegen, der für ein und dieselbe Masse alle möglichen Werte annehmen kann. Wir messen seine Größe durch die Kraft ma , die ihn überwindet. Die Richtung des Trägheitswiderstandes ist der bewegenden Kraft entgegengesetzt.

Aufgabe. Wie groß ist der Druck, den eine Masse von m Gramm auf eine Unterlage ausübt, die mit der Beschleunigung a [cm sec⁻²] vertikal aufwärts oder abwärts bewegt wird? Wie groß ist der Druck, wenn die Bewegung gleichförmig geschieht? — Es nimmt jemand eine zweite Person auf seine Schultern und springt mit ihr von einer erhöhten Stelle herab. Übt während des Sprunges die zweite Person einen Druck auf die erste aus? — Man stelle sich mit einem Gewichtstück in der Hand auf eine Brückenwaage und lasse Gleichgewicht herstellen. Nach welcher Seite schlägt die Waage anfangs aus, wenn man das Gewichtstück in die Höhe wirft?

12. Begriff der Arbeit, des Effektes, der lebendigen Kraft.

§ 22. Die Gleichung $p = ma$ lehrt uns, konstante Kräfte durch die Beschleunigungen messen, die sie ein und derselben Masse erteilen. Kennen wir außer der bewegten Masse nur ihre Geschwindigkeit, so ist dadurch allein die Kraft, die jene Geschwindigkeit hervorrief, noch nicht bestimmt. Die Gleichungen $v = at$ und $v^2 = 2as$ einer gleichförmig beschleunigten Bewegung liefern für a die Werte $\frac{v}{t}$ und $\frac{v^2}{2s}$, die, in die Gleichung $p = ma$ eingesetzt, für die bewegende Kraft die Werte $p = \frac{mv}{t}$ und $p = \frac{mv^2}{2s}$ ergeben. Um p zu finden, müssen wir also außer m und v entweder die Zeit t kennen, während der die Kraft wirkt, oder den Weg s , auf dem sie tätig ist. Die beiden letzten Gleichungen können wir in der Form schreiben:

$$pt = mv \text{ und } ps = \frac{1}{2}mv^2.$$

Man nennt das Produkt mv aus Masse und Geschwindigkeit die Bewegungsgröße, das Produkt $m\frac{v^2}{2}$ aus der Masse und dem halben Quadrat der Geschwindigkeit die lebendige Kraft eines Körpers. Das Produkt aus Kraft und Zeit heißt der Antrieb der Kraft, das Produkt aus Kraft und Weg die Arbeit. Von diesen vier neuen Begriffen sind von besonderer Wichtigkeit der Begriff der Arbeit und der der lebendigen Kraft.

§ 22a. **Arbeit.** Heben wir eine Last in die Höhe, so ist die von unserer Muskelkraft geleistete Arbeit um so größer, je schwerer die Last ist und je höher wir sie heben. Ruht ein Körper auf unserer Hand, so

müssen wir zwar eine Kraft aufwenden, um ihn vorm Fallen zu bewahren, wir verrichten aber im mechanischen Sinne noch keine Arbeit.

Berschieben wir eine Last gleichförmig auf einer horizontalen Ebene, so genügt dazu eine um so kleinere Kraft, je geringer die Reibungswiderstände sind. Für dieselbe Weglänge wird also auch die geleistete Arbeit um so kleiner sein, je glatter wir die aufeinander gleitenden Flächen machen. Wäre es möglich, die Reibung völlig zu beseitigen, dann würde ein Körper die ihm einmal erteilte Geschwindigkeit ohne weitere Kräfteinwirkung, also auch ohne weiteren Arbeitsaufwand beibehalten. Arbeit leisten wir erst dann, wenn wir einen Widerstand auf einem gewissen Wege überwinden. Heben wir einen Gegenstand mit gleichbleibender Geschwindigkeit senkrecht empor, dann ist der Widerstand gleich dem Gewicht des Körpers, und ebenso groß muß die von uns entwickelte Kraft sein. Da zu jeder Bewegung eine gewisse Geschwindigkeit nötig ist und einer ruhenden Masse m daher eine Beschleunigung a erteilt werden muß, so ist im Anfang der Hebung allerdings eine um ma größere Kraft erforderlich als der Widerstand mg . Das ist aber nur so lange der Fall, bis die Masse die erforderliche Geschwindigkeit erreicht hat. Die weitere, gleichförmig vor sich gehende Bewegung wird lediglich durch eine Kraft verursacht, die gleich der gehobenen Last ist.

Für die Größe der Arbeit ist es einerlei, ob wir 10 kg auf 1 m oder 5 kg auf 2 m oder 1 kg auf 10 m Höhe bringen, d. h.

die Arbeit ist proportional der aufgewendeten Kraft und dem Wege, der in der Kraftrichtung zurückgelegt wird.

Im absoluten Maßsystem wird die Arbeitseinheit von einem Dyn längs des Weges von 1 cm geleistet und heißt ein Erg. Ihre Dimension ist $[cm^2 gr sec^{-2}]$. Da diese Einheit bei vielen Messungen zu un bequem großen Zahlen führt, so benützt man noch eine andere Einheit, nämlich 10^7 Erg, der man den Namen des bekannten englischen Physikers Joule gegeben hat. Im terrestrischen Maßsystem ist die Arbeitseinheit das Kilogramm meter (kgm), d. h. die Arbeit, die nötig ist, um 1 kg 1 m hoch zu heben. Es ist $1 kgm = 10^5 \cdot 981 Erg = 9,81 Joule$.

Dreht jemand eine Kurbel, deren Widerstand 1 kg beträgt, und legt seine Hand dabei einen Weg von 12 m zurück, so beträgt die Arbeit $12 kgm = 10^5 \cdot 12 \cdot 981 Erg = 117,72 Joule$. Um einen Handwagen, zu dessen Fortbewegung eine Kraft von 40 kg nötig ist, 100 m weit zu ziehen, muß eine Arbeit von $4000 kgm = 4000 \cdot 9,81 Joule$ verrichtet werden.

§ 22b. **Effekt.** Für die Bewertung einer Arbeit spielt häufig nicht § 22b. nur ihre Größe eine Rolle, sondern auch die Zeit, in der sie getan wird. Wenn jemand in 8 Stunden dieselbe Arbeit verrichtet als ein anderer in 10 Stunden, so sprechen wir dem ersteren eine größere Arbeitsfähigkeit zu. Wir beurteilen die Arbeitsfähigkeit eines Mannes, eines Pferdes, einer Dampfmaschine nach der in 1 Sek. geleisteten Arbeit, die man den Effekt oder die Leistung der Kraft nennt.

Die Einheit des Effektes ist im absoluten Maßsystem ein Erg pro Sek.

[$\text{cm}^2 \text{gr sec}^{-3}$]. Ein Joule pro Sek., also 10^7 Erg pro Sek., heißt ein Watt zu Ehren des berühmten Erfinders. Im terrestrischen Maßsystem ist die Einheit des Effektes das Sekundenkilogramm, d. h. die Fähigkeit, 1 kg in 1 Sek. 1 m hoch zu heben. Da erfahrungsgemäß ein kräftiges Pferd, das 8 Stunden täglich arbeitet, durchschnittlich in der Sek. 75 kgm Arbeit verrichtet, so nennt man diese Leistung eine Pferdestärke (PS).

Es ist 1 kgm pro Sek. = $10^7 \cdot 9,81$ Erg pro Sek. = 9,81 Watt

1 PS = $9,81 \cdot 75$ Watt = 736 Watt.

Wenn zur Umdrehung des Wasserrades einer Mühle ein Druck von 50 kg auf dessen Schaufeln nötig ist und das Wasser das Rad mit einer Geschwindigkeit von 3 m treibt, d. h. so, daß jede Schaufel einen Bogen von 3 m Länge in der Sekunde zurücklegt, so beträgt die Leistung der Wasserkraft $3 \cdot 50$ kgm pro Sek. = 2 Pferdestärken = 1472 Watt. Welche Leistung muß ein Bergsteiger zur Hebung seines Körpergewichts von 72 kg verwenden, wenn er in 2 Stunden 1400 m hoch steigt? Eine Uhr werde durch ein Gewicht von 1,5 kg getrieben, das in 12 Stunden 2 m sinkt. Wieviel solcher Uhren kann ein Motor von 1 Pferdestärke im Gang erhalten?

§ 22 e.

§ 22 c. **Lebendige Kraft.** Um einen Körper von m Gramm Masse der Schwere entgegen emporzuheben, ist eine Kraft von mg Dyn nötig. Für eine Hubhöhe von s cm wird dabei eine Arbeit von $mg s$ Erg verbraucht. Lassen wir den Körper wieder frei herabfallen, so leistet die mg Dyn betragende Schwerkraft auf dem Wege von s cm die gleiche Arbeit von $mg s$ Erg. Während aber beim Heben der m Gramme die aufgewendete Arbeit die Lage des Körpers zur Erde veränderte, nämlich ihre gegenseitige Entfernung vergrößerte, dient die beim freien Fall von der Schwerkraft verrichtete Arbeit dazu, der Masse von m Gramm eine gewisse Geschwindigkeit $v = \sqrt{2g s}$ [cm sec^{-1}] zu erteilen. Aus dieser Gleichung folgt $\frac{v^2}{2} = g s$ [$\text{cm}^2 \text{sec}^{-2}$] und durch Multiplikation mit m :

$m \frac{v^2}{2} = m g s$ [$\text{cm}^2 \text{gr sec}^{-2}$] = $m g s$ Erg. Das Produkt aus bewegter

Masse und halbem Quadrat der Geschwindigkeit, das man lebendige Kraft nennt, ist also numerisch gleich der Arbeit, die man aufwenden muß, um jener Masse die verlangte Geschwindigkeit zu erteilen. Die lebendige Kraft ist somit keine Kraft im üblichen Sinne, sondern eine Arbeitsgröße.

Das Produkt $m \frac{v^2}{2}$ wird in denselben Einheiten (Erg) wie eine Arbeit gemessen.

Schleudern wir eine Masse von m Gramm mit der Anfangsgeschwindigkeit von v [cm sec^{-1}] senkrecht in die Höhe, so erteilen wir ihr eine lebendige Kraft von $m \frac{v^2}{2}$ Erg. Nun steigt der Körper bekanntlich $\frac{v^2}{2g}$ cm hoch (§ 15 Aufg.). Er hat also während des Aufsteigens den Widerstand von mg Dyn, den ihm die Schwerkraft entgegensetzt, auf einer

Strecke $\frac{v^2}{2g}$ cm überwunden, also eine Arbeit $A = mg \frac{v^2}{2g} = m \frac{v^2}{2}$ Erg geleistet. Eine Masse m , die sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, besitzt demnach einen gewissen Arbeitsvorrat, der durch den Ausdruck $m \frac{v^2}{2}$ gemessen wird. Da es nun für die Wirkungsfähigkeit eines bewegten Körpers gleichgültig ist, woher er seine Geschwindigkeit hat, oder was für eine Art von Widerstand er überwindet und in welcher Richtung er sich bewegt, so gilt folgendes allgemeine Gesetz:

Jeder in Bewegung befindliche Körper von der Masse m und der Geschwindigkeit v vermag die Arbeit $A = m \frac{v^2}{2}$ zu leisten.

Aufgaben. In einer Rohrleitung von 100 m Länge und 10 cm Weite strömt Wasser mit einer Geschwindigkeit von 75 [cm sec⁻¹]. Welchen Arbeitsvorrat enthält die ganze Leitung?

Welche Arbeit ist erforderlich, um einer Last von 100 kg Gewicht auf einer horizontalen, vollkommen glatten Ebene eine Geschwindigkeit von 5 m zu erteilen?

Allgemeine Erscheinungen der lebendigen Kraft. Eine mit der Hand geworfene Kugel bringt eine viel geringere Wirkung hervor als eine geschossene. Die Wirkung einer Holzart ist um so größer, je schneller sie bewegt wird; dieselbe Wassermenge wirkt auf ein Mühlrad desto stärker, je schneller sie fließt. Ein langsam fahrender Wagen richtet, wenn er anstößt, weniger Schaden an, als ein Wagen, der sehr schnell fährt. Je höher ein Körper herabfällt, desto größer ist der Stoß, den er erleidet.

Ein kleines Beil und eine schwere Art, ein leichtes Stöckchen und ein schwerer Knüttel, mit derselben Geschwindigkeit geführt, bringen eine sehr verschiedene Wirkung hervor.

Ein Stoß von einem an uns vorbeilaufenden Sackträger ist weit empfindlicher als von einem vorbeilaufenden Knaben. Bohnenstangen, die auf einem Wagen gefahren werden, erteilen mit ihren hinten über den Wagen hinausstehenden Enden dem Vorübergehenden einen kaum merklichen Schlag, während Baumstämme unter sonst gleichen Umständen Arm und Bein zerschmettern. Warum ist man trotz aller Anstrengung nicht imstande, einen Korkpfropfen ebenso weit zu werfen wie einen gleich großen Stein? Der Zusammenstoß zweier Eisenbahnzüge richtet eine weit größere Verwüstung an als der zweier einzelner Wagen, wenn die Geschwindigkeit in beiden Fällen gleich ist.

Teil III: Gleichgewicht und Bewegung starrer Körper.

A. Zusammensetzung, Zerlegung und Gleichgewicht von Kräften.

1. Kräfte, die in einem Punkt angreifen.

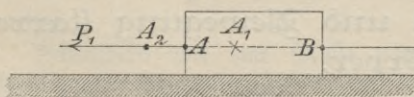
§ 23. Eine im Punkt A angreifende Kraft p können wir ihrer § 23. Größe und Richtung nach graphisch darstellen durch eine von A aus gezogene Strecke AB, die soviel Längeneinheiten enthält als p Kräfteinheiten.

Die Richtung der Kraft bezeichnet man durch einen Pfeil. Gleich oder entgegengesetzt gerichtete Kräfte unterscheidet man rechnerisch durch das Vorzeichen. Nach der Gleichung $p = ma$ verhalten sich zwei Kräfte wie die Beschleunigungen, die sie ein und demselben Körper erteilen. Es müssen sich deshalb Kräfte, die an einem Punkt angreifen, in derselben Weise wie Beschleunigungen zusammensetzen oder zerlegen lassen (s. § 7). Insbesondere ergibt sich:

a) Zwei oder mehrere Kräfte, die in derselben oder entgegengesetzter Richtung auf einen materiellen Punkt wirken, kann man durch eine Kraft ersetzen, die gleich der algebraischen Summe der einzelnen Kräfte ist.

Diese Vereinfachung ist auch dann noch erlaubt, wenn in derselben Geraden wirkende Kräfte in verschiedenen Punkten eines starren Körpers angreifen. Wir verstehen darunter einen Körper, bei dem die auf ihn wirkenden Kräfte keine Veränderung in der Lage der einzelnen Teilchen zueinander hervorrufen. Tatsächlich gibt es derartige Körper nicht. Jede Kraft, die an einem Körper angreift, bringt auch eine Verschiebung seiner kleinsten Teilchen hervor (§ 60, 61 und 67). Wenn wir z. B. mit einem Stock einen Druck gegen den Fußboden ausüben, so werden dadurch auch die Teilchen des Stockes ein wenig in der Krastrichtung verschoben. Indem sie dieser Zusammenpressung einen Widerstand entgegensetzen, der fast augenblicklich auf die Größe der einwirkenden Kraft anwächst, überträgt sich die Druckwirkung unserer Hand von dem einen Ende des Stockes auf das andere und dadurch auch auf den Fußboden. Bleibt die äußere Kraft dieselbe, so tritt eine weitere Formänderung nicht ein, und der Körper verhält sich dann genau so, als ob er vollkommen starr wäre. Bei den sogenannten festen Körpern sind überdies die anfänglichen, inneren Verschiebungen so gering, vorausgesetzt, daß die äußeren Kräfte gewisse Grenzen nicht überschreiten, daß wir in vielen Fällen davon ganz absehen dürfen, ohne uns von der Wirklichkeit in unzulässiger Weise zu entfernen. Man kann nun den Angriffspunkt einer Kraft beliebig in ihrer Richtung verschieben, wofür nur der neue Angriffspunkt starr mit dem alten verbunden ist. Wirken z. B. in A und B (Fig. 20) auf einen Körper, der auf einer horizontalen, glatten Ebene ruht, zwei

Fig. 20.



gleiche und entgegengesetzt gerichtete Kräfte P_1 und P_2 parallel der Unterlage, so bleibt der Körper in Ruhe, die Kräfte heben sich in ihren Wirkungen auf. Daran wird erfahrungs-

gemäß nichts geändert, wenn wir den Angriffspunkt der einen Kraft von A nach A_1 verlegen. Es würde der Gleichgewichtszustand auch nicht gestört werden, wenn wir in A ein unausdehnbares Seil befestigten und die Kraft P_1 in irgend einem Punkte A_2 dieses Seiles angreifen ließen.

b) Greifen in einem Punkte A zwei Kräfte $p_1 = AB$ und $p_2 = AC$ unter dem Winkel BAC an, so kann ihre Wirkung durch eine einzige Kraft ersetzt werden, deren Größe und Richtung die Diagonale AD des Parallelogramms ABDC angibt.

(Parallelogramm der Kräfte. Newton 1686.)

Ist das Parallelogrammgesetz richtig, so muß eine dritte in A angreifende Kraft $p_3 = AE$, die gleich der Resultierenden AD, aber entgegengesetzt gerichtet ist, die Wirkung der Kräfte p_1 und p_2 aufheben, d. h. die drei Kräfte p_1, p_2, p_3 müssen im Gleichgewicht sein (Fig. 21). Hierauf stützt sich ein Verfahren, das Gesetz experimentell zu prüfen. Man knüpft drei Fäden AB, AC, AE (Fig. 22) in einem Punkte A zusammen, führt zwei von ihnen, AB und AC, über zwei Rollen und hängt an ihren

Fig. 21.

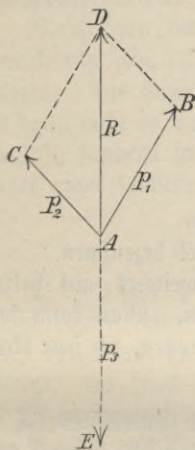
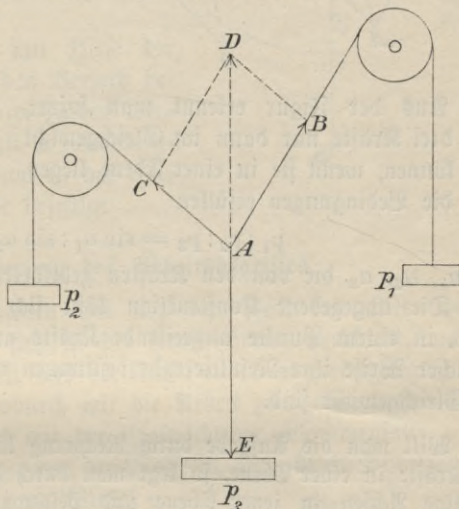


Fig. 22.



Enden die Gewichtsstücke p_1 und p_2 auf. Befestigt man am Ende des dritten Fadens ein Gewicht p_3 , so setzen sich die drei Gewichte bei einer bestimmten Lage der Fäden ins Gleichgewicht. Die Richtungen der Fäden stimmen dann mit den Richtungen der Seiten und der Diagonale des Parallelogramms überein, das man aus $AB = p_1, AC = p_2$ und $AD = p_3$ gezeichnet hat.

Um die Größe und Richtung der Resultierenden zweier in A angreifenden Kräfte durch Zeichnung zu finden, genügt es, das Dreieck ABD (Fig. 22) zu konstruieren. Man lege zu diesem Zweck durch einen beliebigen Punkt O (Fig. 23) eine Strecke gleich und parallel einer der beiden Kräfte, z. B. p_1 , und setze daran der Größe und Richtung nach die zweite Kraft p_2 . Die den Linienzug von p_1 und p_2 zu einem Dreieck schließende Strecke gibt die Größe der resultierenden Kraft R an. Ihre Richtung bestimmt ein Pfeil, der den Pfeilrichtungen von p_1 und p_2 entgegenläuft.

Greift in A eine dritte Kraft p_3 an (Fig. 24), die gleich, aber entgegengesetzt R ist, so sind die drei Kräfte im Gleichgewicht. Setzt man wiederum p_1, p_2, p_3 ihrer Größe und Richtung nach aneinander, so muß der von 2 Kräften, z. B. p_1 und p_2 , gebildete Linienzug durch p_3 zu einem Dreieck geschlossen werden. Die Pfeilrichtungen aller drei Kräfte laufen dann in demselben Sinne.

Fig. 23.

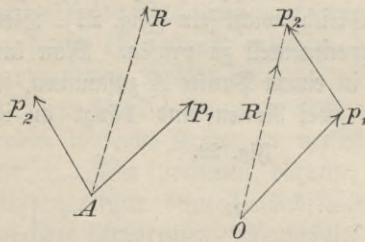
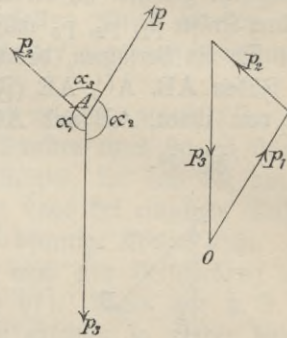


Fig. 24.



Aus der Figur erkennt man sofort, daß drei Kräfte nur dann im Gleichgewicht sein können, wenn sie in einer Ebene liegen und die Bedingungen erfüllen

$$P_1 : P_2 : P_3 = \sin a_1 : \sin a_2 : \sin a_3,$$

wo a_1, a_2, a_3 die von den Kräften gebildeten Winkel bezeichnen.

Die angegebene Konstruktion läßt sich ohne weiteres auf beliebig viele, in einem Punkte angreifende Kräfte ausdehnen. Man kann so in einfacher Weise ihre Resultierende bestimmen oder erkennen, ob jene Kräfte im Gleichgewicht sind.

Will man die Aufgabe durch Rechnung lösen, und handelt es sich nur um Kräfte in einer Ebene, so legt man durch den Angriffspunkt zwei rechtwinklige Achsen in jener Ebene und bestimmt die Richtungen der Kräfte durch die Winkel $a_1, a_2 \dots a_i$, die sie mit der positiven Richtung der X-Achse bilden. Zerlegt man jede Kraft p_i nach den Achsen in zwei Komponenten $x_i = p_i \cos a_i$ und $y_i = p_i \sin a_i$, so kann man die in der X-Achse wirkenden Seitenkräfte ersetzen durch eine Kraft $X = p_1 \cos a_1 + \dots + p_i \cos a_i$, die in der Y-Achse wirkenden Seitenkräfte durch eine Kraft $Y = p_1 \sin a_1 + \dots + p_i \sin a_i$. Es ist dann die Resultierende $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$. Ihre Richtung wird durch den Winkel φ bestimmt, den sie mit der positiven Richtung der X-Achse bildet und der aus $\tan \varphi = \frac{Y}{X}$ gefunden wird.

Für den Fall des Gleichgewichts muß $R = 0$ sein, was nur möglich ist, wenn $X = 0$ und $Y = 0$ ist.

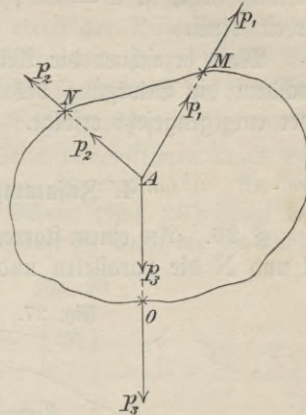
In ganz entsprechender Weise läßt sich die Resultierende der Größe und Richtung nach bestimmen, wenn die Kräfte nicht in einer Ebene liegen. Man wählt dann als Achsensystem drei sich im Angriffspunkt rechtwinklig schneidende Gerade und zerlegt die Kräfte nach diesen drei Richtungen.

2. Gleichgewicht dreier Kräfte an verschiedenen Angriffspunkten.

§ 24. Greifen in einem Punkt A eines starren Körpers drei Kräfte § 24. P_1, P_2, P_3 an (Fig. 25), die sich im Gleichgewicht halten, so können wir, ohne in der Wirkung der Kräfte etwas zu ändern, den Angriffspunkt in den Kraftrichtungen verschieben etwa nach den Punkten M, N, O des Umfangs. Demnach besteht nach vorigem Paragraphen folgender Satz: **Wenn drei Kräfte einen starren Körper im Gleichgewicht halten, so schneiden sich ihre Richtungen in einem Punkt, und die Kräfte verhalten sich wie die Sinus der gegenüberliegenden Winkel des Kräftedreiecks.**

Man kann den Satz mit Hilfe der Vorrichtung Fig. 22 durch den Versuch bestätigen. Die Enden der drei Fäden werden dann nicht in einen Punkt A zusammengeknüpft, sondern in drei Punkten des Umfangs einer leichten Scheibe befestigt.

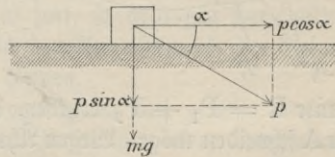
Fig. 25.



3. Erweiterung des Arbeitsbegriffes.

§ 25. Im § 22a hatten wir nur den Fall betrachtet, wo der § 25. Angriffspunkt einer Kraft sich in der Krafrichtung verschiebt, und als Maß der Arbeit das Produkt aus der Kraft und dem zurückgelegten Wege erkannt. Es fragt sich, wodurch wir die Arbeit zu messen haben, wenn die Bewegungsrichtung nicht mit der Krafrichtung zusammenfällt. Wirkt eine Kraft p auf einen Körper von der Masse m , der auf einer horizontalen, glatten Ebene liegt, unter dem Winkel α gegen die Unterlage (Fig. 26), so kann man p durch die horizontale Komponente $p \cos \alpha$ und die vertikale $p \sin \alpha$ ersetzen. Von diesen ruft die Seitenkraft $p \sin \alpha$ keine Bewegung hervor, ebensowenig wie die in derselben Richtung wirkende Schwerkraft mg des Körpers. Die Kräfte $p \sin \alpha$ und mg drücken nur auf die unverrückbare, starre Unterlage und werden durch den gleich großen Gegendruck $p \sin \alpha + mg$ aufgehoben. Solange wir von der Reibung absehen, kommt für die Fortbewegung allein die Seitenkraft $p \cos \alpha$ in Betracht. Es leistet deshalb auch nur diese Seitenkraft im mechanischen Sinn eine Arbeit, und zwar die Arbeit $p \cos \alpha \cdot s$, wenn der Körper unter der Einwirkung der Kraft p den Weg s zurücklegt. Fällt also die Krafrichtung nicht mit der Bewegungsrichtung zusammen, so haben wir die

Fig. 26.



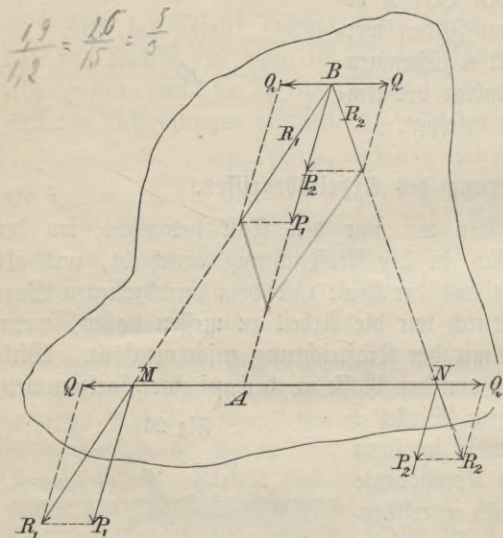
Arbeit zu messen durch das Produkt aus dem zurückgelegten Wege und der Projektion der Kraft auf die Bewegungsrichtung. Da $p \cos a \cdot s = p \cdot s \cos a$ ist, so können wir auch sagen: Die Arbeit ist gleich dem Produkt aus der Kraft und der Projektion des Weges auf die Kraft-richtung. Für den Fall, daß die Krafrichtung senkrecht zur Bewegungs-richtung steht, ist $a = 90^\circ$, also $\cos a = 0$, demnach auch die geleistete Arbeit Null.

Man bezeichnet die Arbeit einer Kraft als positiv oder negativ, je nachdem die Bewegung des Angriffspunktes im Sinne der Krafrichtung oder entgegengesetzt erfolgt.

4. Zusammensetzung paralleler Kräfte.

§ 26. § 26. An einem starren Körper (siehe § 23 ..) sollen in den Punkten M und N die parallelen und gleichgerichteten Kräfte P_1 und P_2 angreifen (Fig. 27). Ohne ihre Wirkung zu ändern, können wir in der Geraden MN zwei gleiche und entgegengesetzte Kräfte Q hinzufügen, die sich mit den gegebenen Kräften zu den nicht parallelen Resultierenden R_1 und R_2 zusammensetzen lassen.

Fig. 27.



Ist der Schnittpunkt B dieser Krafrichtungen starr mit M und N verbunden, so können wir R_1 und R_2 nach B verschieben und in die ursprünglichen Komponenten P und Q zerlegen. Die Kräfte Q heben sich dann auf, während P_1 und P_2 die Resultante $R = P_1 + P_2$ ergeben, deren Richtung verlängert die Gerade MN in A schneiden möge. Wegen Ähnlichkeit der Dreiecke bestehen die Proportionen $\frac{MA}{BA} = \frac{Q}{P_1}$ und $\frac{NA}{BA} = \frac{Q}{P_2}$, woraus durch Division folgt $\frac{MA}{NA} = \frac{P_2}{P_1}$. Da wir den Angriffspunkt der Kraft R von B nach A verlegen dürfen, so haben wir den Satz bewiesen:

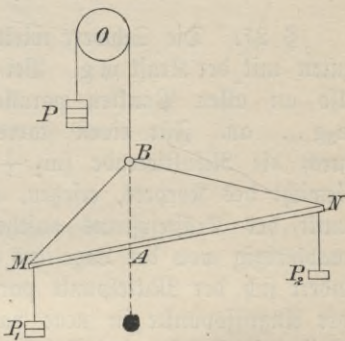
Zwei parallele und gleichgerichtete Kräfte lassen sich durch eine einzige ihnen parallele Kraft ersetzen, die gleich ihrer Summe ist und deren Angriffspunkt die Verbindungsgerade der ursprünglichen Angriffspunkte innerhalb im umgekehrten Verhältnis der Kräfte teilt.

Dreht man die Kräfte P_1 und P_2 beliebig um ihre Angriffspunkte M und N , aber so, daß sie stets parallel bleiben, so ändert sich die Lage des Punktes A nicht. Dadurch ist er vor allen anderen Punkten der Geraden AB ausgezeichnet, und man nennt ihn deshalb den Mittelpunkt der parallelen Kräfte.

Sind die Kräfte P_1 und P_2 entgegengesetzt parallel, so zeigt eine entsprechende Betrachtung, daß ihre Mittelkraft gleich der Differenz der gegebenen Kräfte ist und in der Richtung der größeren von ihnen wirkt. Die Verbindungslinie der Angriffspunkte wird in diesem Falle durch die Richtung der Resultierenden außer halb im umgekehrten Verhältnis der Kräfte geteilt.

Beide Fälle lassen sich in anschaulicher Weise demonstrieren unter Benutzung einer von Fr. C. G. Müller angegebenen Vorrichtung¹⁾. An dem einen Ende einer über die Rolle O geführten Schnur (Fig. 28) hängt das Gewichtstück P . Das andere Ende hat eine Schlaufe B , durch die ein Bindfaden P_1MBNP_2 gezogen wird. An diesem Faden hängen die Gewichte P_1 und P_2 (etwa 200 und 100 Gramm), deren Summe gleich P ist. Ein dünnes Holzstäbchen von 20 cm Länge hält die Gewichte P_1 und P_2 auseinander und ist zu dem Zweck an den Enden mit scharfen Einkerbungen versehen, um ein Rutschen zu vermeiden. Welche Gestalt man auch dem Dreieck MBN gibt, stets stellt sich die Vorrichtung so ein, daß die Verlängerung des vertikalen Fadenendes B das Stäbchen im Punkte A im umgekehrten Verhältnis der Kräfte P_1 und P_2 teilt.

Fig. 28.



Wirken auf einen starren Körper beliebig viele und gleichgerichtete parallele Kräfte $P_1, P_2, P_3 \dots$, so kann man zunächst zwei von diesen, z. B. P_1 und P_2 , durch ihre Resultierende $P_1 + P_2$ ersetzen und ihren Mittelpunkt bestimmen. Fügen wir die dritte Kraft P_3 hinzu, konstruieren den Mittelpunkt von $P_1 + P_2$ und P_3 und fahren so fort, so gelangen wir endlich zum Mittelpunkt des Systems, den wir als den Angriffspunkt der Resultierenden $P_1 + P_2 + P_3 + \dots$ ansehen können.

Bei einem System paralleler Kräfte, von denen eine gewisse Anzahl in der einen, die übrigen in entgegengesetzter Richtung wirken, können wir die erste Gruppe, deren Mittelpunkt M sei, durch die Resultierende R_1 , die andere mit dem Mittelpunkt N durch R_2 ersetzen. Sobald R_1 und R_2 der Größe nach verschieden sind, gibt es immer eine Kraft $R = R_1 - R_2$, die dem ganzen Kräftesystem gleichwertig ist, und das System hat auch in diesem Falle einen bestimmten Mittelpunkt. Ist dagegen $R_1 = R_2$, so wird R gleich Null. Das System kann dann nicht mehr durch eine

¹⁾ Poste, Zeitschrift für phys. und chem. Unterricht. 15. Jahrg. Seite 10.

einige Kraft ersetzt werden. Die beiden gleichen und entgegengesetzt parallelen Kräfte R_1 und R_2 sind dann das einfachste Element, auf das sich die Wirkung des ganzen Systems zurückführen läßt.

Zwei gleiche und entgegengesetzt parallele Kräfte heißen ein Kräftepaar. Dieses kann einem Körper keine fortschreitende, sondern nur eine drehende Bewegung erteilen, und zwar sucht es den Körper um eine Achse zu drehen, die senkrecht steht zu der durch die Krafrichtungen bestimmten Ebene. Im § 31 wird gezeigt werden, daß die Drehwirkung einer Kraft durch ihr Drehungsmoment gemessen wird, d. h. durch das Produkt aus der Größe der Kraft in den Abstand der Krafrichtung von der Drehachse. Hieraus folgt, daß das Drehungsmoment eines Kräftepaares gleich ist dem Produkt aus der Größe der Kraft in den Abstand der Kräfte, es ist also unabhängig von den Entfernungen zwischen Krafrichtung und Drehachse.

5. Schwerpunkt.

§ 27. § 27. Die Schwere wirkt auf jedes Massenteilchen m lotrecht nach unten mit der Kraft $m g$. Bei einem nicht zu ausgedehnten Körper greifen also an allen Punkten parallele und gleichgerichtete Kräfte $m_1 g$, $m_2 g$, $m_3 g \dots$ an. Für einen starren Körper können wir alle diese Kräfte durch die Resultierende $(m_1 + m_2 + \dots) g = M g$, d. h. durch das Gewicht des Körpers, ersetzen, als dessen Angriffspunkt wir den Mittelpunkt des Kräftesystems ansehen dürfen. Die Lage dieses Punktes ist unabhängig von der Lage des Körpers, denn, wie bereits hervorgehoben, ändert sich der Mittelpunkt paralleler Kräfte nicht, wenn man diese um ihre Angriffspunkte in neue parallele Lagen dreht. Jener Punkt heißt Massenmittelpunkt oder Schwerpunkt. Die erste Bezeichnung ist die allgemeinere, da unsere Betrachtung nicht nur für die Schwerkraft gilt, sondern für beliebige parallel und gleich gerichtete Kräfte, wenn diese den Massen proportionale Beschleunigungen erteilen. Ein Körper bewegt sich dann stets so, als ob die Summe der parallelen Kräfte im Massenmittelpunkt angriffe und die ganze Masse des Körpers in diesem Punkte konzentriert wäre.

Eine durch den Schwerpunkt gelegte vertikale Gerade ist bei jeder Lage des Körpers die Angriffslinie der Schwerkraft. Ein Körper, der in einem Punkte unterstützt wird, kann deshalb unter dem Einfluß der Schwere nur dann im Gleichgewicht sein, wenn Unterstützungspunkt und Schwerpunkt in einer Lotrechten Geraden liegen. Hierauf beruht ein Verfahren, den Schwerpunkt scheibenartiger Körper durch den Versuch zu ermitteln. Man hängt eine Platte (Fig. 29) an einem Punkte A ihres Umfangs, hierauf an B auf und bezeichnet auf ihr die Richtungen des Aufhängefadens. Der Schnittpunkt beider Richtungen ist der Schwerpunkt. Zur Probe hängt man den Körper noch in irgend einem dritten Punkt des Umfangs auf.

Der Schwerpunkt homogener Körper mit geometrischem Mittelpunkt fällt mit diesem zusammen. Bei anderen Körpern von geometrisch bestimmter Gestalt läßt er sich häufig durch einfache Überlegungen konstruieren.

Durch Rechnung findet man die Lage des Schwerpunktes, indem man seine Entfernungen von drei sich senkrecht im Raume schneidenden Ebenen bestimmt. A_1 und A_2 seien 2 Massenpunkte eines Körpers, x_1 und x_2 ihre Entfernungen von einer beliebigen Ebene E (Fig. 30). Die in A_1 und A_2 angreifenden Schwerkraft m_1g und m_2g ersetzen wir durch die Mittelkraft $m_1g + m_2g$, deren Angriffspunkt S die Gerade A_1A_2 so teilt, daß

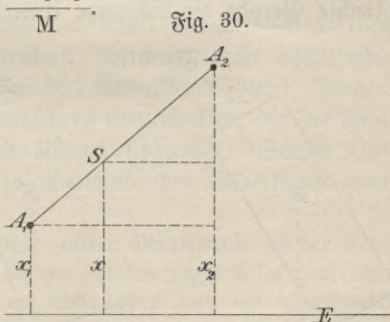
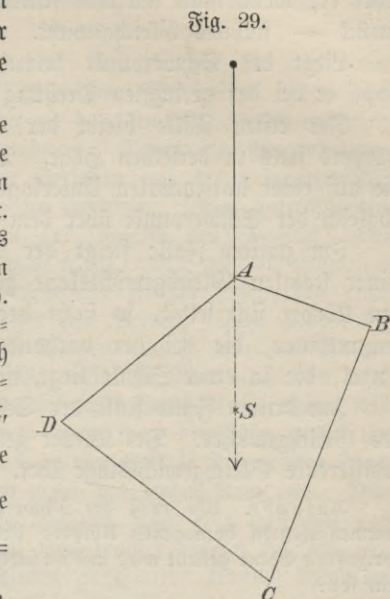
$$\frac{A_1S}{A_2S} = \frac{m_2}{m_1} \text{ ist. Bezeichnet } x \text{ die Entfernung des Punktes } S \text{ von der Ebene } E, \text{ so folgt aus der Figur}$$

$$\frac{x_2 - x}{x - x_1} = \frac{A_2S}{A_1S} = \frac{m_1}{m_2}, \text{ also } x = \frac{m_1x_1 + m_2x_2}{m_1 + m_2}.$$

Durch allmähliches Hinzufügen der neuen Massenpunkte $A_3, A_4 \dots$ erhält man so für den Schwerpunktsabstand eines Körpers von einer beliebigen Ebene E den Ausdruck

$$X = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots} = \frac{\sum m_i x_i}{M}.$$

Bei einem gleichartig mit Masse erfüllten Körper kann man für das Massenelement m_i das Produkt aus Volumenelement v_i und Dichte d setzen. In dem Ausdruck für X hebt sich dann der Faktor d im Zähler und Nenner weg. Bei scheibenartigen Körpern tritt für v_i das Flächenelement f_i ein, bei Körpern mit vorwiegend einer Dimension das Linienelement l_i .



Aufgabe. Man bestimme durch Zeichnung oder Rechnung den Schwerpunkt eines Dreiecksumfangs, eines Kreisbogens; einer Dreiecksfläche, einer Polygonfläche, eines Kreissektors; einer dreiseitigen und einer mehrseitigen Pyramide, eines Kegels, eines Kugelsektors. Anwendungen der Guldinschen Regel.

6. Gleichgewicht eines Körpers.

§ 28. Ist ein Körper im Schwerpunkt durch eine Achse unterstützt, so § 28. bleibt er in jeder beliebigen Lage in Ruhe — indifferentes Gleichgewicht.

Hängt man einen Körper lotrecht über dem Schwerpunkt auf, so kehrt er, wenn man ihn aus seiner Lage bringt, stets wieder in dieselbe zurück — stabiles Gleichgewicht.

Liegt der Schwerpunkt lotrecht über dem Unterstützungspunkt, so kippt er bei der geringsten Drehung um — labiles Gleichgewicht.

Im ersten Falle bleibt der Schwerpunkt bei einer Drehung des Körpers stets in derselben Höhe. Deshalb ist auch eine homogene Kugel, die auf einer horizontalen Unterlage ruht, im indifferenten Gleichgewicht, obgleich der Schwerpunkt über dem Unterstützungspunkt liegt.

Im zweiten Falle steigt der Schwerpunkt, wenn der Körper aus seiner stabilen Gleichgewichtslage gebracht wird. Überläßt man nachher den Körper sich selbst, so sucht der Schwerpunkt die tiefste Lage wieder einzunehmen, die bei der vorhandenen Beweglichkeit möglich ist. Eine Kugel, die in einer Schale liegt, ist im stabilen Gleichgewicht.

Im dritten Falle sinkt der Schwerpunkt bei der geringsten Störung des Gleichgewichts. Der Körper geht aus der labilen in die stabile oder indifferente Gleichgewichtslage über.

Aufgabe. Wo muß der Schwerpunkt eines aus Halbkugel und Kegel zusammengesetzten homogenen Körpers liegen, wenn der Körper aufrecht auf eine horizontale Ebene gestellt wird und im indifferenten, stabilen oder labilen Gleichgewicht sein soll?

7. Stabilität.

§ 29. Ist ein Körper in einer Fläche unterstützt, und dreht man ihn um eine der Begrenzungslinien seiner Unterstützungsfläche, so kehrt er in seine Lage zurück, solange noch die durch den Schwerpunkt gezogene lotrechte Gerade die bisherige Unterstützungsfläche trifft.

Fig. 31.

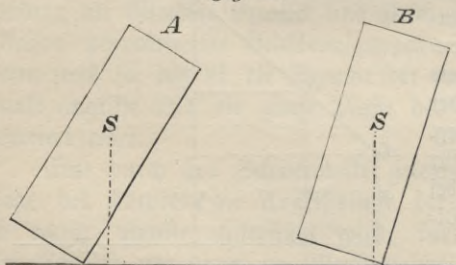
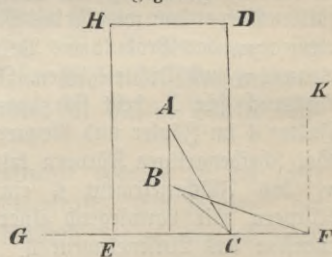


Fig. 32.



(Fig. 31.) Körper A fällt um, B stellt sich wieder auf seine Unterstützungsfläche.

Daher ist seine Stabilität desto größer, je größer die Unterstützungsfläche ist und je tiefer der Schwerpunkt liegt.

Wenn in dem Körper CDHE (Fig. 32) der Schwerpunkt in A liegt, so kann der Körper um die Kante C so weit gedreht werden, daß AC lotrecht steht, also die Drehung = $\angle ACD$ ist; ist aber B der Schwerpunkt,

so kann die Drehung $= \angle BCD$ sein, und ist seine Unterstüßungsfläche bis G und F erweitert, so kann die Drehung $= \angle BFK$ sein, ohne daß der Körper umfällt.

Damit Leuchter und Lampen feststehen, versieht man sie mit einem breiten Fuße, füllt diesen wohl auch mit Blei aus. Pyramiden stehen fester als Prismen. Ein hochbeladener Wagen ist dem Umfallen mehr ausgesetzt als ein ebenso schwer, aber niedrig beladener. Droht ein Wagen umzufallen, so neigen sich die darin sitzenden Personen auf die entgegengesetzte Seite; sie vergrößern die Gefahr, wenn sie aufstehen. Beim aufrechtstehenden Menschen liegt der Schwerpunkt in der Gegend des Magens; seine Unterstüßungsfläche ist das Viereck, das man erhält, wenn man die Fußspitzen und die Fersen durch gerade Linien verbindet. Fechter stellen den einen Fuß vor. Die Matrosen gehen mit gespreizten Beinen. Das Gehen, das Schlittschuhlaufen, das Seiltanzen. Beim Ringen umfaßt man den Gegner möglichst tief unter dem Schwerpunkte. Ein gefülltes Glas muß man möglichst nahe am oberen Rande halten, wenn man das Verschütten verhüten will. Will man von einem Stuhl aufstehen, so zieht man die Füße zurück und neigt den Oberkörper nach vorn. Trägt man eine Last in der rechten Hand, so neigt man sich nach links, streckt auch wohl den linken Arm aus. Man geht gebückt oder rückwärts gebeugt, je nachdem man eine Last auf dem Rücken oder vor sich trägt. Warum fällt man leichter, wenn ein Fuß seitwärts, als wenn er nach vorn oder hinten ausgleitet? Warum balanciert sich ein Körper desto leichter, je höher der Schwerpunkt liegt, also ein langer Stab leichter als ein kurzer?

B. Einfache Maschinen.

1. Zweck der Maschinen.

§ 30. Soll ein Widerstand durch eine Kraft überwunden werden, § 30. so ist es oft notwendig oder doch vorteilhaft, die Kraft nicht unmittelbar auf den Körper wirken zu lassen, der den Widerstand bietet, sondern zwischen Kraft und Widerstand eine Vorrichtung einzuschalten, die die Kraft in zweckentsprechender Weise auf jenen Körper überträgt. Solche Vorrichtungen sind die Maschinen. Den zu überwindenden Widerstand nennt man Last.

Um einen Körper zu teilen, lassen wir unsere Muskelkraft in der Regel nicht unmittelbar auf den zu teilenden Körper wirken (was beim Zerbrechen der Fall ist), sondern auf ein Messer, ein Beil oder sonst ein schneidendes Instrument. Zur Niederreißung der Mauern bedient man sich der Brechstange. Der Seiler dreht den Faden nicht unmittelbar mit der Hand, sondern mittelst eines Rades, wodurch er den Vorteil erreicht, daß die Geschwindigkeit der drehenden Bewegung vergrößert wird und er die Muskelkraft des Armes und nicht bloß die der Finger oder der Hand anwenden kann. Beim gewöhnlichen Spinnrade wird außerdem die auf- und abgehende Bewegung des Fußes in eine drehende verwandelt. Bei den Wassermühlen wird die Kraft des fließenden Wassers durch Räder auf den Mühlstein und durch diesen auf das zu mahrende Getreide übertragen.

Einfache Maschinen sind 1. der Hebel, 2. die Seilmaschinen (Rolle, Flaschenzug, Wellrad), 3. die schiefe Ebene (Keil und Schraube).

Die Anwendung dieser maschinellen Vorrichtungen ist uralt. Keine Überlieferung hat uns die Namen ihrer großen Entdecker aufbewahrt. Vieles erscheint uns heute selbstverständlich, weil wir es von Jugend auf kennen. Das Rad am Wagen z. B. ist eine so alltägliche Erscheinung, daß wir uns der Tragweite seiner Erfindung nur schwer bewußt werden.

Die Maschinen sind erfunden worden, um Lasten in günstigerer Weise zu bewegen, als es ohne sie möglich ist. Es handelt sich bei ihrer Anwendung fast immer darum, die zu leistende Arbeit, entsprechend der Größe der gegebenen Kräfte, umzuformen. Um die Wirkung einer Maschine zu verstehen, müssen wir sie deshalb im bewegten Zustande beobachten. Wir müssen die Beziehungen kennen lernen, die zwischen den angreifenden Kräften bestehen, je nachdem diese Bewegung gleichförmig oder ungleichförmig ist. Eine Vereinfachung unserer Aufgabe erzielen wir dadurch, daß wir vorläufig von den Reibungswiderständen absehen. Wir setzen also eine ideale Maschine voraus oder denken uns wenigstens jene Hindernisse der Bewegung durch entsprechende Kräfte aufgehoben. Soll die durch eine Maschine vermittelte Bewegung unter dieser Voraussetzung gleichförmig verlaufen, so müssen die angreifenden Kräfte im Gleichgewicht sein. Unsere nächstliegende Aufgabe besteht also darin, die Gleichgewichtsbedingungen bei einer Maschine aufzusuchen. Dieser Weg zur Erkenntnis ist auch historisch berechtigt.

2. Gleichgewicht bei den einfachen Maschinen.

§ 31. a) **Der Hebel.** § 31. Ein starrer und um eine feste Achse drehbarer Körper heißt Hebel.

Jeder Punkt des Hebels beschreibt bei der Drehung einen Kreis, dessen Mittelpunkt in der Achse liegt und dessen Ebene auf der Achse senkrecht steht. Alle Drehungsebenen sind also einander parallel. Eine am Hebel angreifende Kraft ändert ihre Wirkung nicht, wenn sie in ihrer eigenen Richtung, oder wenn sie der Achse parallel von einer Drehungsebene in eine andere verschoben wird. Tritt eine auf den Hebel wirkende Kraft aus der Drehungsebene heraus, so kann man sie senkrecht und parallel jener Ebene in zwei Komponenten zerlegen, von denen nur die letztere für die dem Hebel mögliche Drehbewegung in Betracht kommt. Hieraus folgt:

Jeder Hebel kann durch eine Ebene ersetzt werden, die sich um einen festen Punkt in sich selber drehen kann, und an der nur solche Kräfte wirken, die innerhalb der Ebene liegen. In diesem Sinne wird im folgenden von einem Drehpunkt oder einem Unterstützungspunkt des Hebels gesprochen.

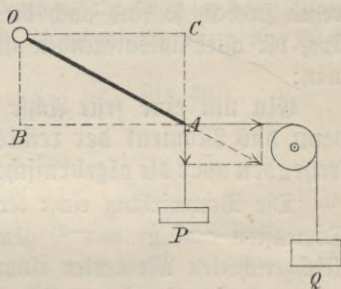
Die Entfernung vom Drehpunkt des Hebels bis zum Angriffspunkt einer Kraft heißt deren Hebelarm.

Liegen die Angriffspunkte aller Kräfte mit dem Drehpunkte in gerader Linie, so heißt der Hebel ein geradliniger; sind nur zwei Kräfte vorhanden und liegen deren Angriffspunkte nicht in gerader Linie mit dem Drehpunkt, so ist der Hebel ein Winkelhebel. Ein geradliniger Hebel, an dem zwei Kräfte drehen, wird einarmig genannt, wenn beide Angriffspunkte auf derselben Seite des Drehpunktes liegen, dagegen zweiarinig, wenn sie auf verschiedenen Seiten, und gleicharmig, wenn sie in gleichen Entfernungen vom Drehpunkt liegen. Diese allgemein üblichen Bezeichnungen sind von untergeordneter Bedeutung, da sie nur nebensächliche Umstände hervorheben.

Hebelsatz des Archimedes (287—212 v. Chr.). Unterstützt man eine Stange in ihrer Mitte und hängt auf beiden Seiten zwei Gewichte auf, so bleibt die Stange im Gleichgewicht, wenn die Gewichte sich umgekehrt wie ihre Hebelarme verhalten.

Eine allgemeinere Auffassung der Hebelwirkung finden wir erst bei Leonardo da Vinci (1452—1519). An einer um O drehbaren Stange (Fig. 33) hängt er in einem Punkte A das Gewicht P auf und an einer über eine Rolle geführten Schnur das Gewicht Q. Er erkennt richtig, daß Gleichgewicht vorhanden ist, wenn $P \cdot OC = Q \cdot OB$ ist, d. h. wenn die Produkte aus den Kräften in die Entfernung des Drehpunktes von ihren Richtungen einander gleich sind. Die Mittelkraft von P und Q fällt dann, wie leicht ersichtlich, in die Richtung der Stange OA und wird durch den Widerstand der festen Drehachse O aufgehoben.

Fig. 33.

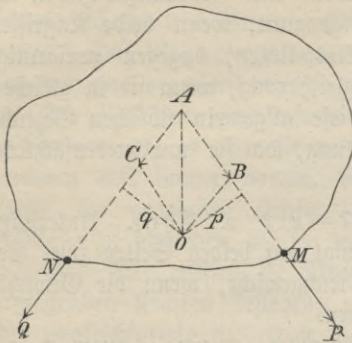


Für parallele Kräfte ergibt sich das gleiche Gesetz unmittelbar aus § 26. Sollen die in M und N angreifenden Kräfte P_1 und P_2 (s. d. Fig. 27) keine Bewegung hervorrufen, so muß der Drehpunkt auf der Geraden AB liegen, der Richtungslinie der Resultierenden ($P_1 \pm P_2$). Nun war aber $\frac{MA}{NA} = \frac{P_2}{P_1}$, und, da sich MA und NA verhalten wie die Abstände p_1 und p_2 eines beliebigen Punktes der Geraden AB von den Kraftrichtungen, so folgt $P_1 \cdot p_1 = P_2 \cdot p_2$.

Nach Varignon (1654—1722) kann man für beliebige Kräfte das sogenannte Hebelgesetz aus dem Satz vom Kräfteparallelogramm ableiten. Zunächst seien nur zwei Kräfte, P und Q, an dem um O drehbaren Hebel gegeben, die in den Punkten M und N angreifen (Fig. 34). Sie liegen in der Drehungsebene, und ihre Richtungen schneiden sich in einem Punkte A. Im Falle A mit M und N starr verbunden ist, kann man die Kräfte in ihrer

Richtung verschieben und in A angreifen lassen. (S. § 38a.) Nach dem Parallelogrammgesetz lassen sie sich dann durch eine einzige Kraft R ersetzen, die durch den Drehpunkt O gehen muß, wenn der Hebel im Gleichgewicht sein soll. Da wir zur Zeichnung der Kräfte ein beliebiges Längenmaß wählen dürfen, so wollen wir die Resultierende durch die Strecke OA darstellen, die Kräfte P und Q also durch die Seiten AB und AC des Parallelogramms ABOC. Bezeichnen wir die Entfernungen des Drehpunktes von den Kräfterichtungen mit p und q, so folgt aus der Kongruenz der Dreiecke ABO und ACO

Fig. 34.



$$AB \cdot p = AC \cdot q \text{ oder } P \cdot p = Q \cdot q.$$

Man nennt das Produkt aus einer Kraft und ihrem Abstand vom Drehpunkt ihr Drehungsmoment. Gibt man den Kräften das positive oder negative Vorzeichen, je nachdem sie den Hebel rechts oder links herum zu drehen streben, so sind auch die Momente aller rechtsdrehenden Kräfte mit plus, die aller linksdrehenden mit minus zu bezeichnen. Das Gesetz lautet dann:

Ein um eine feste Achse drehbarer Körper ist im Gleichgewicht wenn das Moment der rechtsdrehenden Kraft gleich dem der linksdrehenden oder die algebraische Summe der Drehungsmomente Null ist.

Die Drehwirkung einer Kraft wird also durch ihr Drehungsmoment (Dimension $\text{cm}^2 \text{ gr sec}^{-2}$) gemessen, so daß zwei Kräfte von gleichen und gleichgerichteten Momenten einander ersetzen können. Das Gesetz gilt deshalb auch für zwei parallele Kräfte P und Q, denn wir können die Drehwirkung, z. B. von Q, stets durch die einer P nicht parallelen Kraft ersetzen, wenn nur die Drehmomente von Q und der Hilfskraft gleich und gleichgerichtet sind.

Greifen an einem Hebel beliebig viele Kräfte $P_1, P_2 \dots$ an, und haben sie vom Drehpunkt O die Entfernungen $p_1, p_2 \dots$, so lassen sie sich durch Kräfte $R_1, R_2 \dots$ ersetzen, die alle an demselben beliebigen Punkte X des Hebels senkrecht gegen $XO = r$ wirken, wenn die Drehungsmomente $P_i \cdot p_i$ und $R_i \cdot r$ gleich und gleichgerichtet sind. Die Kräfte R_i können wir nun durch ihre algebraische Summe R ersetzen, deren Drehungsmoment $Rr = \sum R_i \cdot r = \sum P_i \cdot p_i$ ist. Sollen die Kräfte P_i sich das Gleichgewicht halten, so muß entweder R oder r gleich Null, jedenfalls also $\sum P_i \cdot p_i = 0$ sein, womit das Gesetz für beliebige Kräfte erwiesen ist.

Hebel im engeren Sinne sind der Hebebaum, die Brechstange, die Karre, der Pumpenschwengel, die Türklinke, die Schere, die Zange, die Häckselschneide, die gemeine Wage, die Schnellwage. Zum Heben großer Lasten bedient man sich

sehr langer Hebelarme. Je näher auf der Karre die Last an das Rad gelegt wird, desto leichter ist sie zu fahren. Die Blech- und Zaunschere haben sehr lange Griffe, die Papierschere ganz kurze. Je fester der zu zerschneidende Gegenstand ist, desto näher hält man ihn an den Drehpunkt der Schere. Die Knochen der Arme, die Finger bilden Hebel, an denen der Hebelarm der Kraft kürzer als der der Last ist.

§ 32. Die Hebelwaage besteht aus einem gleicharmigen Hebel, § 32. dessen Drehachse über dem Schwerpunkt des Wagebalkens liegt. (Warum?) Um die Reibung möglichst zu verringern, benutzt man als Drehachse die gerade Schneide eines Stahlprisma, die auf einer ebenen harten Platte ruht. An den Endpunkten des Hebels sind die gleich schweren Wagschalen in genau derselben Entfernung von der Drehachse an Schneiden aufgehängt, die der Achse parallel sind. (Warum?) Diese Schneiden müssen ferner mit der Achse in derselben Ebene liegen. Hierdurch wird erreicht, daß weder die Wagschalen noch zwei gleiche Auflagegewichte bei irgend einer Stellung des Wagebalkens das Gleichgewicht beeinflussen. Denn ist P das Gewicht einer Wagschale samt einem Auflagegewicht, so geht die Mittelkraft $2P$ stets durch die Drehachse, kann also keine Drehung bewirken. Läge dagegen die Drehachse O (Fig. 35) oberhalb der Ebene der Aufhängeschneiden A und B , dann würde zwar bei horizontaler Stellung des Wagebalkens die Mittelkraft $2P$ ebenfalls durch die Dreh-

Fig. 35.

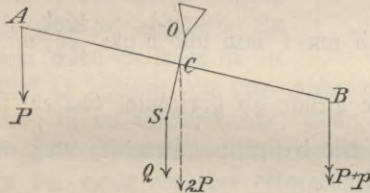
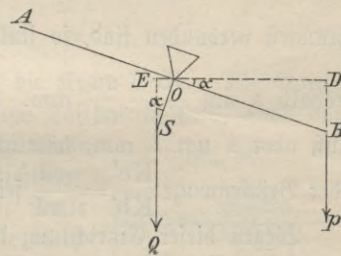


Fig. 36.



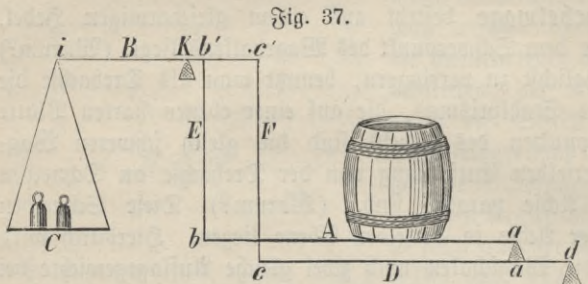
achse gehen, nicht aber, sobald auf der einen Seite ein Übergewicht p hinzugefügt wird. Die Mittelkraft $2P$ greift dann in C , der Mitte von AB , an und dreht mit dem im Schwerpunkt S angreifenden Gewicht Q des Wagebalkens entgegengesetzt wie das Übergewicht p . Da nun eine Waage um so empfindlicher ist, einen je größeren Ausschlag dasselbe Übergewicht hervorruft, so würde dieselbe Waage mit steigender Belastung immer unempfindlicher werden. (Warum darf O nicht unterhalb AB liegen?) Bei einem richtig konstruierten Wagebalken drehen allein das in B angreifende Übergewicht p mit dem Hebelarm OD und das im Schwerpunkt S angreifende Gewicht Q des Balkens mit dem Hebelarm OE (Fig. 36). Es besteht Gleichgewicht, wenn $p \cdot OD = Q \cdot OE$ ist. Bezeichnen wir den Ausschlagswinkel DOB , der gleich OSE ist, mit α , so ist $OD = OB \cos \alpha$ und $OE = OS \sin \alpha$. Aus der Momentengleichung

folgt dann $\tan a = \frac{p \cdot OB}{Q \cdot OS}$. Eine Hebelwage ist also um so empfindlicher, je leichter der Wagebalken bei gegebener Länge ist und je näher der Schwerpunkt der Drehachse liegt.

§ 33.

§ 33. Die Brückenwage, die 1823 vom Mechanikus Quintenz

in Straßburg erfunden wurde, hat folgende Einrichtung: B ist ein Hebel, der seinen Unterstützungspunkt in K hat und in i die Gewichte trägt (Fig. 37). In b' hängt an der Stange E das Brett A, auf



dem die Last ruht und das sich im Punkte a auf eine Schneide stützt. Diese ruht auf dem Hebel D, der in c' an der Stange F hängt und in d auf einer Schneide liegt.

Die Brücke A soll bei den Drehungen der Hebel um K und um d in wagerechter Lage bleiben, dann ist es gleichgültig, an welcher Stelle die Last auf die Brücke gesetzt wird. Wenn nun z. B. b' um 1 mm sinkt, so geht c' um $\frac{Kc'}{Kb'}$ mm abwärts; da b' mit b und c' mit c durch

Stangen verbunden sind, so sinkt auch b um 1 mm und c um $\frac{Kc'}{Kb'}$ mm,

deshalb a um $\frac{Kc'}{Kb'} \cdot \frac{ad}{cd}$ mm. Soll die Brücke ab horizontal bleiben, so muß aber a um 1 mm, nämlich soviel wie b sinken. Demnach muß an jeder Brückenwage $\frac{Kc'}{Kb'} = \frac{cd}{ad}$ sein.

Wegen dieser Einrichtung der beiden Hebel A und D wirkt die Last, so auf den Hebel B, als ob sie unmittelbar im Punkte b' hänge. Denn ein Teil der Last zieht an der Stange E, und ein Teil drückt auf a; jener sei m kg, dieser r kg, so daß (m + r) kg gleich der Last sei. Ist nun $cd = n \cdot ad$, so drücken die r kg so stark nach unten, als ob in c eine Last von $\frac{1}{n}$ r kg hänge. Der Hebel B wird dadurch in c' mit $\frac{1}{n}$ r kg nach unten gezogen. Das bringt aber dieselbe Wirkung hervor,

als ob in b' eine Last von $n \cdot \frac{1}{n} r$, d. i. r kg hänge. Also auch der Teil der Last, der auf a ruht, wirkt so auf den Hebel B, als ob er in b' angriffe. Ist nun $iK = 10 Kb'$, so ist die Last zehnmal so groß als die Gewichte auf der Waagschale C.

b) **Die Seilmaschinen.** § 34. Wir können eine Last dadurch § 34. heben, daß wir an dem einen Ende eines Seils die Last befestigen und an dem anderen Ende mit unserer Hand einen Zug nach oben ausüben. Das Seil überträgt dadurch, daß es sich spannt, die Kraftwirkung unserer Hand auf die Last und umgekehrt auch den Zug der Last auf unsere Hand. Bei dieser Art des Hebens ermüden wir sehr rasch, weil die Hebearbeit allein durch unsere Muskelkraft geleistet werden muß. Um unser Körpergewicht als hebende Kraft auszunützen, müssen wir den nach oben auszuübenden Zug in einen nach unten gerichteten umändern. Die Biegsamkeit des Seils gestattet, diesen Zweck durch sehr einfache Mittel zu erreichen. Ein über uns befestigter Ring, durch den wir das freie Ende des Seils ziehen, genügt hierzu (Fenster Vorhänge). Wir können auch das Seil über einen horizontalen, runden Stab legen oder durch ein gut ausgerundetes Loch führen. Allerdings tritt bei diesen einfachen Vorrichtungen ein beträchtlicher Reibungswiderstand auf. Deshalb benützt man, sobald es sich um die Richtungsänderung größerer Kräfte handelt, eine Rolle, die sich leicht um eine feste Achse drehen läßt und die an ihrem Rande mit einer Rinne zur Aufnahme des Seils versehen ist (Fig. 38 und 39). An dem einen Seilende ist die

Fig. 38.

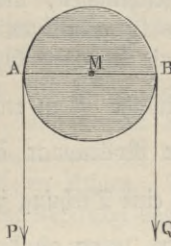
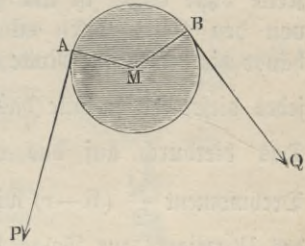
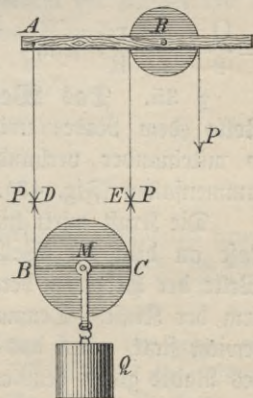


Fig. 39.



Last Q befestigt, an dem anderen greift die Kraft P an. Die Vorrichtung ist im Gleichgewicht, wenn Kraft und Last gleich sind, denn dann liegt kein Grund vor für eine Drehung der Rolle in der einen oder der entgegengesetzten Richtung. Die Anwendung einer sogenannten festen Rolle gewährt also keine Ersparnis an Kraft, sie bietet nur den Vorteil einer günstigeren Zugrichtung.

Fig. 40.



Eine Vorrichtung, bei der auch der erstere Zweck erreicht wird, zeigt die Fig. 40. Hier ist die Last Q an einer Rolle M befestigt, die beweglich in einer Seilschleife hängt. Das eine Seilende ist irgendwo, z. B. an der Zimmerdecke, festgemacht, das andere Ende, an dem die Kraft P wirkt, geht über die feste Rolle R. Denken wir uns das Seil, dessen vertikale Teile unter sich parallel sein mögen, in den Punkten D und E durchschnitten, so müssen wir an jedem Seilende der beweglichen Rolle eine nach oben ziehende

Kraft $P = \frac{Q}{2}$ anbringen, um die Last Q im Gleichgewicht zu halten.

Hierbei wird vorausgesetzt, daß das geringe Eigengewicht der beweglichen Rolle vernachlässigt werden kann. P gibt die Seilspannung an.

Bei dem gemeinen Flaschenzuge sind mehrere feste und ebensoviele bewegliche Rollen durch ein Seil in der Weise verbunden, wie es die Fig. 41 zeigt. Die Anzahl sämtlicher Rollen ist das Verhältnis der Last zur Kraft. In Fig. 41 ist $P = \frac{Q}{6}$, denn denken wir uns wiederum einen Schnitt durch die Seile gelegt, so muß an jedem Seilende der unteren Rollen eine nach oben ziehende Kraft $\frac{Q}{6}$ angreifen, damit am Gleichgewichtszustande nichts geändert wird.

Beim Differentialflaschenzuge bestehen die beiden oberen festen Rollen a und b (Fig. 42) mit den wenig verschiedenen Radien R und r aus einem Stück. Eine Kette ohne Ende ist um sie geschlungen, und in der von den Kettenstücken ed und fg gebildeten Schleife hängt die bewegliche Rolle c mit der Last Q , so daß jedes dieser Kettenstücke das Gewicht $\frac{Q}{2}$ zu tragen hat. Das hierdurch auf das obere Rollenpaar ausgeübte Drehmoment $\frac{Q}{2} (R-r)$ würde eine Drehung im Sinne des Uhrzeigers zur Folge haben, wenn an dem linken Kettenstück nicht eine Kraft P nach unten ziehen würde, deren Drehwirkung $P \cdot R$ ist. Soll Gleichgewicht bestehen, so muß $P \cdot R = \frac{Q}{2} (R-r)$, also $P = \frac{R-r}{2R} Q = \frac{Q}{2} \left(1 - \frac{r}{R}\right)$ sein.

§ 35.

§ 35. Das Wellrad besteht aus einer festen Rolle (dem Rade) und einem Zylinder (Welle), die so miteinander verbunden sind, daß ihre Achsen zusammenfallen (Fig. 43).

Die Kraft wirkt hier am Umfange des Rades, die Last an dem der Welle; es ist also der Radius der Welle der Hebelarm der Last, der des Rades der Hebelarm der Kraft. Demnach findet am Wellrade Gleichgewicht statt, wenn das Produkt aus Kraft und Radius des Rades gleich dem aus Last und Radius der Welle ist ($P \cdot R = Q \cdot r$).

An Stelle des Rades sind oft nur einzelne Speichen angebracht, wie z. B. bei der Erdwinde (Fig. 44), der Haspel.

Fig. 41.

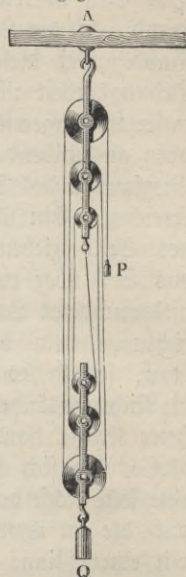
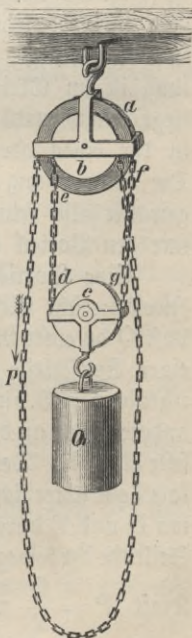


Fig. 42.



Das Verhältnis von Last und Kraft, die sogenannte Übersetzung, ist um so günstiger, je größer man R und je kleiner man r macht. Aus nahe-
liegenden Gründen gelangt man dabei rasch an eine Grenze. Will man

Fig. 43.

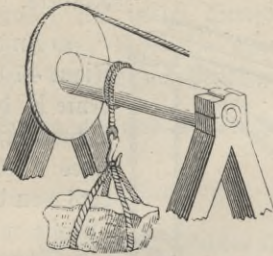
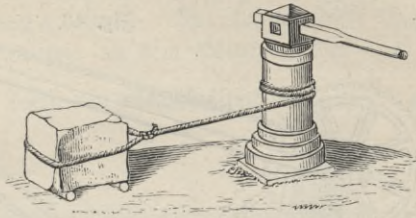
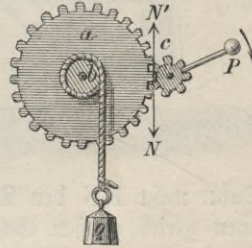


Fig. 44.



stärkere Übersetzungen erzielen, so bedient man sich zusammengesetzter Räder-
werke. Die Bewegung wird dann durch ineinandergreifende Zahnräder
oder durch Riemen übertragen. In Fig. 45 hängt
die Last Q an einem Seile, das über die Welle
 b läuft. Auf der Achse dieser Welle ist das große
Zahnrad a befestigt. In dieses greifen die Zähne
des kleineren Rades c ein, mit dessen Achse eine
Kurbel fest verbunden ist, an der die Kraft P
wirkt. Das Räderwerk besteht demnach hier aus
zwei Wellrädern mit parallelen Achsen. Da, wo
die Räder ineinander greifen, überträgt das Zahn-
rad a auf c den vertikal nach unten gerichteten
Druck N und das Getriebe c auf a den gleichen, aber entgegengesetzt ge-
richteten Druck N^1 . Die Gleichgewichtsbedingung für das linke Wellrad ist
 $Q \cdot r = N^1 \cdot R$ und für das rechte $P \cdot R^1 = N \cdot r^1$, wo die Radien von
 a, b, c der Reihe nach mit R, r, r^1 und der Hebelarm der Kurbel mit R^1
bezeichnet sind. Aus beiden Gleichungen folgt, da $N = N^1$ ist,

Fig. 45.



$$\frac{P \cdot R^1}{r^1} = \frac{Q \cdot r}{R}, \text{ also } P = Q \frac{r \cdot r^1}{R \cdot R^1}$$

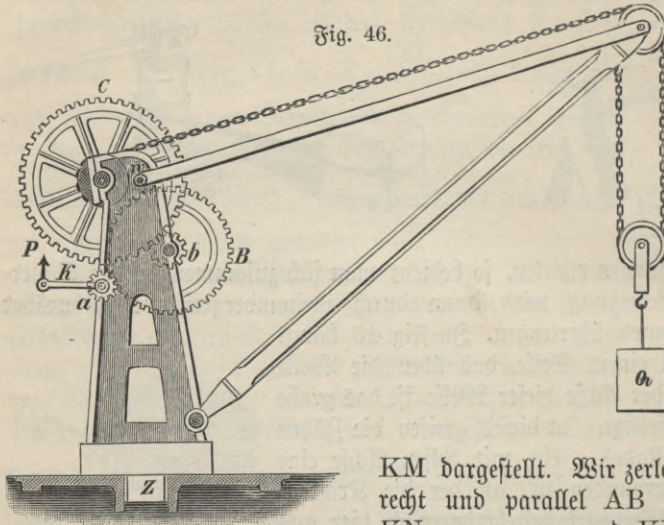
Ist z die Anzahl der Zähne des Rades a und z^1 die von c , so verhält
sich $\frac{z}{z^1} = \frac{R}{r^1}$, demnach ist $P = Q \frac{r \cdot z^1}{R^1 \cdot z}$.

Aufgabe. Es soll das Übersetzungsverhältnis umstehend skizzierten Kranes
(Fig. 46) gefunden werden, wenn die Getriebe a und b je 10 Zähne, die Räder
 B und C 40 und 50 Zähne haben, der Radius der Kurbel K 30, der der Welle w
20 cm beträgt.

c) **Die schiefe Ebene.** § 36. Jede Ebene AB , die gegen eine § 36.
wagerechte AC geneigt ist, heißt schiefe Ebene. Ist $AB=1$ ihre Länge,
dann nennt man das Lot von B auf die wagerechte Ebene die Höhe und
 AC die Basis. Man wendet die schiefe Ebene meist an, um schwere Körper
von ihrem Ort nach einem höher oder tiefer gelegenen Orte zu schaffen.

Soll ein Körper ohne Anwendung einer besonderen Vorrichtung lotrecht gehoben werden, so muß die anzuwendende Kraft gleich der Schwerkraft des Körpers sein (§ 22 a); wird er aber auf der schiefen Ebene in die Höhe bewegt, so ist die bewegende Kraft kleiner als die Schwerkraft des Körpers.

Fig. 46.



a) In der Figur 47 beude K den Schwerpunkt eines Körpers von der Masse m , seine Schwerkraft $Q = mg$ werde der Größe und Richtung nach durch die Vertikale

KM dargestellt. Wir zerlegen KM senkrecht und parallel AB in die Kräfte $KN = mg \cos \alpha$ und $KL = mg \sin \alpha$.

Dann mißt KN den Druck des Körpers auf die schiefe Ebene, der durch einen gleich großen Gegendruck aufgehoben wird. Bewegend wirkt allein die Komponente $KL = mg \sin \alpha$. Sie würde die Masse m mit der

Fig. 47.

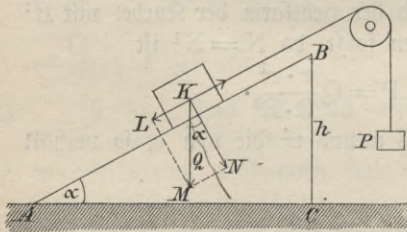
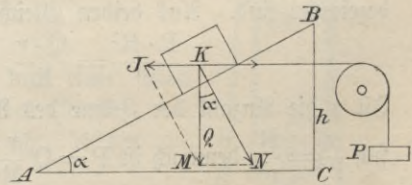


Fig. 48.



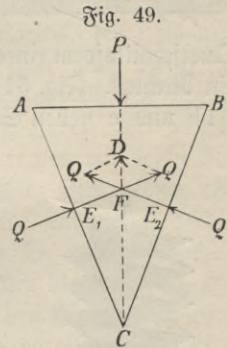
Beschleunigung $g \sin \alpha$ (vergl. § 14) herabtreiben, wenn nicht eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Kraft $P = Q \sin \alpha = Q \frac{h}{l}$ ihre Wirkung aufhebt. Wir schließen also: Wenn die parallel der schiefen Ebene wirkende Kraft sich zur Last wie die Höhe zur Länge der schiefen Ebene verhält, so sind Kraft und Last im Gleichgewicht.

b) Soll der Körper K durch eine parallel der Basis wirkende Kraft P im Gleichgewicht erhalten werden, so muß $P = Q \tan \alpha = Q \cdot \frac{h}{b}$ sein. Denn zerlegt man KM (Fig. 48) senkrecht AB und parallel AC in die Seitenkräfte KN und KJ , so muß P gleich und entgegengesetzt KJ , also gleich $Q \tan \alpha$ sein. — Wir können diese Gesetze durch den Versuch bestätigen, wenn wir an dem Körper in der aus den Figuren 47 und 48 ersichtlichen Weise ein Gewichtstück $P = Q \frac{h}{l}$ oder $P = Q \frac{h}{b}$ ziehen lassen.

Aufgaben. Welches ist die Gleichgewichtsbedingung, wenn die Krafrichtung von P mit der Basis der schiefen Ebene den Winkel β bildet? Wie kann man diese Bedingung mit Hilfe der Gleichungen $p_1 : p_2 : p_3 = \sin \alpha_1 : \sin \alpha_2 : \sin \alpha_3$ (s. § 23 b) ableiten?

§ 37. Der Keil ist ein gerades, dreiseitiges Prisma, dessen Grund- § 37.
flächen gewöhnlich gleichschenklige Dreiecke sind. Der Schenkel eines solchen Dreiecks heißt Seite, seine Grundlinie Rücken des Keils.

Versucht man einen Keil ABC (Fig. 49) durch eine Kraft P , die senkrecht auf den Rücken AB wirkt, in einen Körper, z. B. ein Holzstück, hineinzutreiben, so muß man erstens den Widerstand überwinden, der durch die Festigkeit der auseinander zu reißenden Teile hervorgerufen wird, und zweitens die meist sehr beträchtliche Reibung, die an den aufeinander gleitenden Flächen auftritt. Der erste Teil des Widerstandes wirkt senkrecht zu den Seiten des Keils und läßt sich durch zwei in den Punkten E_1 und E_2 angreifende Druckkräfte Q darstellen, deren Richtungen sich in einem Punkte F der Mittellinie schneiden. Wir denken uns nun den Angriffspunkt von Q nach F verschoben und nach dem Parallelogrammgesetze den resultierenden Druck D konstruiert. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke



folgt dann $\frac{D}{Q} = \frac{AB}{AC}$. Wäre also keine Reibung vorhanden, so müßte

für den Fall des Gleichgewichts $P = D$, demnach $\frac{P}{Q} = \frac{AB}{AC}$ sein.

Alle schneidenden Instrumente sind Keile, z. B. das Messer, die Schere, der Hobel, das Stemmeisen, das Beil. Bei den meisten bildet die Schneide wieder einen Keil für sich. Wozu dieser zweite Keil? Warum nimmt man zum Holzspalten eine Art, deren Schneide einen ziemlich stumpfen Keil bildet, zum Kleinhauen aber eine Art mit sehr spitzem Keile? Warum zieht man beim Schneiden mit einem Messer dasselbe wie eine Säge über den zu schneidenden Gegenstand hin? Warum gebraucht man zum Schleifen

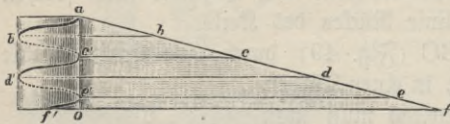
eines Tischmessers, eines Federmessers und eines Barbiermessers verschiedene Arten von Schleifsteinen? Wie unterscheiden sich gröbere Schleifsteine von feineren? Auch der Nagel, der Pfriemen, die Nadel sind Keile.

§ 38.

§ 38. **Die Schraube.** Die Schraube besteht aus zwei Theilen, der Schraubenspindel und der Schraubenmutter. Die Schraubenspindel ist ein gerader Zylinder mit einer sich an seinem Umfange herumwindenden Erhöhung. Die Richtung dieser Erhöhung wird durch die Hypotenuse eines um den Zylinder gelegten rechtwinkligen Dreiecks angegeben, dessen eine Kathete gleich der Peripherie der Zylindergrundfläche ist und dessen andere Kathete die Richtung der Achse hat.

Die Hypotenuse bildet einen Schraubengang; durch mehrere Schraubengänge entsteht die Schraubenlinie. Die der Spindelachse parallele Kathete ist die Höhe des Schraubenganges (Fig. 50). Die Schraubenmutter ist ein Körper mit zylindrischer Öffnung, in deren Wände eine spiralförmige Vertiefung eingeschnitten ist, in welche die Erhöhung der

Fig. 50.



Schraubenspindel paßt. Je nachdem die Schraube als Befestigungsmittel oder als Bewegungsmechanismus dienen soll, benutzt man scharf- oder flachgängige Schrauben. Bei jenen ist die

Querschnittsform eines Gewindeganges ein gleichschenkliges Dreieck, bei diesen ein Rechteck. Fig. 51 a ist eine scharfgängige Schraubenspindel, die Figuren 51 b und c stellen Spindel und Mutter einer flachgängigen Schraube dar.

Fig. 51.



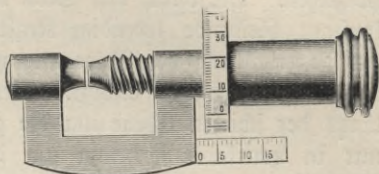
Steht die Mutter fest, wie bei der Schraubenpresse und der Schraubwinde, so kann man die Spindel durch eine an ihrem Umfang tangential wirkende Kraft nach der einen oder anderen Richtung bewegen und dadurch einen in der Richtung der Spindelachse wirkenden Widerstand überwinden, z. B. einen Körper zusammenpressen oder eine Last heben. Für den Fall des

Gleichgewichts muß nach dem Gesetz b § 36 $P = \frac{h}{U} \cdot Q$ sein, wo P die

Kraft, Q die Last, h die Höhe des Schraubenganges und U den Umfang der Spindel bezeichnet. — Die Kraft greift meistens nicht am Umfange der Spindel direkt an, sondern an einem senkrecht zu ihrer Achse befestigten Hebel. Ist R dessen Arm, so hat man für U den Wert $2R\pi$ zu setzen.

Schrauben von geringer Ganghöhe benutzt man zur genauen Einstellung von Apparaten (Stellschraube) und zur Messung kleiner Größen (Mikrometerschraube). Die Fig. 52 stellt eine Schraubenleere vor zur Bestimmung von Drahtdurchmessern usw. Beträgt wie hier die Ganghöhe 1 mm, so kann man auf der Trommel noch 0,01 mm ablesen.

Fig. 52.



3. Satz von der Erhaltung der Arbeit, Prinzip der virtuellen Verschiebungen.

§ 39. Die beschriebenen mechanischen Vorrichtungen dienen meistens § 39. dazu, große Widerstände mit verhältnismäßig kleinen Kräften zu überwinden. Auf den ersten Blick erscheint diese Möglichkeit überraschend. Wenn ein einziger Arbeiter vermittelt eines Flaschenzuges eine Last von vielleicht 1000 Ziegeln vom Erdboden mehrere Stock hoch hebt, so setzt das häufig die Zuschauer in Erstaunen. Niemand wundert sich jedoch darüber, wenn der Arbeiter die gleiche Leistung vollbringt, indem er 100-mal denselben Weg macht, jedesmal aber nur 10 Ziegeln direkt hinaufträgt. Die Anwendung einer Maschine bietet den Vorteil, die Last auf einmal zu heben, der Nachteil des längeren Weges aber wird durch sie nicht aufgehoben. Wenn wir eine große Last auf einer schiefen Ebene emporziehen, wenn wir sie mit einem gewöhnlichen Hebel, mit einem Flaschenzuge, mit einer Schraubenwinde heben, so machen wir leicht die Beobachtung, daß der von der Kraft zurückgelegte Weg stets größer als die Hubhöhe der Last ist. Es hat auch meistens keine Schwierigkeit, die Länge der beiden Wege festzustellen. So muß z. B. beim einfachen Flaschenzuge, der aus einer festen und einer beweglichen Rolle besteht, die an dem freien Seilende ziehende Hand des Arbeiters den Weg $2h$ machen, wenn die Last um die Höhe h steigen soll; hat eine parallel der schiefen Ebene wirkende Kraft einen Körper um die Höhe h der schiefen Ebene gehoben, dann ist der Kraftweg gleich der Länge l der schiefen Ebene usw. Wir gelangen so zu der weiteren Erkenntnis, daß das Verhältnis von Kraftweg und Hubhöhe der Last stets gleich ist dem umgekehrten Verhältnis von Kraft und Last, das im Falle des Gleichgewichts bestehen muß. Läßt sich in diesem merkwürdigen Zusammenhange ein allgemeineres Gesetz erkennen? Wenn wir die parallel der schiefen Ebene AB wirkende Zugkraft durch ein Gewichtstück P hervorrufen in der Weise, wie das die Fig. 47 zeigt, so wird die Last Q im Gleichgewicht gehalten, wenn $P = Q \cdot \frac{h}{l}$ ist; der Mechanismus kommt dann von selbst nicht in Bewegung. Erteilen wir aber dem Gewichtstück P durch einen

Anstoß eine Geschwindigkeit nach unten, so genügt nun die Kraft P , um die Last Q auf der reibungslos vorausgesetzten Bahn gleichförmig bergan zu ziehen. Die durch den Stoß verbrauchte Arbeit setzt sich sofort in die konstant bleibende lebendige Kraft der bewegten Massen um, trägt also zur Unterhaltung der Bewegung nichts bei, die lediglich nun auf Grund des Trägheitsgesetzes erfolgt. Wenn P um die Strecke l sinkt, wird Q längs der schiefen Ebene um die gleiche Strecke emporgezogen, steigt aber nur in vertikaler Richtung um die Höhe h . Das Produkt aus dem fallenden Gewicht $P = Q \frac{h}{l}$ und der Falltiefe l ist demnach gleich dem

Produkt aus dem steigenden Gewicht Q und der Steighöhe h . Diese Gesetzmäßigkeit hat bereits Galilei bemerkt und hieraus die Bedingung für das Gleichgewicht am Hebel und auf der schiefen Ebene abgeleitet. Dieselbe Gesetzmäßigkeit beobachten wir stets, sobald ein Körper vermittelt einer Maschine bewegt wird; der mechanische Vorteil ist immer gleich dem mechanischen Nachteil, d. h. in demselben Verhältnis, wie die Kraft kleiner ist als der zu überwindende Widerstand, ist der Weg der Kraft größer als der des Widerstandes. (Goldene Regel der Mechanik.)

Wir messen durch das Produkt Pl die von der Kraft P längs der schiefen Ebene geleistete Arbeit, durch das Produkt $Q \cdot h$ die durch Hebung der Last Q gewonnene Arbeit; beide Arbeiten sind gleich, so daß wir durch die Benützung der schiefen Ebene keine Verminderung der Arbeit erlangen. Dasselbe gilt für jede andere Maschine. Diese Tatsache nennt man **das Gesetz von der Erhaltung der Arbeit**. Es ist eng verwandt mit dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen. Man versteht unter einer virtuellen Verschiebung jede mit der Konstruktion der Maschine verträgliche Bewegung der Angriffspunkte. Drehen wir einen ungleicharmigen Hebel, an dem zwei im Gleichgewicht befindliche Gewichtsstücke hängen, um einen sehr kleinen Winkel, so verhalten sich die Verschiebungen der Angriffspunkte in der Richtung der Kräfte wie die Hebelarme, also umgekehrt wie die Kräfte. Die durch das Sinken des einen Gewichtsstücks verbrauchte Arbeit ist somit gleich der, die durch das Heben der anderen gewonnen wird, die gesamte Arbeit ist also Null, und es leuchtet ein, daß deshalb das System von selbst nicht in Bewegung geraten kann, daß es im Gleichgewicht sein muß. Wir können die erlangte Erkenntnis so aussprechen:

Eine Maschine ist im Gleichgewicht, wenn bei einer virtuellen Verschiebung die algebraische Summe der Arbeiten Null ist. (Prinzip der virtuellen Verschiebungen.)

Die Gesetze für das Gleichgewicht an Maschinen werden hierdurch auf die Gesetze der Bewegung zurückgeführt.

Aufgabe. Aus dem Gesetz von der Erhaltung der Arbeit soll die Gleichgewichtsbedingung für das Wellrad, die Schraubenwinde, den gewöhnlichen und den Differentialflaschenzug abgeleitet werden.

§ 40. **Satz von der Erhaltung der Energie.** Wenn wir eine § 40. im Gleichgewicht befindliche Maschine nicht durch einen Anstoß, sondern durch ein Übergewicht in Gang bringen, so ist die Bewegung gleichförmig beschleunigt. Ein einfaches Beispiel bietet die Atwoodsche Fallmaschine. Bei Beginn eines Versuches steht das eine Gewichtsstück q , auf dem das Übergewicht p liegt, auf einer Klappe, das andere Gewichtsstück q hängt frei herab. Schlagen wir die Klappe herunter, dann erteilt das Übergewicht p den beweglichen Massen M die Beschleunigung $a = \frac{p}{M}$ und diese erlangen nach Zurücklegung eines Weges h die Geschwindigkeit $v = \sqrt{2 ah} = \sqrt{2 \frac{p}{M} h}$, besitzen also dann in Form von lebendiger Kraft einen Arbeits-

vorrat $\frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} M 2 \frac{p}{M} h = ph$. (Vergl. § 22 c.) Dadurch, daß $q + p$ um die Strecke h sinkt, wird eine Arbeit $(q + p)h$ verbraucht, während durch das Steigen des Gegengewichtes q die Arbeit qh gewonnen wird. Das Mehr ph an verbrauchter Arbeit hat sich also in die gleich große lebendige Kraft der bewegten Massen umgesetzt, so daß an Arbeitsfähigkeit bei dem ganzen Vorgange nichts gewonnen und nichts verloren wird.

Man nennt die Fähigkeit, Arbeit zu leisten, auch Energie. Der Arbeitsvorrat, der in einer gehobenen Last, einer gespannten Feder, einem zusammengedrückten Gase gleichsam aufgespeichert ist, wird als Energie der Lage oder potentielle Energie bezeichnet, während man den Arbeitsvorrat, den ein bewegter Körper vermöge seiner lebendigen Kraft besitzt, Energie der Bewegung oder kinetische Energie nennt.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß alle mechanischen Vorgänge nur Übergänge einer Energieform in die andere darstellen, wobei die Summe der potentiellen und kinetischen Energie unveränderlich bleibt, nämlich gleich der ursprünglich vorhandenen Energie. Ein mit der Geschwindigkeit c schräg in die Höhe geworfener Körper von der Masse m besitzt am Anfange der Bewegung die kinetische Energie $\frac{1}{2} m c^2$. In der beliebigen Höhe h über dem Ausgangspunkte ist seine Geschwindigkeit nur noch $v = \sqrt{c^2 - 2gh}$ (s. § 8c und § 15). Dabei ist es gleichgültig, unter welchem Erhebungswinkel der Körper geworfen wurde und in welcher Zeit er um die Strecke h aufstieg, denn der Ausdruck für v ist von diesen Größen unabhängig. Die kinetische Energie des Körpers in der Höhe h ist nun $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m c^2 - mgh$, sie ist also um mgh kleiner geworden, d. h. um dieselbe Größe, die an potentieller Energie durch Hebung der Masse m auf die Höhe h gewonnen wurde, so daß die Gesamtenergie dieselbe geblieben ist.

Aufgabe. An dem gewöhnlichen Flaschenzuge, der aus einer beweglichen und einer festen Rolle besteht, halten sich die angehängten Gewichtsstücke Q und $\frac{Q}{2}$ im Gleichgewicht. Auf $\frac{Q}{2}$ wird das Übergewicht P gelegt. Man soll mit Hilfe

des Energiesatzes die Beschleunigungen der Gewichtsstücke bestimmen. Von der Masse der Rollen ist abzusehen.

C. Drehbewegungen um eine feste Achse.

1. Gleichförmige Drehungen.

§ 41. § 41. Die einzelnen Massenpunkte eines starren Körpers, der gleichförmig um eine feste Achse gedreht wird, durchlaufen gleichförmig feste Kreisbahnen. Beträgt die Dauer einer Umdrehung t Sek., so legt ein Punkt, der r cm von der Achse entfernt ist, in 1 Sek. den Bogen $\frac{2r\pi}{t}$ [cm sec⁻¹] zurück. Dieser Bogen mißt die Geschwindigkeit v jenes Punktes. Für $r=1$ cm beträgt diese Geschwindigkeit $\frac{2\pi}{t}$. Der zu dem Bogen von der Länge $\frac{2\pi}{t}$ gehörige Zentriwinkel ist für alle Massenpunkte derselbe, er gibt die Drehung an, die der Körper in 1 Sek. erfährt. Man nennt deshalb den Bogen, den ein Punkt in der Entfernung eins von der Drehachse in der Zeiteinheit beschreibt, die Winkelgeschwindigkeit des sich drehenden Körpers. Bezeichnen wir sie mit ω , so ist $v=r\omega$ die Geschwindigkeit eines Punktes im Abstände r und $\omega = \frac{v}{r}$ (Dimension t^{-1}).

Die lebendige Kraft eines materiellen Punktes von der Masse m und der Geschwindigkeit v ist $\frac{1}{2}mv^2$. Die lebendige Kraft des ganzen sich drehenden Körpers muß gleich der Summe der lebendigen Kräfte aller einzelnen Massenpunkte sein, also ist

$$A = \frac{1}{2} m_1 r_1^2 \omega^2 + \frac{1}{2} m_2 r_2^2 \omega^2 + \dots = \frac{\omega^2}{2} \sum m r^2 = \frac{\omega^2}{2} T.$$

Eine Masse μ in der Entfernung eins von der Drehachse hat bei gleicher Winkelgeschwindigkeit dieselbe Bewegungsenergie, wenn $\mu = \sum m r^2$ ist. Kennt man also für einen Körper die Größe $\sum m r^2$, so läßt sich seine durch die Drehung hervorgerufene Arbeitsfähigkeit wie die eines einzigen Massenpunktes bestimmen. Die hierdurch erzielte Vereinfachung der Betrachtung verdanken wir Huygens, der den Ausdruck $\sum m r^2$ (Dimension cm²gr) bei seinen Untersuchungen über das zusammengesetzte Pendel in die Physik eingeführt hat. Nach Euler nennt man die Größe $\sum m r^2$ das Trägheitsmoment eines Körpers.

2. Ungleichförmige Drehungen.

§ 42. § 42. Ist die Winkelgeschwindigkeit ω nicht konstant, so heißt die Drehbewegung gleichförmig beschleunigt oder verzögert, wenn ω in gleichen Zeiten um gleich viel zu- oder abnimmt. Unter Winkelbeschleunigung versteht man dann die Zunahme der Winkelgeschwindigkeit in der Zeiteinheit. Bei einem Körper, der sich mit der Winkelbeschleunigung β (Dimension t^{-2})

um eine feste Achse dreht, bewegt sich jeder in der Entfernung r von der Achse befindliche Massenpunkt gleichförmig beschleunigt auf einem Kreise, und seine Geschwindigkeit nimmt in jeder Sekunde um $r\beta$ zu, es ist also $r\beta$ die tangential gerichtete Peripheriebeschleunigung des Punktes und $mr\beta$ die tangentiale Kraft, die dem Punkte von der Masse m die Beschleunigung $r\beta$ erteilt. Das Drehungsmoment $mr^2\beta$ dieser Kraft können wir durch irgend eine an dem Hebelarm l wirkende Kraft K hervorrufen, sofern nur $Kl = mr^2\beta$ ist. Um sämtlichen Massenpunkten des Körpers die entsprechenden Beschleunigungen zu erteilen, ist ein Drehungsmoment gleich $m_1r_1^2\beta + m_2r_2^2\beta + \dots = \beta \Sigma mr^2 = \beta T$ nötig. Sind $k_1, k_2 \dots$ die Kräfte, die, an den Hebelarmen $l_1, l_2 \dots$ angreifend, dem Körper die Winkelbeschleunigung β erteilen, so muß also

$$\Sigma kl = \beta T, \text{ demnach } \beta = \frac{\Sigma kl}{T} = \frac{\text{Kraftmoment}}{\text{Trägheitsmoment}} \text{ sein.}$$

Zu dem gleichen Resultat gelangt man, wenn ein Körper ungleichförmig beschleunigt um eine feste Achse gedreht wird, da für ein beliebig kleines Zeitteilchen die Bewegung als gleichförmig beschleunigt angesehen werden darf. In der Gleichung $\beta = \frac{\Sigma kl}{T}$ stellt dann β die Winkelbeschleunigung für einen bestimmten Zeitelement dar, ist also eine mit der Zeit veränderliche Größe. Das Trägheitsmoment dagegen ist stets konstant, solange die Verteilung der Massenpunkte um die Drehachse dieselbe bleibt. —

Um den Gang einer Maschine möglichst gleichförmig zu machen, versieht man sie mit einem Schwungrad, das wie ein Energiesammler wirkt. Je größer sein Trägheitsmoment ist, desto weniger Einfluß haben die Hindernisse der Bewegung und die Unregelmäßigkeiten der Triebkraft auf die Geschwindigkeit des Rades. Daher gibt man ihm einen möglichst großen Radius und eine möglichst große Umfangsmasse. —

Der Seiltänzer benutzt das Trägheitsmoment der Bleistücke, die an den Enden der Balancierstange angebracht sind, um sich im Gleichgewicht zu erhalten; wenn er z. B. nach links schwankt, so drückt er mit der linken Hand auf die Stange nach unten, mit der rechten nach oben, wobei die Stange wegen der Bleistücke fast so wirkt, als wenn sie an den Enden befestigt wäre. — Der Turner hält bei der Rückenwelle die Füße, solange sie im Niederfallen begriffen sind, ausgestreckt, er zieht sie aber zusammen, wenn sie beim Aufsteigen den letzten Quadranten beschreiben. Warum?

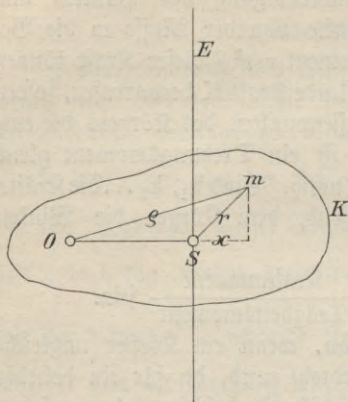
3. Bestimmung von Trägheitsmomenten.

§ 43. Ist T_s das Trägheitsmoment für eine durch den Schwerpunkt § 43. des Körpers gehende Achse, so ist das Trägheitsmoment für irgend eine im Abstände d parallele Achse $T = T_s + Md^2$, wenn M die Masse des Körpers bezeichnet.

In der Fig. 53 sei K der durch den Schwerpunkt S gelegte Körperquerschnitt, der senkrecht zu der durch S gehenden Drehachse steht, dann ist

mr^2 das Trägheitsmoment des Massenpunktes m für diese Achse und das Trägheitsmoment aller Massenpunkte $T_s = \Sigma mr^2$. Für die durch O gehende parallele Achse ist das Trägheitsmoment $T = \Sigma m \rho^2$. Aus dem $\triangle SmO$ folgt $\rho^2 = r^2 + d^2 + 2dx$, mithin $\Sigma m \rho^2 = \Sigma mr^2 + d^2 \Sigma m + 2d \Sigma mx$.

Fig. 53.



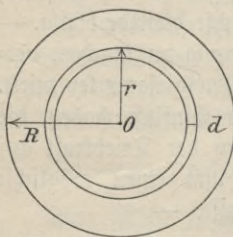
Da die Größen x die Abstände der einzelnen Massenpunkte von der durch den Schwerpunkt S senkrecht zu SO gelegten Ebene E darstellen, so ist $\Sigma mx = 0$ (§ 27). Obige Gleichung geht also über in $\Sigma m \rho^2 = \Sigma mr^2 + d^2 \Sigma m$, d. h.

$$T = T_s + d^2 M.$$

Bei einem dünnen Kreisring können alle Massenpunkte als gleichweit vom Mittelpunkt entfernt angesehen werden. Für eine im Mittelpunkt auf der Ringebene senkrechte Achse ist deshalb das Trägheitsmoment Mr^2 , wo M die ganze Masse

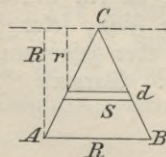
des Ringes bedeutet. Wie unmittelbar einzusehen, ist das Trägheitsmoment eines Hohlzylinders von geringer Wandstärke gleichfalls Mr^2 , wenn seine geometrische Achse die Drehachse ist. Um das Trägheitsmoment einer kreisförmigen Scheibe (Fig. 54) zu bestimmen, die um eine im Mittelpunkt auf ihr senkrechte Achse rotiert, denken wir uns die Kreisfläche gleichmäßig mit Masse so belegt, daß die Flächeneinheit die Masse μ enthält; die Masse der ganzen Scheibe ist dann $M = \pi R^2 \mu$. Denken wir uns ferner die Scheibe in Kreisringe von der unendlich kleinen Breite d zerlegt, so ist die Masse eines Kreisringes $m = 2\pi r d \mu$, sein Trägheitsmoment $mr^2 = 2\pi \mu r^3 d$ und das der ganzen Scheibe $T = 2\pi \mu \Sigma r^3 d$. Wir

Fig. 54.



können auf elementarem Wege den endlichen Wert des Ausdrucks $\Sigma r^3 d$ bestimmen, wenn wir einen geraden Kreiskegel ABC (Fig. 55), dessen Höhe gleich dem Grundflächendurchmesser R ist, in Schichten von der unendlich kleinen Dicke d parallel der Grundfläche zerlegen. Der Schwerpunktsabstand $OS = \frac{3}{4}R$ ist dann nach

Fig. 55.



§ 27 gleich $\frac{\pi \Sigma r^3 d}{\frac{1}{3} R^3 \pi}$, also $\Sigma r^3 d = \frac{R^4}{4}$, und das gesuchte

Trägheitsmoment der Kreisfläche $T = 2\pi \mu \frac{R^4}{4} = \frac{MR^2}{2}$.

Da ein gerader Kreiszylinder, z. B. eine Welle, sich in kongruente Kreisscheiben zerlegen läßt, so ist sein Trägheitsmoment in bezug auf die geometrische Achse ebenfalls $\frac{MR^2}{2}$.

In ähnlicher Weise findet man das Trägheitsmoment einer geraden Stange, deren Länge l ist, für eine senkrecht zu ihr durch einen Endpunkt

gelegte Achse gleich $\frac{MI^2}{3}$; für eine rechteckige Platte mit den Seiten a und b gleich $\frac{Mb^2}{3}$, wenn a die Drehachse ist; für ein Dreieck mit der Grundlinie a und der Höhe h gleich $\frac{Mh^2}{6}$, wenn a die Achse ist.

Bei geometrisch weniger einfachen Körpern ist die elementare Berechnung des Trägheitsmomentes meist recht umständlich, und für unregelmäßig geformte Körper versagt die Rechnung überhaupt. Die wichtigsten Verfahren zur Ermittlung der Trägheitsmomente beruhen deshalb auf Versuchen. Ein einfaches Beispiel bietet die Atwoodsche Fallmaschine. Um das Trägheitsmoment des Rädchens zu bestimmen, messen wir den in der Zeit t von dem Übergewicht durchfallenen Raum s . Aus der Gleichung $s = \frac{1}{2}at^2$ finden wir dann die Beschleunigung a eines Punktes des Radumfangs. Da das Übergewicht außer seiner eigenen Masse m die der Laufgewichte m_1 und die des Rädchens in Bewegung setzt, so muß $mg = (m + 2m_1 + \mu)a$ sein, wo μ die auf den Radumfang reduzierte Masse des Rädchens bedeutet.

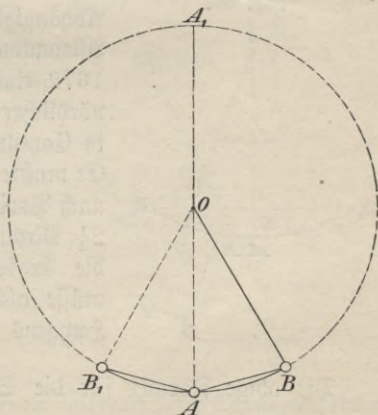
Hieraus folgt $\mu = \frac{mg}{a} - (m + 2m_1)$, das gesuchte Trägheitsmoment ist

also $T = r^2 \left[\frac{mg}{a} - (m + 2m_1) \right]$, wenn r der Halbmesser des Rades ist.

4. Das Pendel.

§ 44. Ein an einer Schnur oder einem Stabe aufgehängter Körper, § 44. der sich ohne merkliche Hindernisse um seinen Aufhängungspunkt drehen läßt, heißt ein Pendel (physisches oder zusammengesetztes Pendel). Die Untersuchung der Pendelgesetze wird dadurch erleichtert, daß man die Schnur oder den Stab als eine schwerlose Linie, den Körper als einen schweren Punkt betrachtet (mathematisches oder einfaches Pendel). Eine kleine Bleikugel an einem dünnen Faden kann mit großer Annäherung als ein derartiges einfaches Pendel angesehen werden. O sei der Befestigungspunkt des Fadens, OA die lotrechte Ruhelage des Pendels (Fig. 56). Wir heben es in die Stellung OB und lassen es los. Der schwere Punkt schwingt dann auf dem Kreisbogen BAB_1 hin und her, und die Bewegung dauert um so länger, je kleiner die Reibung am Aufhängungspunkt und der Einfluß des Luftwiderstandes ist. Allmählich verringert sich die Schwingungsweite,

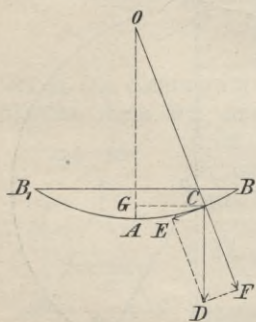
Fig. 56.



trotzdem bleibt die Dauer einer Schwingung, d. h. die Zeit für einen Hin- und Rückgang, merklich dieselbe. Man erkennt dies am besten daran, daß zwei gleich lange Pendel selbst bei verschiedenen Schwingungswerten die gleiche Schwingungsdauer besitzen, sofern nur die von der Pendelkugel durchfallenen Bögen nicht zu groß sind. Die Schwingungsdauer zeigt sich auch unabhängig von der Masse und dem Stoff der Kugeln. Um vom Luftwiderstande möglichst unabhängig zu sein, bringen wir nach dem Vorgange Newtons in gleich große hohle Kugeln verschiedene Substanzen und lassen sie an gleich langen Fäden schwingen. Es macht sich dann kein Unterschied bemerklich. Verändern wir aber die Länge der Pendel, benutzen wir z. B. Aufhängefäden, deren Längen sich wie 1:4:9 verhalten, und zählen die Schwingungen, die jedes Pendel in der gleichen Zeit, etwa 2 Minuten, macht, so finden wir, daß sich die Schwingungsdauern wie 1:2:3 verhalten, also proportional den Quadratwurzeln aus den Pendellängen sind. Diese durch den Versuch gefundenen Gesetze wurden bereits von Galilei richtig erkannt. Eine sehr einfache Überlegung läßt sie voraussagen. Denken wir uns den Fall der Pendelkugel auf dem kleinen Bogen BA ersetzt durch den Fall auf der Sehne BA, so muß die Dauer einer Viertelschwingung gleich sein der Fallzeit auf dem lotrechten Durch-

messer A_1A (§ 14 Aufg. 2), also gleich $2\sqrt{\frac{l}{g}}$, wenn l die Länge des Pendelfadens bezeichnet. Die Dauer einer ganzen Schwingung wäre demnach $8\sqrt{\frac{l}{g}}$, woraus die obigen Gesetze folgen. Der abgeleitete Ausdruck erweitert aber auch unsere Erkenntnis, da er die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Erdbeschleunigung feststellt. Diese Abhängigkeit wurde zuerst von dem französischen Astronomen Richer bemerkt. Als er im Jahre 1672 eine Reise von Paris nach Cayenne (5° nördlicher Breite) machte, ging seine Pendeluhr in Cayenne täglich um $2\frac{1}{2}$ Minute zu langsam. Er mußte daher das Pendel verkürzen. Als er nach Paris zurückkam, ging die Uhr täglich um $2\frac{1}{2}$ Minuten zu schnell. Er schloß daraus, daß die Erdbeschleunigung in Cayenne kleiner sein müsse als in Paris. Den Grund hierfür gab Huygens an (s. § 55).

Fig. 57.



Die obige Formel für die Schwingungsdauer $t = 8\sqrt{\frac{l}{g}}$ kann nur als eine erste Annäherung angesehen werden. Wir erhalten einen viel genaueren Wert durch folgende Betrachtung: Das Pendel befinde sich zu irgend einer Zeit in der Stellung OC (Fig. 57). Da wir von allen Reibungshindernissen absehen, so wirkt auf die Pendelkugel nur die Schwerkraft

$CD = mg$, wo m die Masse der Kugel bedeutet. Die Bewegungsrichtung in C wird durch die Tangente angegeben. Wir zerlegen deshalb CD in eine Komponente CE nach dieser Richtung und eine CF in der dazu senkrechten Richtung.

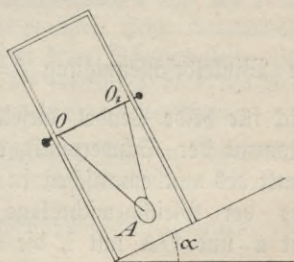
Die Seitenkraft CF spannt nur den Faden, trägt aber zur Bewegung auf dem Kreisbogen nichts bei. Diese Bewegung wird allein durch die Seitenkraft CE bewirkt. Bezeichnen wir den Abstand CG des Punktes C von OA mit x , so folgt aus der Ähnlichkeit der Dreiecke DCE und OCG $CE = \frac{mg}{1} x$. Die pendelnde Bewegung auf dem Bogen BB_1

wird also durch eine Kraft unterhalten, die proportional der Größe x sich verändert. Die Bewegung muß somit von B nach A ungleichförmig beschleunigt, auf dem gleichen Bogen von A nach B_1 ungleichförmig verzögert sein und umgekehrt. Wir projizieren die Bewegung der Pendelkugel auf die horizontale Sehne BB_1 und erhalten dann längs dieser Geraden eine Bewegung, die nach den Entwicklungen des § 10 als eine Sinusschwingung gekennzeichnet ist. Die wirkliche Bewegung auf dem Kreisbogen wird um so genauer als eine derartige Schwingung aufgefaßt werden können, je mehr der Bogen BB_1 sich einer Geraden nähert, je kleiner also die Schwingungsweite AB ist. Die Dauer einer Sinusschwingung war gleich $\frac{2\pi}{\sqrt{q}}$, wo q die Beschleunigung in der Entfernung eins vom Schwingungsmittelpunkt bezeichnete. Aus der Gleichung $CE = \frac{mg}{1} x$ folgt für diese Beschleunigung der Wert $\frac{g}{1}$, somit für die

Schwingungsdauer des mathematischen Pendels $t = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}}$. Diese

Formel ist genau nur richtig für unendlich kleine Schwingungsweiten, es ist aber selbst für Schwingungsbögen bis 10° die Abweichung so gering, daß sie vernachlässigt werden kann¹⁾. Die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Erdbeschleunigung läßt sich an ein und demselben Ort durch ein Wachsches Pendel demonstrieren (Fig. 58). An zwei Stangen OA und O_1A ist der Pendelkörper A befestigt. Die

Fig. 58.



¹⁾ Ein Pendel, dessen Schwingungsdauer für unendlich kleine Schwingungsbögen 1 Sekunde beträgt, hat

bei einem Schwingungsbogen von 4°	die Schwingungsdauer	1,00008	Sek.
" "	" "	6°	" 1,00017 "
" "	" "	8°	" 1,00031 "
" "	" "	10°	" 1,00048 "

Schwingungsachse OO_1 läßt sich gegen die Horizontalebene um einen Winkel α neigen. Es bildet dann die Schwingungsebene mit der Vertikal-ebene denselben Winkel. Statt der Beschleunigung g ist deshalb die Komponente $g \cos \alpha$ zu setzen, und die Schwingungsdauer zeigt sich im Verhältnis von $1 : \sqrt{\cos \alpha}$ vergrößert. Statt der Machschen Vorrichtung kann man ein Metronom benutzen, das man auf eine schiefe Ebene stellt.

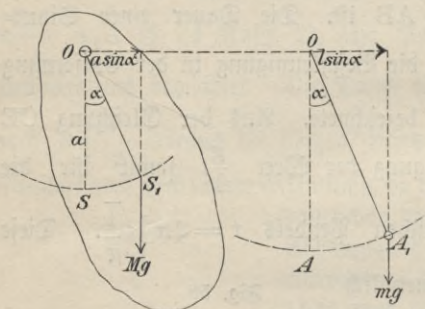
Ein Pendel, das in 1 Sek. eine halbe Schwingung vollendet, heißt ein Sekundenpendel. Bestimmt man für irgend einen Ort mit Hilfe eines angenähert mathematischen Pendels durch Versuche seine Länge l_1 , so findet man die Erdbeschleunigung des Beobachtungsortes aus der Gleichung $g = \pi^2 l_1$. Eine möglichst genaue Kenntnis von g ist für die Physik von großem Wert; die Aufgabe, die Länge des Sekundenpendels für einen Ort zu ermitteln, ist deshalb sehr wichtig.

5. Das physische Pendel.

§ 45.

§ 45. Ein Körper, der um eine horizontale, nicht durch den Schwerpunkt S gehende Achse O leicht drehbar ist, stellt sich von selbst

Fig. 59.



so ein, daß der Schwerpunkt senkrecht unter O liegt (Fig. 59). Heben wir den Schwerpunkt und lassen den Körper los, so vollführt er Schwingungen um die Drehachse von einer bestimmten Dauer t . Wir setzen gleichzeitig mit ihm ein mathematisches Pendel in Gang von der gleichen Schwingungsdauer und erteilen diesem auch dieselbe Schwingungsweite. Dann muß

die Winkelbeschleunigung $\beta = \frac{\text{Kraftmoment}}{\text{Trägheitsmoment}}$ (§ 42) in jedem Augen-

blick für beide Pendel dieselbe sein. Befindet sich in einem bestimmten Moment der Schwerpunkt des physischen Pendels in S_1 , der Massenpunkt des mathematischen in A_1 , und bezeichnen wir den Ablenkungswinkel aus der Gleichgewichtslage $SOS_1 = AOA_1$ mit α , den Abstand OS mit a und OA mit l , die Masse der beiden Pendel mit M und m , so wirkt in S_1 die Schwerkraft Mg am Hebelarm $a \sin \alpha$, in A_1 die Schwerkraft mg am Hebelarm $l \sin \alpha$, die Kraftmomente sind also $Mga \sin \alpha$ und $mg l \sin \alpha$. Daß auf die Drehachse O bezogene Trägheitsmoment des mathematischen Pendels ist ml^2 , das des physischen sei T_0 , dann ist

$$\beta = \frac{Mga \sin \alpha}{T_0} = \frac{mg l \sin \alpha}{ml^2}, \text{ also } l = \frac{T_0}{Ma}.$$

Da die Schwingungsdauer des mathematischen Pendels $t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ist, so folgt für das physische $t = 2\pi \sqrt{\frac{T_0}{Mga}}$. Man nennt die Größe Mga die Direktionskraft (Dimension $\text{cm}^2 \text{gr sec}^{-2}$). Mit $\sin a$ multipliziert, stellt sie das Kraftmoment für den Ablenkungswinkel a dar. Wir bezeichnen sie mit D . Die Gleichung $t = 2\pi \sqrt{\frac{T_0}{D}}$ gilt dann für jeden schwingenden Körper, welches auch die Ursache der Direktionskraft sein mag (Magnetnadel). Die Größe $l = \frac{T_0}{Ma}$ heißt die reduzierte Pendellänge, man versteht also darunter die Länge desjenigen mathematischen Pendels, das mit dem physischen isochron schwingt.

Die Schwingungsdauer eines Pendels kann man dadurch sehr genau ermitteln, daß man die Anzahl der Schwingungen in einer bestimmten Zeit, z. B. 2 Minuten, zählt. Würde man also noch l kennen, so wäre damit durch die Gleichung $t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ die wichtige Größe g bekannt. Denken wir uns die reduzierte Pendellänge l auf OS von O aus nach unten abgetragen, so erhält man einen Punkt, der für sich allein um O schwingend, dieselbe Schwingungsdauer besitzt wie in Verbindung mit den übrigen Massenpunkten des Pendels. Man hat ihn den Schwingungsmittelpunkt genannt. Die Aufgabe, den Schwingungsmittelpunkt eines physischen Pendels zu bestimmen, hat zuerst Huygens (1673) vollständig gelöst.

Setzen wir in der Gleichung $l = \frac{T_0}{Ma}$ für T_0 den Wert $T_s + Ma^2$, so geht sie über in $l = \frac{T_s}{Ma} + a$. Die Bestimmung von l setzt also voraus, daß man die Masse des Pendels, den Schwerpunktsabstand a von der Drehachse und das Trägheitsmoment, bezogen auf die parallele Schwerpunktsachse, kennt. Die ersten beiden Größen zu finden bietet keine Schwierigkeit. Zur Bestimmung des Trägheitsmomentes kann man die Rechnung oder den Versuch benutzen, wie wir dies bereits im § 43 auseinandergesetzt haben.

Man hat noch einen anderen Weg eingeschlagen, der in bequemerer Weise die Länge des Sekundenpendels finden läßt. Aus der Gleichung

$$l = \frac{T_s}{M \cdot a} + a$$

folgt für den Abstand des Schwingungsmittelpunktes vom Schwerpunkt der Wert $a_1 = \frac{T_s}{M \cdot a}$. Wird das Pendel an einer Achse aufgehängt, die durch den Schwingungsmittelpunkt parallel der ursprünglichen Achse geht, so ist für diesen Fall die reduzierte Pendellänge

$$l_1 = \frac{T_s}{M \cdot a_1} + a_1 = a + \frac{T_s}{M \cdot a} = l, \text{ d. h.}$$

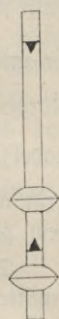
die Schwingungsdauer eines Pendels ändert sich nicht, wenn man

Die ursprüngliche Achse mit der durch den Schwingungsmittelpunkt gelegten parallelen Achse vertauscht.

Aufgabe. Welches sind die geometrischen Orte für alle Drehachsen, um die das Pendel gleich schnell schwingt? Wann fallen diese Orte zusammen, und warum ist dann die Schwingungsdauer ein Minimum?

§ 45 a. § 45 a. Reversionsspendel. Auf der soeben abgeleiteten, Fig. 60.

zweiten merkwürdigen Eigenschaft des Schwingungsmittelpunktes beruht die Anwendung des Reversionsspendels zur Bestimmung der Länge des Sekundenpendels (Bohnenberger 1811, Kater 1818). Eine Pendelstange ist mit zwei einander zugekehrten Schneiden und zwei schweren linsenförmigen Körpern versehen, wie es die Fig. 60 zeigt. Durch Verschieben der Linsen kann man es leicht dahin bringen, daß das Pendel dieselbe Schwingungsdauer besitzt, ob es an der einen oder anderen Schneide aufgehängt wird. Der Abstand der beiden Schneiden ist dann die reduzierte Länge eines Pendels, dessen Schwingungsdauer man durch den Versuch ermittelt.



Aufgabe. Warum sind die Linsen unsymmetrisch zu den Drehachsen angebracht?

§ 45 b. § 45 b. Erdbeschleunigung für verschiedene Orte. Mit Hilfe der angegebenen Methoden hat man die Länge des Sekundenpendels sehr genau bestimmt und abhängig gefunden von der geographischen Breite und der Höhe des Beobachtungsortes. Unter 45° Breite und im Meeresniveau ist $l = 99,355$ cm, am Äquator $= 99,098$ cm. Hieraus folgt für die Erdbeschleunigung $g_{45} = 980,6$ cm sec $^{-2}$, $g_0 = 978,06$ cm sec $^{-2}$.

Aufgabe. Nach Bessel beträgt die Länge des Sekundenpendels in Berlin 99,428 cm. Wie groß ist die Erdbeschleunigung für Berlin? Richers astronomische Uhr blieb in Cayenne innerhalb 24 Stunden um 128 Sekunden zurück. Um wieviel mußte er das Sekundenpendel der Uhr, das für Paris die Länge 99,38 cm hatte, verkürzen, damit es in C. Sekunden schlug?

§ 45 c. § 45 c. Bestimmung von Trägheitsmomenten durch Schwingungsbeobachtungen.

Die Gleichung $t = 2\pi \sqrt{\frac{T_0}{Mga}}$ kann auch zur Bestimmung von Trägheitsmomenten benutzt werden. Das einfachste Verfahren besteht darin, den Körper für sich allein um eine feste Achse schwingen zu lassen. Ist n die Anzahl der in einer gewissen Zeit τ beobachteten Schwingungen, so folgt

$$T_0 = \frac{\tau^2 Mga}{4n^2\pi^2}.$$

Aufgaben. Eine homogene Kreisscheibe aus Eisenblech vom Radius $R = 20$ cm ist, $a = 18$ cm vom Mittelpunkt entfernt, an einer Schneide aufgehängt. Sie vollführt in $\tau = 3$ Minuten 4 Sekunden $n = 170$ Schwingungen. Wie groß ist ihr Trägheitsmoment, bezogen auf die zur Drehachse parallele Schwerpunktsachse, wenn die Masse 900 Gramm beträgt? Wo liegt der Schwingungsmittelpunkt der Scheibe? Warum darf die Drehachse nicht durch den Schwerpunkt gehen?

Eine zweite Methode zur Bestimmung von Trägheitsmomenten durch Pendelbeobachtungen besteht darin, daß man den Körper mit einem Pendel von bekanntem

Trägheitsmoment fest verbindet. Benutzt man ein Pendel von möglichst einfacher Form, z. B. eine dünne Holzleiste, so kann man sein Trägheitsmoment für eine beliebige Drehachse leicht durch Rechnung finden. Den Körper befestigt man am besten so, daß die Drehachse durch seinen Schwerpunkt geht. Wir bezeichnen mit T_0 das Trägheitsmoment des Pendels in bezug auf eine Drehachse, die a cm vom Schwerpunkt der Holzleiste entfernt ist, mit T_s das gesuchte Trägheitsmoment des Körpers. Das Pendel allein mache in τ Sekunden n Schwingungen, das belastete Pendel in τ Sekunden n^1 Schwingungen, dann ist

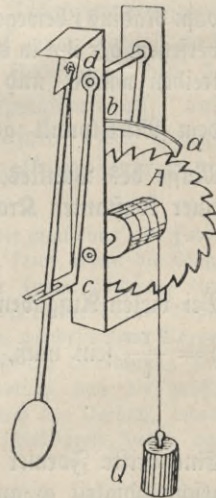
$$\begin{aligned} 1. \quad \frac{\tau}{n} &= 2\pi \sqrt{\frac{T_0}{Mga}} \\ 2. \quad \frac{\tau}{n^1} &= 2\pi \sqrt{\frac{T_0 + T_s}{Mga}} \\ T_s &= T_0 \left(\frac{n^2}{n^1{}^2} - 1 \right). \end{aligned}$$

Aufgabe. Eine dünne, 100 cm lange Holzleiste, deren Masse 90,727 Gramm betrug, wurde, 40 cm von ihrem Schwerpunkt entfernt, an einer Stahlnadel aufgehängt und machte in 230 Sekunden 147 Schwingungen. Als man eine Kreisscheibe aus Eisenblech (siehe die vorhergehende Aufgabe) mit dem Pendel so verbunden hatte, daß die Drehachse durch den Schwerpunkt der Scheibe ging, beobachtete man in derselben Zeit 109 Schwingungen. Wie groß waren die Trägheitsmomente für Leiste und Scheibe? Um wieviel weichen die so gefundenen Werte von den theoretisch berechneten ab?

6. Die Pendeluhr.

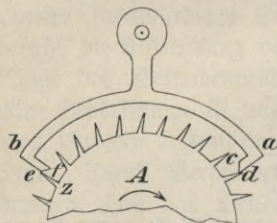
§ 46. Die verbreitetste Anwendung findet das Pendel bei der Uhr. § 46. Mag diese nun durch Gewichte oder Federkraft getrieben werden, stets ist eine Vorrichtung notwendig, um die beschleunigte Bewegung, die durch das Sinken der Gewichte oder die Aufrollung der Feder verursacht wird, in eine gleichförmige zu verwandeln. Die Regulierung des Ganges durch ein Pendel beruht auf der im § 44 auseinandergesetzten Eigenschaft, daß ein Pendel von unveränderlicher Länge seine Schwingungen stets in derselben Zeit ausführt. Galilei war der erste, der den Gedanken faßte, das Pendel zu diesem Zweck zu verwenden. In die Tat umgesetzt hat den Gedanken erst Huygens (1647). Das gezähnte Rad A (Fig. 61) wird mit seiner Welle durch ein Gewicht Q in Bewegung gesetzt, das an einer um die Welle geschlungenen Schnur hängt. Ein sofortiges Ablausen des Gewichtes wird durch den Anker ab verhindert, den das Pendel vermittelt der Gabel cd so bewegt, daß bei jedem Hin- oder Rückgange die beiden Enden a und b abwechselnd in den folgenden Zahn des Rades eingreifen. Das Rad rückt also bei jeder ganzen Schwingung um einen Zahn weiter. Schlägt das Pendel Sekunden, und hat das Rad 30 Zähne, so wird demnach der an der Achse der Welle befestigte Zeiger ein Sekundenzeiger

Fig. 61.



sein. Die Bewegung des Minuten- und Stundenzeigers wird durch Zahnradüberetzung erreicht. Die das Gewicht tragende Schnur ist in Wirklichkeit nicht um die Welle des Rades A gewickelt, da sie dann sehr lang sein müßte, wenn die Uhr z. B. 24 Stunden gehen soll, ohne aufgezo- gen zu werden. Man schlingt sie um die Welle des letzten Rades, durch das die übrigen Räder bewegt werden.

Fig. 62.



Ein für sich allein schwingendes Pendel kommt durch die Reibung und den Luftwiderstand allmählich zur Ruhe. Das Uhrpendel bleibt in dauernder Bewegung, weil bei jedem Aushub des Ankers (Fig. 62) die Spitze eines Zahnes entweder längs der schiefen Ebene ef oder cd der Ankerklauen entlang gleitet, wodurch die linke oder rechte Seite des Ankers gehoben wird. Bei der in der Fig. 62 gezeichneten Stellung ist das Rad frei und dreht sich rechts herum, wie der Pfeil angibt. Dabei schleift die Spitze des Radzahnes z längs ef und erteilt dem nach links schwingenden Pendel einen Antrieb in dieser Bewegungsrichtung.

D. Krümmförmige Bewegungen.

1. Gleichförmige Kreisbewegung.

§ 47. § 47. Nach § 9 muß sich ein materieller Punkt gleichförmig auf einem Kreise vom Radius r bewegen, wenn wir ihm in irgend einem Bahnpunkt einen Stoß ver- setzen, der ihn in der Richtung der Tangente mit der Geschwindigkeit c fort- treiben würde, und wenn wir ihm ferner in jedem Augenblick eine nach dem Mittelpunkt gerichtete Beschleunigung $a = \frac{c^2}{r}$ erteilen. Ist m die Masse des Punktes, so bedarf es zur Hervorrufung der Beschleunigung a einer konstanten Kraft

$$1. K = ma = \frac{m c^2}{r}.$$

Bei vielen Aufgaben ist es vorteilhaft, die Umlaufzeit t einzuführen. Da $c = \frac{2r\pi}{t}$ sein muß, so erhalten wir

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

Eine dritte Formel für K ergibt sich, wenn wir c mit Hilfe der Winkel- geschwindigkeit ω ausdrücken. Es ist $c = r\omega$, also

$$3. K = m r \omega^2.$$

Die Gleichungen 1. 2. 3. gelten für die Kreisbewegung eines mate- riellen Punktes. Einen Körper, dessen Dimensionen klein sind gegen den

Bahnhalbmesser, können wir durch seinen Schwerpunkt ersetzen, in welchem wir uns die Masse konzentriert denken.

Die zur Erhaltung der Kreisbewegung erforderliche Kraft K wird Zentripetalkraft genannt, da sie beständig nach dem Mittelpunkt der Bahn hin gerichtet ist. Die Bewegungsrichtung in jedem Bahnpunkt wird durch die Tangente angegeben. Die Zentripetalkraft besitzt also die charakteristische Eigenschaft, fortwährend senkrecht zur Bewegungsrichtung zu wirken. Die von ihr geleistete Arbeit ist deshalb Null (§ 25). Diese Folgerung steht in Übereinstimmung mit dem Energiesatz, denn die gleichförmig mit der Geschwindigkeit c sich bewegende Masse m behält unverändert ihre kinetische Energie $\frac{1}{2} m c^2$ bei. Die Wirkung der Zentripetalkraft besteht somit lediglich darin, die Bewegungsrichtung des Körpers in jedem Augenblick so abzuändern, daß dieser auf einem Kreise läuft. Hierzu ist nach dem Trägheitsgesetz in der Tat eine Kraftwirkung notwendig, denn jeder Körper sucht nicht nur seine Geschwindigkeit beizubehalten, sondern auch seine augenblickliche Bewegungsrichtung. Jeder Ablenkung von der geradlinigen Bahn setzt er einen Widerstand entgegen, gerade so wie jeder Änderung einer Geschwindigkeit (§ 21). Dieser Trägheitswiderstand ist als Reaktionswirkung der Zentripetalkraft ihr gleich, aber entgegengesetzt gerichtet. Man bezeichnet ihn häufig als Zentrifugalkraft. Dabei muß man sich vor dem Mißverständnis hüten, daß darunter eine Kraft zu verstehen ist, die auf den bewegten Körper wirkt.

§ 47a. Beispiele. 1. Bei der Steinschleuder geht die Wirkung § 47a. der Zentripetalkraft von unserer Hand aus und wird durch den sich spannenden Faden auf den Stein übertragen, dessen zentrifugalen Trägheitswiderstand sie überwindet. Wir empfinden diesen Widerstand als einen radial nach außen gerichteten Zug. Lassen wir das festgehaltene Fadenende los, so hört in demselben Augenblick die Wirkung der Zentripetalkraft auf, und der Stein fliegt in der Richtung der Bahntangente fort. Der Grund hierfür ist nicht eine auf den Stein wirkende Zentrifugalkraft, sondern die von ihm erlangte Geschwindigkeit.

Aufgabe. 1. Welches ist die größte Geschwindigkeit, die man einer am Faden herumgeschwungenen Kugel von 200 Gramm Gewicht erteilen kann, wenn die Länge des in Betracht kommenden Fadens 80 cm beträgt und der Faden höchstens eine Spannung von 0,6 kg aushält? 2. Man hat eine Federwage mittelst eines Bindfadens mit einem $Q = 5$ kg schweren Gewichtsstück zu einem pendelartigen Körper verbunden, der am Ring der Wage aufgehängt ist, und läßt die Vorrichtung mit einem Ausschlagswinkel von α° schwingen. Man zeige theoretisch, daß die größte Fadenspannung $Q(3 - 2 \cos \alpha)$ beträgt und bestätige dies durch den Versuch, indem man unterhalb des Zeigers der Wage einen im Schlitze verschiebbaren Index aus Kork anbringt.

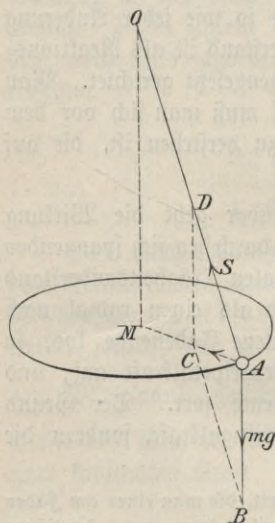
2. Ein Eisenbahnwagen, der eine Kurve durchfährt, hat in jedem Bahnpunkt das Bestreben, sich geradeaus in der Richtung der Tangente zu bewegen. Daran wird er durch die Festigkeit der Schienen gehindert. Der Radflansch der äußeren Räder drückt dabei auf die äußere Schiene

und erfährt von dieser einen gleich großen Gegendruck. Hier liefert also der nach innen gerichtete Gegendruck die zur Erhaltung der Kreisbewegung notwendige Zentripetalkraft.

Aufgabe. Ein Eisenbahnzug soll eine Kurve, deren Krümmungsradius $r = 400$ m ist, mit einer Geschwindigkeit $c = 16$ m sec⁻¹ durchfahren. Die Spurweite beträgt $s = 1,5$ m. Um wieviel müssen die äußeren Schienen gegen die inneren erhöht sein, wenn weder ein nach außen noch nach innen gerichteter Seitendruck auftreten soll? **Ans.** Die Schienen bilden eine Art schiefe Ebene. Man zerlege die Schwerkraft jedes Wagens in eine Komponente, die senkrecht zu jener Fläche steht, und eine horizontale Komponente. Letztere muß gleich der erforderlichen Zentripetalkraft sein. — Welche Richtung zur Bahnebene geben wir unserem Körper, wenn wir uns rasch in einem Kreise bewegen? (Reiter, Schlittschuhläufer, Radfahrer.)

3. Ein einfaches Pendel schwingt in einer Vertikalebene um den Aufhängungspunkt O (Fig. 63). Versetzen wir ihm im Augenblick der größten Abweichung von der Gleichgewichtslage einen Stoß senkrecht zur Schwingungsebene, so können wir es erreichen, daß die Pendelkugel gleichförmig mit der Geschwindigkeit c eine Kreisbahn vom Radius r beschreibt.

Fig. 63.



In jedem Bahnpunkt A wirkt auf die Kugel die Schwerkraft $mg = AB$ und die Spannung des Fadens $S = AD$. Ist die nach dem Mittelpunkt M der Bahn hin gerichtete Resultante $AC = \frac{mc^2}{r}$, also gleich der erforderlichen Zentripetalkraft, so muß die Kugel gleichförmig den Kreis durchlaufen. (Konisches Pendel.)

Aufgabe. Welche Geschwindigkeit muß der Kugel eines $l = 2$ m langen konischen Pendels erteilt werden, damit sie eine Kreisbahn von $r = 30$ cm Halbmesser beschreibt? Wie groß ist die Umlaufszeit? Beweise, daß verschieden lange derartige Pendel, die an demselben Punkte aufgehängt sind, die gleiche Umlaufszeit haben, wenn ihre Kugeln sich in derselben Horizontalebene bewegen.

Die drei betrachteten Beispiele zeigen, daß zentripetale Kraftäußerungen unter sehr verschiedenen Umständen entstehen können. Ob die Kraftwirkung vom Mittelpunkt der Bewegung ausgeht, ist unwesentlich. Gemeinsam dagegen ist allen gleichförmigen Kreisbewegungen eines materiellen Punktes die Bedingung, daß die Resultante der wirksamen Kräfte die Größe $\frac{mc^2}{r}$ hat und nach dem Mittelpunkt der Bahn hin gerichtet ist.

In welcher Weise diese Kraftwirkung zustande kommt, muß in jedem Falle besonders festgestellt werden. Mathematisch kann man dabei stets so

vorgehen, daß man sich an dem materiellen Punkt eine der Zentripetalkraft gleiche und entgegengesetzt gerichtete Kraft angebracht denkt. Diese zentrifugale Hilfskraft muß dann mit den wirklich vorhandenen Kräften, deren Resultante ja die Zentripetalkraft ist, ein Kräftesystem bilden, das die bekannte Gleichgewichtsbedingung erfüllt. Dasselbe Verfahren läßt sich anwenden, wenn der rotierende Körper nicht mehr als materieller Punkt angesehen werden darf. Statt einer Hilfskraft hat man dann an jedem Massenpunkt des Körpers solche zentrifugalen Kräfte hinzuzufügen. Physikalisch sind diese keine reellen, auf den Körper wirkenden Kräfte.

§ 47b. Zentrifugalmaschine. Die durch die Gleichungen $K = \frac{mc^2}{r} = m \frac{4r\pi^2}{t^2} = mr\omega^2$ zum

Ausdruck kommenden Gesetze lassen sich durch Versuche an der Zentrifugalmaschine (Fig. 64) demonstrieren. Eine Achse, die zum Aufstecken verschiedener Vorrichtungen mit einer Hülse versehen ist, kann mittelst eines Schnurlaufes in rasche Umdrehungen versetzt werden. Wir stecken den Apparat Fig. 65 auf, bei dem zwei durch einen Faden verbundene Kugeln auf einem glatten Draht sich leicht verschieben lassen. Verhalten

Fig. 64.

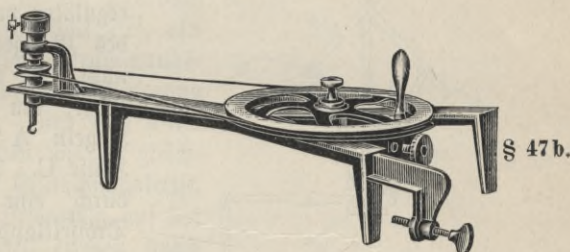


Fig. 65.

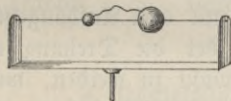
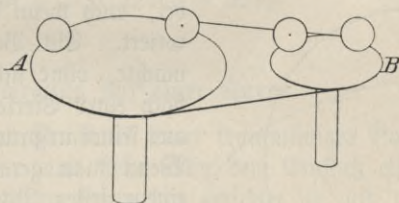


Fig. 66.



sich die Massen m_1 und m_2 der Kugeln umgekehrt wie die Entfernungen r_1 und r_2 von der Drehachse, so halten sich bei Inangabe der Maschinen die Kugeln das Gleichgewicht. Da hier die Umlaufzeit ebenso wie die Winkelgeschwindigkeit dieselbe ist, so folgt

$$m_1 \frac{4r_1\pi^2}{t^2} = m_2 \frac{4r_2\pi^2}{t^2} \text{ und } m_1 r_1 \omega^2 = m_2 r_2 \omega^2, \text{ die zentrifugalen Träg-}$$

heitswiderstände beider Kugeln sind also gleich. — Mit dem Apparat Fig. 66 läßt sich der Satz erläutern, daß bei gleicher Peripheriegeschwindigkeit und gleicher Masse die Zentripetalkraft umgekehrt proportional dem Bahnradius ist. Die größere Scheibe A wird mit ihrer Achse, auf

der sie festsetzt, auf die Schwungmaschine aufgesteckt und in Drehung versetzt. Durch einen Schnurlauf nimmt A die kleinere, lose Scheibe B mit, deren Achse man festklemmt. Beide Scheiben haben an ihrem Rande kleine Vertiefungen zur Aufnahme gleich schwerer Kugeln, denen auf diese Weise dieselbe Bahngeschwindigkeit erteilt wird. Die Kugeln auf der kleineren Scheibe werden zuerst abgeworfen.

Fig. 67.

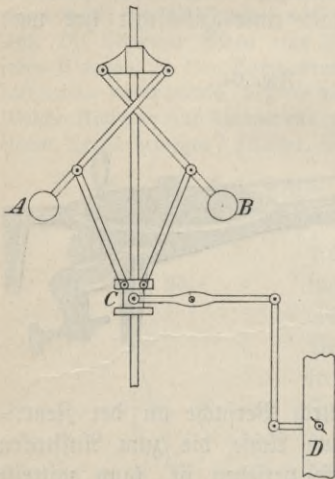
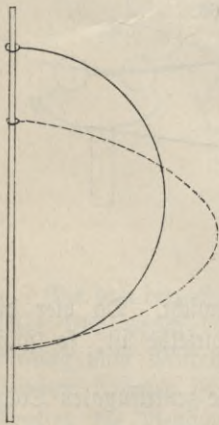


Fig. 67 stellt einen Schwungkugelregulator vor, den man zur Regulierung des Ganges bei Dampfmaschinen benutzt. Je rascher sich die vertikale Achse dreht, um so mehr heben sich die Kugeln A und B und dadurch die Hülse C. Die Bewegung von C wird durch eine Hebelverbindung auf die Drosselklappe D des Dampfrohres übertragen. — Um die Entstehung der Erdatplattung zu veranschaulichen, bedient man sich der Vorrichtung Fig. 68. Ein halbkreisförmig gebogener Messingstreifen ist mit seinem unteren Ende an einer

vertikalen Achse befestigt, während das obere sich längs dieser Achse bewegen kann. In Rotation versetzt nimmt der Streifen die punktierte

Fig. 68.



Lage an. — Hängt man an dem unteren Achsende der Zentrifugalmaschine ein Fadenpendel auf, so behält dieses seine anfängliche Schwingungsebene bei, auch wenn die Achse mit dem Aufhängepunkt rotiert. Ein Beobachter, der die Drehung mitmachte, ohne sich ihrer bewusst zu werden, würde nach einer Viertelumdrehung das Pendel um 90° aus seiner ursprünglichen Ebene herausgedreht sehen. Wenn man gerade über einem Pol der Erde an einem festen Punkt ein Pendel aufhängen könnte, das mehrere Stunden in Bewegung bliebe, und ein Beobachter stellte sich in dessen Schwingungsebene, so würde er wegen der Achsendrehung der Erde nach und nach aus dieser Ebene herauskommen und nach 6 Stunden senkrecht vor der Schwingungsebene stehen. Da er aber die Drehung

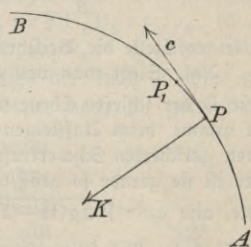
der Erde nicht wahrnimmt, so würde es ihm scheinen, als habe sich die Schwingungsebene des Pendels um 90° , also in 1 Stunde um 15° , von Ost nach West gedreht. Ein Beobachter am Äquator erfährt durch die Erdrotation keine Veränderung seiner Stellung gegen die Schwingungsebene

des Pendels. Für Orte unter der Breite φ läßt sich zeigen, daß die scheinbare Drehung dieser Ebene in 1 Std. $15^\circ \cdot \sin \varphi$ betragen muß, was auch der Versuch bestätigt. (Foucault 1851.)

2. Gleichförmige Bewegung auf einer beliebigen Kurve.

§ 48. Es bewege sich ein Körper gleichförmig auf der Kurve AB § 48. (Fig. 69) und gelange in der Zeit τ von P nach P_1 . Je kleiner τ ist, desto näher liegt P_1 an P, und für ein unendlich kleines τ können wir das Kurvenstück PP_1 als einen Bogen des zu P gehörigen Krümmungskreises ansehen. Die gleichförmige Bewegung auf dem Kurvenelement PP_1 wird also unter denselben Bedingungen stattfinden wie die gleichförmige Bewegung auf dem Krümmungskreise. Deshalb läßt sich auch die Bewegung auf der Kurve AB in jedem Augenblick ersetzen durch eine gleichförmige Bewegung in tangentialer Richtung und eine gleichförmig beschleunigte in der Richtung nach dem jedesmaligen Krümmungsmittelpunkt. Zur Hervorbringung dieser Beschleunigung bedarf es einer Zentripetalkraft, die mit der Lage des Krümmungsmittelpunktes fortwährend ihre Richtung ändert. Dabei bleibt sie aber stets senkrecht zur Bewegungsrichtung und kann die tangentiale Geschwindigkeit nicht abändern. Ihre Größe hängt bei gegebenem m und c gemäß der Gleichung $K = \frac{mc^2}{\rho}$ nur von den Krümmungsradien ρ ab. (Was folgt für $\rho = 0$ und $\rho = \infty$?)

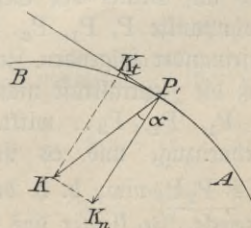
Fig. 69.



3. Ungleichförmige Bewegung auf einer Kurve.

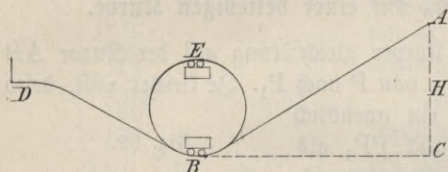
§ 49. Ein Körper habe in dem Punkte P seiner krümmlichen Bahn § 49. AB (Fig. 70) die Geschwindigkeit c und stehe unter dem Einfluß einer Kraft K , die nach der konvexen Seite der Kurve hin gerichtet ist und mit der Normalen in P den Winkel α bildet. Zerlegen wir diese Kraft in die tangentiale und hierzu normale Richtung, so beschleunigt oder verzögert die tangentiale Komponente $K_t = K \sin \alpha$ den Körper in seiner Bewegungsrichtung, ändert also seine Geschwindigkeit ab, während die nach dem Krümmungsmittelpunkt hin wirkende zentripetale Komponente $K_n = K \cos \alpha = \frac{mc^2}{\rho}$ die Bahn des Körpers entsprechend der durchlaufenen Kurve krümmen muß.

Fig. 70.



Aufgabe. Beweise, daß die tangentielle Beschleunigung eines mit der Anfangsgeschwindigkeit c (cm sec^{-1}) horizontal geworfenen Körpers nach t Sekunden gleich $\frac{t \cdot g^2}{\sqrt{c^2 + t^2 \cdot g^2}}$ (cm sec^{-2}) ist (§ 8 b u. c).

Fig. 71.



Bei einer Zentrifugalbahn (Fig. 71) fährt ein Wagen auf Schienen die schiefe Ebene AB hinab und erhält dadurch eine Bewegungsenergie, die ihn befähigt, eine vertikale Kreisbahn vom Radius r zu durchlaufen. Auf der Plattform D kommt er zur Ruhe. Welche Höhe $AC = H$ muß die schiefe Ebene mindestens haben, damit der Wagen

an keiner Stelle die Berührung mit den Schienen verliert?

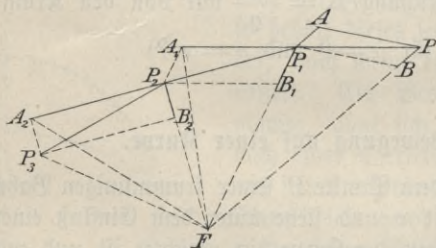
Ans. Sieht man von allen Reibungshindernissen ab, so kommt der Wagen am Fuße B der schiefen Ebene mit der Geschwindigkeit $\sqrt{2gH}$ an. Diese Geschwindigkeit nimmt beim Aufsteigen auf der gekrümmten Bahn ab wegen der senkrecht nach unten gerichteten Schwerkraft mg und hat ihren kleinsten Wert im höchsten Punkte E. Hier ist sie gerade so groß, als wenn der Wagen die Höhe $H - 2r$ frei durchfallen hätte, also $c = \sqrt{2g(H - 2r)}$. Um die Stelle E sicher zu durchfahren, darf der zentrifugale Trägheitswiderstand $\frac{mc^2}{r}$ des Wagens nicht kleiner als mg sein.

4. Allgemeine Zentralbewegung.

§ 50.

§ 50. Der Flächensatz. Wenn bei einer krummlinigen Bewegung eines Körpers in jedem Bahnpunkt P (Fig. 72) eine stets nach demselben

Fig. 72.



festen Punkt F hin gerichtete Kraft auf den Körper wirkt, deren Größe nur von der Entfernung PF, dem Fahrstrahl oder Radiusvektor, abhängt, so nennt man die Bewegung eine Zentralbewegung, die Kraft Zentralkraft. Die Bewegung denkt man sich dadurch eingeleitet, daß dem Körper auf irgend eine Weise eine Anfangsgeschwindigkeit er-

teilt wird, deren Richtung von der der Zentralkraft abweicht. In Fig. 72 sind auf Grund des Gesetzes vom Parallelogramm der Bewegungen die Bahnpunkte P, P_1, P_2, P_3 konstruiert, die der Körper in den gleichen aufeinander folgenden Zeitteilen τ erreicht. Dabei wurde angenommen, daß die Zentralkraft nicht kontinuierlich, sondern stoßweise in den Punkten $P, P_1, P_2, P_3 \dots$ wirkt. Die resultierenden Wege bilden dann einen Sehnenzug, und es ist $\triangle FPP_1 = FP_1A_1 = FP_1P_2 = FP_2A_2 = FP_2P_3$ usw., d. h. der Fahrstrahl bestreicht in gleichen Zeiten gleiche Dreiecke. Je kleiner das Zeitintervall τ gewählt wird, desto genauer schließt

sich der Sehnenzug der wirklichen Bahnkurve an, desto mehr nähert sich die fingierte, stoßweise Wirkung der Zentralkraft der tatsächlich kontinuierlichen.

Da man irgend zwei vom Fahrstrahl in gleichen Zeiten beschriebene Flächen in derartige gleiche Dreiecke FPP_1 , FP_1P_2 , FP_2P_3 usw. zerlegen kann, so erhalten wir den allgemeinen Satz:

Bei jeder Zentralbewegung beschreibt der Fahrstrahl in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

Man kann auch umgekehrt schließen: Wenn bei irgend einer Bewegung der von einem festen Punkt F herkommende Fahrstrahl in gleichen Zeiten gleiche Flächen bestreicht, so wirkt eine nach diesem Punkt F hin gerichtete Zentralkraft auf den Körper. Denn ist $\triangle FPP_1 = FP_1P_2 = \dots$, so ist auch $\triangle FP_1A_1 = FP_1P_2$, mithin P_1B_1 parallel A_1P_2 . Zu der tangentialen Bewegung P_1A_1 im Punkte P_1 muß also die nach F hin gerichtete Bewegung P_1B_1 hinzutreten, damit der Körper nach P_2 gelangt.

Die in 1 Sekunde beschriebene Fläche f (cm^2) nennt man die Flächengeschwindigkeit. Es sei c die Bahngeschwindigkeit in P (Fig. 73). Die in der beliebig kleinen Zeit τ beschriebene Fläche ist $f\tau$. Da diese als ein Dreieck mit der Grundlinie $c\tau$ und der Höhe h gelten kann, wo h die Entfernung des Punktes F von der Bahnrichtung in P bezeichnet, so folgt

$$f\tau = \frac{c\tau h}{2} \quad \text{oder} \quad f = \frac{c \cdot h}{2}$$

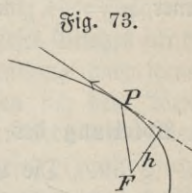


Fig. 73.

Für eine kreisförmige Zentralbewegung ist f und h konstant, also auch c , die Bewegung muß also gleichförmig verlaufen. Umgekehrt ist die Bahn einer gleichförmigen Zentralbewegung notwendig ein Kreis.

5. Die Bahn ist ein Kegelschnitt und die Kraft nach einem Brennpunkt gerichtet.

§ 51. Wir zerlegen nach § 49 die Zentralkraft K tangential und normal in die Komponenten $K_t = K \sin \alpha$ und $K_n = K \cos \alpha$ (Fig. 74). Von diesen muß die tangentielle Kraft K_t die Bahngeschwindigkeit c so abändern, daß der Flächenmaß besteht, während die zentripetale Komponente K_n die Bewegung auf dem Kegelschnitt erhält.

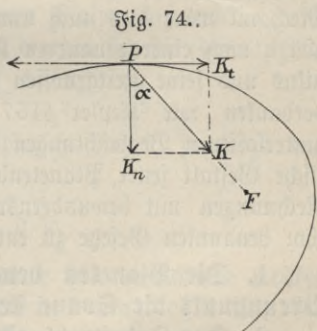


Fig. 74..

§ 51.

Die letztere Bedingung wird erfüllt, wenn $K_n = K \cos \alpha = \frac{mc^2}{\rho}$ ist, ... 1.

und der Flächenmaß liefert die Gleichung $f = \frac{c \cdot h}{2}$ 2.

Durch Elimination von c folgt $K = \frac{4mf^2}{\rho h^2 \cos \alpha}$. . . 3.

Ersetzen wir in 3. h durch $r \cos \alpha$, wo r die Entfernung PF darstellt, und berücksichtigen wir die für alle Kegelschnitte, deren halber Parameter p ist, gültige Beziehung $\rho = \frac{p}{\cos^3 \alpha}$, so ergibt sich

$$K = \frac{4 m f^2}{p} \cdot \frac{1}{r^2} \dots 4.$$

Hiermit ist der Satz erwiesen:

Bewegt sich eine Masse gemäß dem Flächenatz auf einem Kegelschnitt, so muß in jedem Augenblick eine nach dem Brennpunkt hin gerichtete Zentralkraft wirken, deren Größe umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung vom Brennpunkt ist.

Ist die Bahn eine Ellipse und t die Umlaufszeit, so können wir f durch $\frac{\pi ab}{t}$ ersetzen, wenn a und b die Halbachsen bezeichnen. Es ist dann ferner $p = \frac{b^2}{a}$, und wir finden . . . $K = 4 m \pi^2 \frac{a^3}{t^2} \cdot \frac{1}{r^2} \dots 5.$

E. Gravitation.

1. Ableitung des Newtonschen Gesetzes aus den Keplerschen Regeln.

§ 52.

§ 52. Die Lehre des Kopernikus (1543), daß nicht die Erde der Mittelpunkt unseres Planetensystems wäre, sondern die Sonne, um die sich die Erde mit ihrem Mond und alle Planeten in Kreisen herumbewegten, gestattete, die scheinbaren Bewegungen dieser Himmelskörper in ungezwungener Weise aus ihren wirklichen Bewegungen abzuleiten. Sie gab aber keine Erklärung dafür, auf Grund welcher physikalischen Gesetze diese wahren Bewegungen erfolgten. Vom Standpunkt der vorgalileischen Mechanik wäre dies auch unmöglich zu leisten gewesen. Auch bedurfte es hierzu noch einer genaueren Kenntnis der Planetenbahnen, als sie Kopernikus und seine Zeitgenossen hatten. Diesen letzteren wichtigen Fortschritt verdanken wir Kepler (1571—1630). Aus den von Tycho (1601) hinterlassenen Beobachtungen der Marsbewegung gelang es ihm, die elliptische Gestalt jener Planetenbahn zu erkennen und auf Grund mühseliger Rechnungen mit bewundernswertem Scharfblick die drei berühmten, nach ihm benannten Gesetze zu entdecken:

1. Die Planeten bewegen sich in Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

2. Der Fahrstrahl eines Planeten nach der Sonne beschreibt in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Kuben der großen Achsen ihrer Bahnellipsen.

Diese durch sorgfältige Beobachtungen gewonnenen Regeln aus mechanischen Gesetzen zu erklären und so eine Theorie der Planetenbewegungen zu begründen, ist erst dem Genie Newtons gelungen (1686).

Nachdem Huygens für die gleichförmige Kreisbewegung den Ausdruck der zentripetalen Beschleunigung $a = \frac{c^2}{r} = \frac{4r\pi^2}{t^2}$ gefunden hatte, lag es zwar nahe, unter der Voraussetzung kreisförmiger Planetenbahnen mit Hilfe der dritten Keplerschen Regel ein Gesetz für die von der Sonne ausgeübten Anziehungskräfte abzuleiten. Denn sind a_1 und a_2 die Zentripetalbeschleunigungen, die zwei von der Sonne um r_1 und r_2 entfernte Planeten erhalten, so folgt aus $a_1 = \frac{4r_1\pi^2}{t_1^2}$ und $a_2 = \frac{4r_2\pi^2}{t_2^2}$ d. Gl. $\frac{a_1}{a_2} = \frac{r_1 t_2^2}{r_2 t_1^2}$.

Da nach der dritten Keplerschen Regel $\frac{t_2^2}{t_1^2} = \frac{r_2^3}{r_1^3}$ sein muß, so findet man $\frac{a_1}{a_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$, d. h. die von der Sonne erteilten Beschleunigungen verhalten sich

umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen. Verschiedene Zeitgenossen Newtons, wie Wren, Hooke, Halley, haben auch selbständig diese Folgerung gezogen. Sie waren aber nicht imstande, die Gültigkeit dieses Gesetzes für die tatsächlich elliptischen Planetenbahnen nachzuweisen; es entging ihnen ferner, daß jene von der Sonne ausgehenden Kraftäußerungen sich dem Wesen nach nicht unterscheiden von der allen bekannten, auf der Erde beobachteten Schwere. Newton erkannte zunächst in dem Flächengesetz (zweite Regel Keplers) eine für alle Zentralbewegungen maßgebende Beziehung (s. § 50). Er bewies ferner, daß für elliptische Bahnen die nach dem Brennpunkt gerichtete Zentralbeschleunigung $4\pi^2 \frac{a^3}{t^2 r^2}$ sein muß (§ 51₁₅). Für ein

und denselben Planeten verhalten sich demnach die auf ihn wirkenden Zentralkräfte umgekehrt wie die Quadrate seiner Entfernungen von der Sonne. Für zwei verschiedene Planeten, deren Massen m_1 und m_2 und deren Abstände von der Sonne r_1 und r_2 sind, ergeben sich die Zentralkräfte

$$K_1 = \frac{4\pi^2 a_1^3}{t_1^2} \cdot \frac{m_1}{r_1^2} \quad \text{und} \quad K_2 = \frac{4\pi^2 a_2^3}{t_2^2} \cdot \frac{m_2}{r_2^2}.$$

Berücksichtigt man wiederum die dritte Keplersche Regel, so folgt das Newtonsche Anziehungsgesetz:

$$K_1 : K_2 = \frac{m_1}{r_1^2} : \frac{m_2}{r_2^2}, \quad \text{d. h.}$$

Auf zwei Massen werden nach der Sonne hin gerichtete Kräfte ausgeübt, die sich direkt wie diese Massen und umgekehrt wie die Quadrate ihrer Entfernungen von der Sonne verhalten.

2. Allgemeine Massenanziehung.

§ 53. Die größte Leistung Newtons besteht in der Verallgemeinerung, § 53. die er dem Anziehungsgesetz gegeben hat.

Jeder irdische Körper ist schwer. Auf einer Unterlage ruhend, übt er einen Druck auf sie aus, freifallend erfährt er eine Beschleunigung. Es

ist demnach so, als ob die Erde eine vertikal nach unten gerichtete, anziehende Kraft auf jeden Körper ausübt. Wir messen die Größe dieser Kraft im terrestrischen Maßsystem durch das Gewicht des Körpers, das seiner Masse und der Erdbeschleunigung proportional ist. Die Erscheinung der irdischen Schwere ist nicht an die Erdoberfläche gebunden. Sie macht sich im tiefen Schacht eines Bergwerks bemerkbar, wie in den größten Höhen, die bis jetzt erreicht worden sind. Wir schließen deshalb, daß die Erde auch in planetarischen Entfernungen noch anziehende Kraftäußerungen ausübt. Auch in einem Abstände Erde—Mond muß ein Körper auf eine feste Unterlage drücken und, freigelassen, nach der Erde zu fallen beginnen. Die Bewegung des Mondes um die Erde, die rund in 27 Tagen $7\frac{1}{2}$ Stunden erfolgt, kann nahezu als eine gleichförmige Kreisbewegung angesehen werden, deren Mittelpunkt die Erde ist. Nehmen wir für den Abstand Erde—Mond 60 Erdradien an und setzen den Erdumfang $2r\pi = 4 \cdot 10^9$ cm, so würde zur Erhaltung des Mondes in seiner Bahn eine nach der Erde hin gerichtete Zentripetalbeschleunigung von $a = \frac{4 \cdot 60 \cdot r\pi^2}{t^2} = \frac{4\pi \cdot 120 \cdot 10^9}{236^2 \cdot 10^8}$

$= \frac{3\pi}{5,9^2} = 0,27$ [cm sec⁻²] nötig sein. Mit dieser Beschleunigung würde

der Mond anfangen gegen die Erde zu fallen, wenn seine Umlaufbewegung plötzlich gehemmt würde. Wirkt die anziehende Kraft der Erde umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung von ihrem Mittelpunkt, dann muß anderseits die Erdbeschleunigung a in der Entfernung $60r$ sich zur Erdbeschleunigung $g = 981$ [cm sec⁻²] an der Erdoberfläche verhalten wie $r^2 : 3600 r^2$, oder es muß $a = \frac{981}{3600} = 0,27$ [cm sec⁻²] sein. Aus der Über-

einstimmung beider Resultate gewann Newton die Überzeugung, daß es dem Wesen nach dieselbe Kraft ist, die den Stein zur Erde fallen läßt und die Himmelskörper in ihren Bahnen erhält. So gelangte er zur Aufstellung des allgemeinen Gravitationsgesetzes:

Zwei Massenpunkte wirken so aufeinander, als ob sie sich aus der Ferne anzögen mit einer Kraft, die den Massen direkt, den Quadraten der Entfernungen umgekehrt proportional ist.

Das Gesetz läßt sich durch die Gleichung wiedergeben $K = k \frac{mm_1}{r^2}$, wenn k die Kraft bedeutet, mit der zwei Masseneinheiten im Abstände 1 einander anziehen.

Die gegenseitige Anziehung der Sonnenmasse S und einer von ihr um r entfernten Planetenmasse m ist hiernach $K = k \frac{S m}{r^2}$, und zwar erhält der Planet die nach der Sonne gerichtete Beschleunigung $\frac{K}{m} = k \frac{S}{r^2}$, die Sonne die nach dem Planeten gerichtete Beschleunigung $\frac{K}{S} = k \frac{m}{r^2}$. Die relative

Beschleunigung des Planeten in bezug auf die ruhend gedachte Sonne ist deshalb $k \cdot \frac{S+m}{r^2}$. Diese Beschleunigung muß andererseits gleich $\frac{4\pi^2 a^3}{t^2} \cdot \frac{1}{r^2}$ sein (§ 52), woraus folgt $kS = \frac{4\pi^2 a^3}{t^2} \cdot \frac{S}{S+m}$. Da kS die konstante Kraft bedeutet, die die Sonne auf die Masseneinheit im Abstände 1 ausübt, so hat für alle Planetenbahnen der Ausdruck $\frac{a^3}{t^2} \frac{S}{S+m}$ und nicht, wie Kepler annahm, $\frac{a^3}{t^2}$ einen unveränderlichen Wert. Nur weil der Quotient $\frac{S}{S+m}$ tatsächlich sehr wenig von eins verschieden ist, konnte Kepler seine 3. Regel finden.

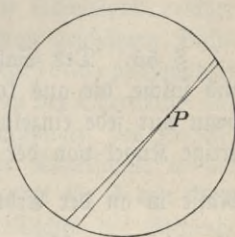
3. Anziehung einer Kugel auf Punkte innerhalb oder außerhalb.

§ 54. Die Entfernungen der Himmelskörper sind sehr groß im Ver- § 54.
gleich zu ihren Durchmesser. Wir konnten deshalb bei Ableitung des Gravitationsgesetzes aus den Keplerschen Regeln annehmen, die Massen wären in ihren Mittelpunkten vereinigt. Newton hat gezeigt, daß diese Annahme für kugelförmige Körper stets zulässig ist, wenn sie aus konzentrischen Schichten bestehen, von denen jede einzelne homogen ist.

Hilfssatz a) Eine gleichförmig mit Masse bedeckte Kugelschale übt auf einen Punkt im Innern keine Wirkung aus.

Legt man durch den Punkt P innerhalb der Kugelschale einen sehr dünnen Doppelkegel (Fig. 75), so schneidet dieser aus der Oberfläche zwei sehr kleine Stücke aus, deren Inhalte, also auch Massen sich wie die Quadrate ihrer Entfernungen von P verhalten. Die von ihnen auf P ausgeübten Anziehungen verhalten sich aber umgekehrt wie jene Quadrate und heben sich deshalb auf. So kann man die ganze Kugeloberfläche in Flächenpaare zerlegen, deren Wirkungen auf P Null ist. Das gleiche gilt auch für eine Kugelschale, die aus konzentrischen Schichten von beliebiger Dichte besteht, wenn jede Schicht für sich homogen ist. Der Beweis läßt erkennen, daß der Satz nur für Kräfte richtig ist, die im umgekehrten Quadrat der Entfernung wirken.

Fig. 75.

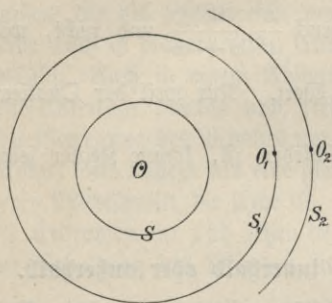


b) Auf einen Punkt außerhalb wirkt eine gleichförmig mit Masse bedeckte Kugelschale so, als ob die ganze Masse im Mittelpunkt vereinigt wäre.

Wir nehmen zunächst an, die Massen m und m_1 wären in den Punkten O und O_1 konzentriert (Fig. 76). Breiten wir m_1 gleichmäßig auf der Kugelschale S_1 aus, die O zum Mittelpunkt und OO_1 zum Radius hat, so müssen wir zwar Arbeit leisten, um die Teilchen m_1 voneinander zu trennen,

aber keine Arbeit in bezug auf die Masse m , denn die Verschiebung geschieht stets senkrecht zur Kraftrichtung. Die Wirkung der Kugelschale S_1 auf die Masse m in ihrem Innern ist, wie bewiesen, gleich Null. Wir können deshalb die Masse m gleichmäßig auf einer konzentrischen Kugelschale S

Fig. 76.



ohne Arbeitsaufwand gegen m_1 ausbreiten. Auf S_1 verschieben wir jetzt m_1 zurück nach O_1 . Auch hierbei findet keine Arbeitsleistung gegen m statt, denn die Kraft zwischen S und irgend einem Teilchen der Masse m_1 ist stets radial gerichtet, die Verschiebung geschieht also senkrecht zur Kraftrichtung. Endlich bewegen wir m_1 von O_1 nach O_2 , wobei wir eine gewisse Arbeit A_1 gegen m auf S aufwenden müssen. In dieselbe Endlage können wir die Massen m und m_1 bringen, indem wir wieder von der Anfangsstellung ausgehen, zuerst aber m_1 von O_1 nach O_2 verschieben, was eine Arbeit A_2 erfordert. Hierauf breiten wir m_1 auf der konzentrischen Kugelschale S_2 aus, alsdann m auf S und führen m_1 auf S_2 wieder nach O_2 zurück. — Bei dem ersten Prozeß ist allein die Arbeit A_1 , beim zweiten die Arbeit A_2 verbraucht worden. In beiden Fällen gingen wir von derselben Anfangslage aus und schlossen mit derselben Endlage.

Gemäß dem Energiegesetz muß deshalb $A_1 = A_2$ sein, d. h. zur Bewegung der Masse m_1 von O_1 nach O_2 ist dieselbe Arbeit erforderlich, gleichgültig, ob m in O konzentriert oder auf S ausgebreitet ist. Das ist aber nur möglich, wenn in beiden Fällen die Kraftäußerungen zwischen m und m_1 gleich sind.

4. Die Erdschwere.

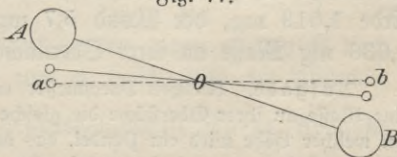
§ 55. Der Satz b des § 54 gilt auch für homogene Vollkugeln und solche, die aus konzentrischen Schichten von beliebiger Dichte bestehen, wenn nur jede einzelne Schicht homogen ist. Wäre die Erde eine derartige Kugel von der Masse E und dem Radius r , so würde sie auf eine Masse m an der Erdoberfläche eine Anziehung $k \frac{E \cdot m}{r^2}$ ausüben. Es müßte also die Erdbeschleunigung g für alle Orte im Meeresniveau konstant $k \frac{E}{r^2}$ sein. Wir wissen aus Pendelbeobachtungen, daß g vom Äquator nach den Polen hin zunimmt. Einen Grund hierfür sah bereits Huygens in der Rotation der Erde um ihre Achse. Nur an den Polen, wo die Rotationsgeschwindigkeit Null ist, kann die Erdanziehung rein zur Wirkung kommen. Jeder andere Ort unter der Breite φ beschreibt in $t = 23$ Std. 56 Min. 4 Sek. einen Kreis vom Radius $r \cos \varphi$. Dieser Bewegung setzt eine Masse m den zentrifugalen, von der Erdachse fortgerichteten

Trägheitswiderstand $m \frac{4 r \cos \varphi \pi^2}{t^2}$ entgegen, zu dessen Überwindung ein Teil der Erdschwere dient. Am Äquator, wo der Trägheitswiderstand genau der Schwere entgegengerichtet ist, beträgt die Verminderung des Gewichts $m \frac{4 r \pi^2}{t^2}$. Bezeichnet a die wahre Erdbeschleunigung, so muß die am Äquator beobachtete, scheinbare Beschleunigung $g_0 = a - \frac{4 r \pi^2}{t^2}$ sein. Nun ist $g_0 = 978,06$ [cm sec⁻²] und $\frac{4 r \pi^2}{t^2} = 3,39$ [cm sec⁻²], also wäre $a = 981,45$ [cm sec⁻²]. So groß müßte auch die Erdbeschleunigung an den Polen sein. Nach einer aus Pendelbeobachtungen empirisch gewonnenen Formel $g_\varphi = g_0 + 5,09 \sin^2 \varphi$ folgt aber für die Pole $g_{90} = 983,15$ [cm sec⁻²]. Die Verschiedenheit der Werte a und g_{90} erklärt sich durch die Erdabplattung, die eine Folge der Achsendrehung ist. Wie sich aus Gradmessungen ergeben hat, übertrifft der äquatoriale Durchmesser der Erde um $\frac{1}{299}$ seiner Länge den polaren.

5. Gravitationskonstante und Dichte der Erde.

§ 56. Sehen wir die Erde als eine Kugel vom Radius r an, und § 56 bezeichne δ ihre mittlere Dichte, so ist ihre Masse $E = \frac{4}{3} \pi r^3 \delta$. Sie erteilt einem Körper an der Oberfläche die wahre Beschleunigung $g = k \frac{E}{r^2} = k \frac{4}{3} \pi r \delta$. Könnte man die Gravitationskonstante k bestimmen, so würde damit auch die mittlere Dichte der Erde bekannt sein und umgekehrt. Maskelyne und Hutton (1775—1780) ermittelten die Ablenkung, die ein Lot auf beiden Seiten der Bergkette Scheehaillin in Schottland erfährt, und berechneten hieraus und aus der möglichst genau geschätzten Dichte des Berges für δ einen Wert, der nahe gleich 5 war. Airy (1856) bestimmte in Harton durch Pendelversuche die Erdbeschleunigung an der Oberfläche und am Grunde eines tiefen Schachtes. Durch Untersuchungen des Bodens über dem Schacht erhielt er die mittlere Dichte der Kugelschale in der Nähe des Beobachtungsortes gleich 2,75 und konnte nun für δ den Wert 6,57 ableiten. Wie Haughton bemerkt hat, ist die Dichte der Erdrinde von Airy zu hoch angenommen worden. Aus der von ihm gefundenen Dichte 2,06 ergibt sich für δ der wahrscheinliche Wert 5,48. — Der erste, der die gegenseitige Anziehung schwerer Massen durch direkte Versuche nachgewiesen hat, war Cavendish (1798). Er bediente sich hierzu der von ihm erfundenen Drehwaage. Ein leichter Holzstab (Fig. 77), der an seinen Enden zwei kleine Bleikugeln a und b trägt, ist in seiner Mitte O an

Fig. 77.



einem dünnen Draht aufgehängt. Dreht man den Stab in horizontaler Ebene aus seiner Gleichgewichtslage, so erfährt der Draht eine Drilling und setzt deshalb der Drehung einen Widerstand entgegen. Um den Stab um einen gewissen Winkel α abzulenken, ist ein Drehungsmoment nötig, das man durch zwei gleiche und entgegengesetzt gerichtete Kräfte K hervorrufen kann, von denen die eine in a , die andere in b senkrecht zur jedesmaligen Stabrichtung angreift. Bewirkt die Anziehung der großen Bleifugel A auf a und von B auf b dieselbe Drehung, so muß $K = k \frac{M \cdot m}{r^2}$ sein, wenn M und m die Masse je einer großen und kleinen Kugel und r den Abstand der Mittelpunkte von A und a oder von B und b bezeichnet. Aus obiger Gleichung kann die Gravitationskonstante k berechnet werden, da sich alle anderen Größen experimentell bestimmen lassen.

Die Versuche von Cavendish sind mehrfach wiederholt worden, z. B. von Reich (1837) und in neuerer Zeit von Boys (1894) und Braun (1896) mit etwas abweichender Anordnung. Für k ergab sich aus den letzteren Versuchen übereinstimmend der Wert $6,658 \cdot 10^{-8}$ [$\text{cm}^3 \text{gr}^{-1} \text{sec}^{-2}$]. — Mit Hilfe einer empfindlichen Wage haben Jolly (1881), Richarz und Krüger-Menzel (1896) die Gravitationskonstante dadurch bestimmt, daß sie die Gewichtsveränderung maßen, die ein Körper in der Nähe einer großen Bleimasse erfährt. Richarz und Menzel fanden für k den Wert $6,685 \cdot 10^{-8}$ und hieraus die mittlere Dichte der Erde gleich 5,505. —

Die Gravitationskonstante ist keine absolute Zahl, sondern von den gewählten Maßeinheiten abhängig. Ihre Dimension ergibt sich aus der Gleichung $K = k \frac{M \cdot m}{r^2}$ und ist im [CGS] System [$\text{cm}^3 \text{gr}^{-1} \text{sec}^{-2}$].

Zwei Grammassen in 1 cm Abstand ziehen sich hiernach mit der Kraft von $k = 6,68 \cdot 10^{-8}$ Dyn an. Für zwei kugelförmige Massen von je 1000 kg, z. B. für zwei Bleifugeln von etwa 27,6 cm Radius, würde die Anziehung bei einem zentralen Abstand von 1 m betragen $6,68 \cdot 10^{-8} \cdot 10^6 \cdot 10^6 / 100^2 = 6,68$ Dyn oder 6,81 mg im terrestrischen Maßsystem. Es ist also die Gravitationswirkung selbst bei zwei Massen von je 1000 kg noch eine äußerst geringe und entzieht sich deshalb für gewöhnlich unserer Beobachtung. Sie wird erst beträchtlich, wenn es sich um Massen von der Größe der Himmelskörper handelt. Mit der Kraft eines Dyn zieht die Erde 1,019 mg, der Mond 5,7 mg, der Mars 2 mg und die Sonne 0,036 mg Masse an ihrer Oberfläche an.

Aufgabe. Welchen Durchmesser müßte eine Bleifugel haben, wenn sie auf eine Masse an ihrer Oberfläche die gleiche Anziehung wie die Erde ausüben soll? — In welcher Höhe wird ein Pendel, das an der Erdoberfläche Sekunden schlägt, täglich eine Schwingung weniger machen? — Wie würde sich die Anziehung der Erde auf einen Punkt im Innern mit abnehmender Entfernung von ihrem Mittelpunkt ändern, wenn sie eine homogene Kugel wäre? — Welche Geschwindigkeit müßte einem Körper parallel zur Erdoberfläche erteilt werden, damit er die Erde wie ein

Mond gleichförmig umkreiste? In welcher Zeit würde er einen Umlauf vollenden? — Die Erde ist von der Sonne rund $149 \cdot 10^9$ m oder 23 400 Erdradien entfernt und vollendet ihre fast kreisförmige Bahn in 365 Tagen 6 Stunden 9 Minuten. Wie groß ergibt sich hieraus die nach der Sonne gerichtete Zentripetalbeschleunigung der Erde? Unter Benutzung der Größe g bestimme man hierauf das Verhältnis der Sonnen- zur Erdmasse und aus dem Sonnendurchmesser, der gleich 108 Erddurchmessern ist, die mittlere Dichtigkeit der Sonne und die Fallbeschleunigung an ihrer Oberfläche.

6. Potential der Erdschwere.

§ 57. Wenn wir eine Masse m um die Höhe h heben, so leisten § 57. wir eine Arbeit mgh , da die Anziehung mg zwischen Erde und Körper auf dem Wege h überwunden werden muß. Diese Be-

rechnung der Arbeit setzt voraus, daß die Größe der Anziehung auf der Strecke h dieselbe bleibt. Nach dem Gravitationsgesetz trifft das streng genommen nicht zu. Nur ist der Fehler in allen praktischen Fällen, wo h im Vergleich zum Erdradius äußerst gering ist, zu vernachlässigen. Um den genauen Wert der Hebungsarbeit für ein großes h zu ermitteln, denken wir uns die Höhe AB (Fig. 78) in die sehr kleinen Strecken $AA_1, A_1A_2 \dots A_n B$ zerlegt. Sind $r, r_1, r_2 \dots r_n, R$ die Entfernungen der Punkte $A, A_1, A_2 \dots A_n, B$ vom Erdmittelpunkt, so erfährt die Masse m von der Erdmasse E in A und A_1 die Anziehungen $k \frac{mE}{r^2}$ und $k \frac{mE}{r_1^2}$. Wegen der Kleinheit der Strecke AA_1 dürfen wir die zu überwindende Kraft auf diesem Wege gleich dem

geometrischen Mittel $k \frac{mE}{rr_1}$ der Kraftbeträge in A und A_1 annehmen.

Die längs AA_1 zu leistende Arbeit ist dann

$$k \frac{mE}{rr_1} (r_1 - r) = kmE \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right).$$

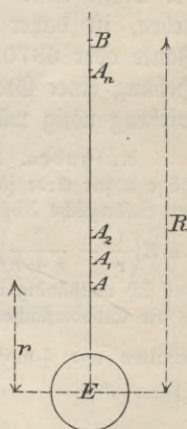
Bestimmen wir in derselben Weise die Arbeiten auf den Wegen $A_1A_2, \dots, A_n B$ und addieren diese Werte, so ergibt sich als Gesamtarbeit, die zur Hebung von A bis B nötig ist,

$$kmE \cdot \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_n} - \frac{1}{R} \right] = kmE \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right).$$

Die gleiche Arbeit kann wiedergewonnen werden, wenn m von B nach A sinkt. Das System der Massen E und m besitzt also im Abstände R eine um $kmE \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$ größere Leistungsfähigkeit als im Abstände r .

Dieses Mehr an potentieller Energie erreicht den größten Wert $k \frac{mE}{r}$, wenn R unendlich groß wird.

Fig. 78.



Man nennt den Ausdruck $k \frac{mE}{r}$ [$\text{cm}^2 \text{gr sec}^{-2}$] das Potential der Wechselwirkung zwischen den Massen E und m für den Abstand r . Es ist gleich der Arbeit, die aufzuwenden wäre, um die Masse m aus dem Abstände r bis ins Unendliche zu entfernen. Um dies für die Masseneinheit zu leisten, wäre die Arbeit $k \frac{E \cdot 1}{r}$ nötig. Die Größe $k \frac{E}{r}$ [$\text{cm}^2 \text{sec}^{-2}$] heißt das Potential der Masse E im Abstände r .

Nach § 56 ist $g = k \frac{E}{r^2}$, wenn r den Erdradius bezeichnet. Um die Masse eines Gramms von der Erdoberfläche bis ins Unendliche zu heben, ist daher die Arbeit $1 \cdot g \cdot r = 981 \cdot 637 \cdot 10^6 \text{ Erg} = 9,81 \cdot 6370 \text{ Joule}$ oder 6370 kgm zu leisten. Es ist dies dieselbe Arbeit, die zur Hebung einer Grammaste um den Erdradius bei konstanter Gravitationswirkung nötig wäre.

Aufgaben. Mit welcher Geschwindigkeit erreicht die Masse m , die aus großer Höhe h zur Erde fällt, deren Oberfläche? Bezeichnet r den Erdradius, so ist $h + r$ der anfängliche Abstand der Masse m vom Erdmittelpunkt. Die potentielle Energie $k m E \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+h} \right)$, die das Massensystem E und m im Abstand $r+h$ besitzt, hat sich vollständig in die kinetische Energie der Massen E und m umgesetzt, sobald m die Erdoberfläche erreicht. Unter der Annahme, daß m sehr klein gegen E ist, erhalten wir $\frac{1}{2} m v^2 = k m E \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+h} \right)$ und mit Benutzung der Beziehung $k E = g r^2$

$$v = \sqrt{2 g r \frac{h}{r+h}}$$

Für den freien Fall eines Körpers aus unendlich großer Höhe zur Erde ergibt sich demnach die Endgeschwindigkeit $V = \sqrt{2 g r} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 637 \cdot 10^4} = 11180 \text{ [m sec}^{-1}\text{]}$.

Mit welcher Geschwindigkeit trifft ein Körper, der aus unendlicher Entfernung nach der Sonne fällt, deren Oberfläche? Wie groß war seine Geschwindigkeit, als er von der Sonne noch um den Abstand Erde—Sonne entfernt war? (Sonnenmasse = $32 \cdot 10^4$ Erdmassen und Sonnenhalbmesser = 108 Erdhalbmessern.)

In welchem Punkte und mit welchen Geschwindigkeiten würden Erde und Mond zusammenstoßen, wenn sie allein der zwischen ihnen bestehenden Gravitationswirkung folgten? (Mondmasse = $\frac{1}{80}$ Erdmasse, Mondhalbmesser = $0,264$ Erdhalbmesser.)

7. Flächen gleichen Potentials.

§ 58. § 58. Das Potential einer homogenen Kugel vom Radius r und der Dichte δ hat im Abstände nr vom Mittelpunkt den Wert $P = k \frac{1}{3} \frac{r^2 \pi \delta}{n}$.

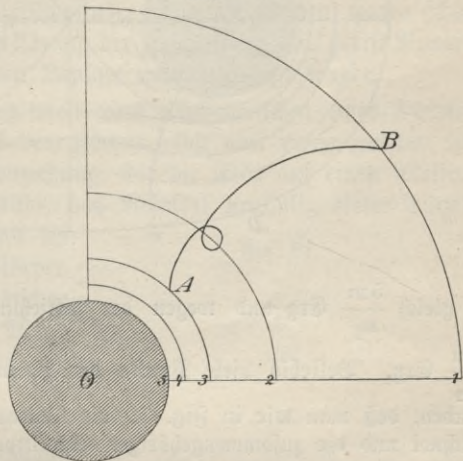
Für eine Bleikugel von $12,5 \text{ m}$ Radius würde $P = \frac{1}{3} \left[\text{cm}^2 \text{sec}^{-2} \right]$ Einheiten betragen, also

im Abstände	$r \dots$	5 Einheiten	
" "	$1\frac{1}{4}r \dots$	4	"
" "	$1\frac{2}{3}r \dots$	3	"
" "	$2\frac{1}{2}r \dots$	2	"
" "	$5r \dots$	1	"

Denken wir uns in diesen Abständen Kugeloberflächen um den Mittelpunkt der Bleifugel gelegt, den wir uns unverrückbar vorstellen, so ist für alle Punkte derselben Oberfläche das Potential konstant gleich 5, 4, 3, 2, 1 Einheiten. Diese Flächen nennt man deshalb Flächen gleichen Potentials. In der Fig. 79 ist $r = 1$ cm gemacht, als Maßstab also 1:1250 angenommen. Verschieben wir den Massenpunkt m auf einer Potentialfläche, so leisten wir dabei gegen die Masse der Bleifugel keine Arbeit. Bringen wir aber m von einem Punkte A z. B.

der Fläche 3 auf irgend einem Wege nach dem Punkte B der Fläche 1, so müssen wir stets die Arbeit $m(3 - 1) = 2m$ Erg aufwenden, d. h. eine Arbeit, die gleich ist dem Produkt aus der bewegten Masse und der Potentialdifferenz für den Anfangs- und Endpunkt der Bewegung. In der Fig. 79 sind die Flächenschnitte für einen Quadranten so gezeichnet, daß bei Verschiebung der Masseneinheit von der einen Fläche zur benachbarten die Arbeit 1 Erg verbraucht oder gewonnen wird. Je

Fig. 79.

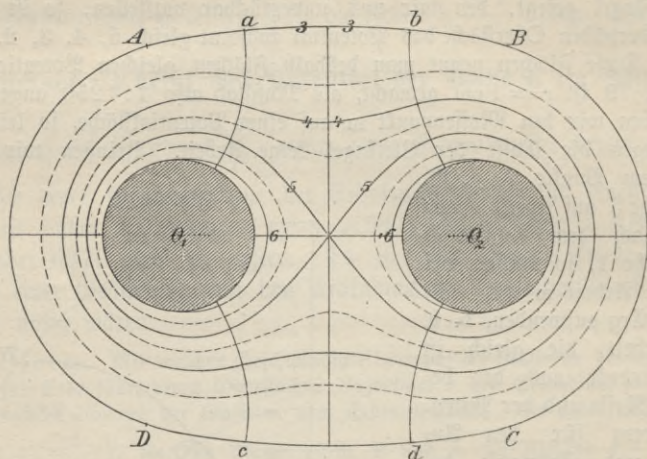


kleiner man die Arbeitseinheit wählt, mit desto größerem Rechte kann man die Kraft K auf dem Wege von der einen zur benachbarten Fläche als unveränderlich ansehen und die Arbeitseinheit gleich $K \cdot d$ setzen, wo d den Abstand zweier aufeinander folgenden Flächen bezeichnet. Die Kräfte sind demnach den Abständen zweier benachbarten Flächen umgekehrt proportional. Die Richtung der Kraft für irgend einen Punkt muß senkrecht zu dem Element der Potentialfläche sein, die durch jenen Punkt geht, denn nur in diesem Falle geschieht die Bewegung auf der Fläche ohne Arbeitsaufwand. Eine Darstellung der Flächen gleichen Potentials läßt also in anschaulicher Weise die Richtung und Größe der Kraft in irgend einem Raumpunkte erkennen.

Die Fig. 80 gibt eine Vorstellung von der Gravitationswirkung zweier Bleifugeln von je $r = 12,5$ m Radius, deren Mittelpunkte unverrückbar um 50 m voneinander entfernt sind, auf einen beliebigen Massenpunkt m . Wie oben gezeigt wurde, beträgt das Oberflächenpotential jeder Kugel für sich 5 [$\text{cm}^2 \text{sec}^{-2}$] Einheiten. Der Maßstab der Zeichnung ist wie bei Fig. 79 1:1250. Die schraffierten Kreise mit den Halbmessern 1 cm bedeuten die beiden Bleimassen. Für einen Punkt, der um $n_1 r$ von O_1 und um $n_2 r$ von O_2 absteht,

ergibt sich als Gesamtpotential $\frac{5}{n_1} + \frac{5}{n_2}$ Einheiten. Denn auf welchem Wege auch die Masse m von jenem Punkte bis ins Unendliche entfernt wird, die dabei geleistete Arbeit ist stets wegen der Anziehung zwischen O_1 und

Fig. 80.



m gleich $\frac{5m}{n_1}$ Erg und wegen der Anziehung zwischen O_2 und m gleich

$\frac{5m}{n_2}$ Erg. Beliebige viele Punkte der Potentialkurven werden dadurch ge-

funden, daß man wie in Fig. 79 die Potentialkreise für jede einzelne Masse zeichnet und die zusammengehörigen Schnittpunkte verbindet. Da z. B. die Kreise mit 5 und 2,5 cm Radius die Potentialflächen für 1 und 2 Einheiten der einzelnen Massen darstellen, so ist das Gesamtpotential beider Massen für die Schnittpunkte jener Kreise 3 Einheiten. Man findet so die vier Punkte A, B, C, D der Kurve 3. Auf diese Weise sind in der Fig. 80 die Potentiallinien für die Einheiten 6, $5\frac{1}{2}$, 5, $4\frac{1}{2}$, 4, $3\frac{1}{2}$, 3 gezeichnet. Läßt man die Figur um die Achse O_1O_2 rotieren, so entstehen die entsprechenden Potentialflächen. Die Richtung der Kraft steht in jedem Punkte senkrecht zum Element der Potentialfläche. So geben z. B. in der Figur die Linien a, b, c, d die Kraftrichtungen an den betreffenden Stellen an (Kraftlinien).

Eine Wassermasse, die nur dem anziehenden Einflusse der beiden Kugeln O_1 und O_2 unterworfen wäre, würde sich je nach der vorhandenen Menge auf ihnen derartig ausbreiten, daß eine der Potentialflächen die Wasseroberfläche bildete (Niveaufläche). Man erkennt hieraus, daß die Erdflut nur an der dem Monde zugewandten Seite entstehen könnte, wenn man sich die Erde im Raume festgehalten denkt, so daß sie keine Beschleunigung nach dem Mond hin erhielt.

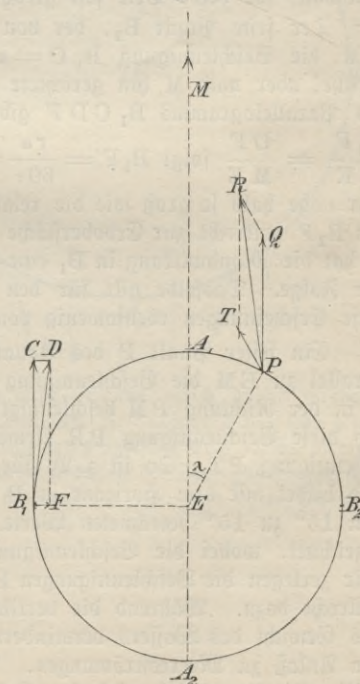
8. Ebbe und Flut.

§ 59. Die Meeresoberfläche zeigt regelmäßige Schwankungen, die besonders an den Küsten der großen Weltmeere zu beobachten sind. Das Wasser steigt dort gewöhnlich zweimal innerhalb 24 Std. 50 Min. und sinkt wieder, so daß zwischen zwei Hochwassern etwa 12 Std. 25 Min. vergehen. Da der Meridiandurchgang des Mondes sich an demselben Beobachtungsorte täglich um ungefähr 50 Min. verspätet, so finden die Eintritte des höchsten Wasserstandes angenähert die gleiche Anzahl Stunden nach der oberen oder unteren Kulmination statt. Auch die Höhe der Flut zeigt sich von der Stellung des Mondes abhängig. Zur Zeit des Voll- und Neumondes ist der Unterschied zwischen dem höchsten und tiefsten Wasserstand am beträchtlichsten (Springsflut), am kleinsten dagegen während des ersten und letzten Viertels (Nippflut). Diese Tatsachen waren schon im Altertum bekannt. Eine Erklärung der Erscheinung hat zuerst Newton gegeben, die später besonders von Laplace vervollständigt wurde.

Nach dem Gravitationsgesetz wirkt jedes Massenteilchen eines Körpers auf jedes andere ein, mag dies dem Körper selbst oder einem zweiten angehören. So ist die Gesamtanziehung, die die Erde auf einen Massenpunkt an ihrer Oberfläche ausübt, das Resultat unzählig vieler Einzelwirkungen. Das ist auch der Fall bei der Anziehung zweier Himmelskörper. Für die Entstehung der irdischen Flut kommen nur Sonne und Mond in Betracht. Wäre die Erde ein starrer Körper, so würden alle Massenteilchen dieselbe mittlere Beschleunigung durch Sonne oder Mond erfahren. Nun ist aber die Erdoberfläche fast zu $\frac{3}{4}$ mit Wasser bedeckt, dessen Teilchen sehr leicht gegeneinander und die feste Erde verschiebbar sind. Sobald die Beschleunigungen, die einer der Himmelskörper den Wasserteilchen des Meeres relativ zur festen Erdmasse erteilt, weder parallel noch senkrecht zur mittleren Kraft gerichtet sind, ergeben sich tangential zur Erdoberfläche wirkende Komponenten, die bei genügender Größe eine Flutwelle hervorrufen müssen.

Um eine Vorstellung von der Größe und Richtung der fluterregenden

Fig. 81.



Kräfte zu gewinnen, untersuchen wir die Wirkung, die eine den Äquator ringsum bedeckende Wassermasse durch den Mond erfährt, wenn dieser selbst im Äquator steht. Die mittlere Beschleunigung a , die der Mond der Erde als Ganzes erteilt, hat die Richtung der Zentrallinie EM (Fig. 81) und ist gleich $k \frac{M}{60^2 r^2}$. Setzen wir die Mondmasse $M = \frac{1}{80}$ der Erdmasse E , so ist wegen

$$k = \frac{gr^2}{E} \quad (\S 56) \quad a = \frac{g}{80 \cdot 60^2} = 0,03406 \text{ [mm sec}^{-2}\text{]}.$$

Diese Beschleunigung erhält jeder Punkt der festen Erde, also auch die Punkte A_1 und A_2 , in denen die Zentrallinie EM die Erdoberfläche trifft. Befinden sich in A_1 und A_2 verschiebbare Wassermassen, so betragen ihre absoluten Beschleunigungen

$$a_1 = \frac{g}{80 \cdot 59^2} = 0,03522 \text{ [mm sec}^{-2}\text{]}$$

$$\text{und } a_2 = \frac{g}{80 \cdot 61^2} = 0,03295 \quad "$$

In bezug auf den Meeresgrund erfährt demnach die Wassermasse

in A_1 die Beschleunigung $a_1 - a = 0,00116 \text{ [mm sec}^{-2}\text{]},$

in A_2 " " " $a - a_2 = 0,00111 \quad "$

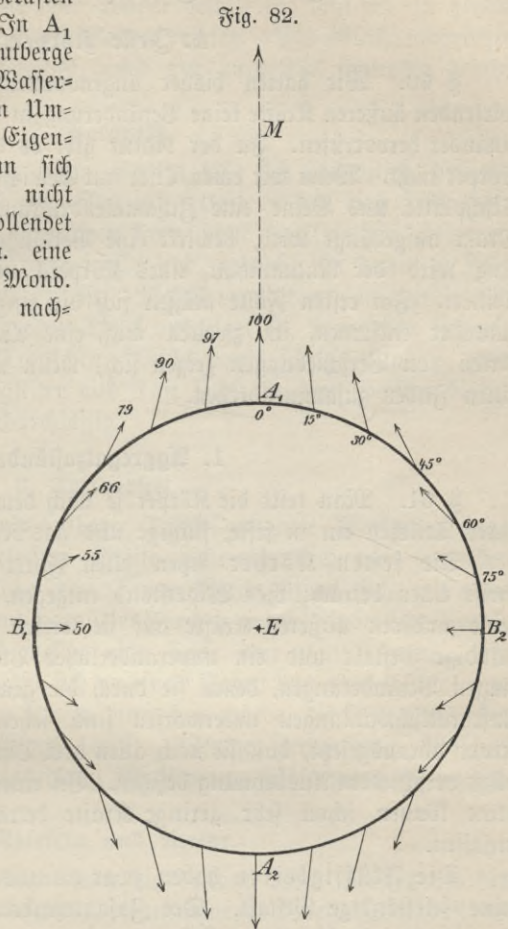
Diese relativen Beschleunigungen sind beide vom Erdmittelpunkt weg gerichtet, ihre Wirkung besteht lediglich darin, das Gewicht der Wasserteilchen um eine minimale, für beide Orte fast gleiche Größe zu vermindern.

Der feste Punkt B_1 , der von A_1 um 90° absteht, erhält parallel zu EM die Beschleunigung $B_1 C = a$, eine Wassermasse in B_1 die nahezu gleiche, aber nach M hin gerichtete Beschleunigung $B_1 D$. Die Seite $B_1 F$ des Parallelogramms $B_1 C D F$ gibt die relative Beschleunigung an. Aus $\frac{B_1 F}{B_1 E} = \frac{D F}{M E}$ folgt $B_1 F = \frac{r a}{60 r} = 0,000568 \text{ [mm sec}^{-2}\text{]}$, ein Wert, der sehr nahe halb so groß wie die relativen Beschleunigungen in A_1 und A_2 ist. Da $B_1 F$ senkrecht zur Erdoberfläche nach dem Mittelpunkt E hin gerichtet ist, so hat die Mondwirkung in B_1 eine geringe Vergrößerung des Wassergewichts zur Folge. Dasselbe gilt für den Punkt B_2 . Für die Fluterregung sind diese Erscheinungen ebensowenig von Belang wie die in A_1 und A_2 .

Ein fester Punkt P des Äquators, der von A_1 um λ° absteht, erfährt parallel zu EM die Beschleunigung $PQ = a$, während eine Wassermasse in P in der Richtung PM beschleunigt wird. Für irgend einen Winkel λ läßt sich diese Beschleunigung PR elementar bestimmen, ebenso die relative Beschleunigung PT . So ist z. B. für $\lambda = 30^\circ$ $PT = 0,001045 \text{ [mm sec}^{-2}\text{]}$ und bildet mit dem Horizont in P den Winkel 44° . In Fig. 82 sind die von 15° zu 15° berechneten Werte von PT der Größe und Richtung nach gezeichnet, wobei die Beschleunigung $PT = a$ in A_1 gleich 100 gesetzt ist. Wir zerlegen die Beschleunigungen PT noch tangential zur Erdoberfläche und senkrecht dazu. Während die vertikalen Komponenten nur um ein Geringes das Gewicht des Wassers vermindern oder vergrößern, geben die horizontalen den Anlaß zu Meeresströmungen. Auf der dem Monde zugewandten Seite müssen die tangential wirkenden Kräfte die Wassermassen nach A_1 hintreiben,

auf der abgewandten nach A_2 . Wenn Mond und Erde ihre gegenseitige Stellung nicht veränderten, so würde dieses Strömen so lange stattfinden, bis der Überdruck, der durch die Ansammlung der Wassermassen in A_1 und A_2 entsteht, jenen tangentialen Kräften das Gleichgewicht hielte. In A_1 und A_2 würden sich zwei Flutberge bilden, in B_1 und B_2 zwei Wasserthäler. Wegen der täglichen Umdrehung der Erde und der Eigenbewegung des Mondes kann sich dieser Gleichgewichtszustand nicht herstellen. Die Erde vollendet innerhalb 24 Std. 50 Min. eine Umdrehung in bezug auf den Mond. In dieser Zeit gelangen nach-

einander sämtliche Punkte des Äquators in die Lage von A_1 und A_2 . Wäre zur Herbeiführung des Gleichgewichtszustandes keine Zeit notwendig, würden die Wassermassen also augenblicklich dem Einfluß der fluterregenden Kräfte folgen können, so müßten sich die beiden Flutberge stets auf der Centrale EM befinden, und der höchste Wasserstand würde für einen Ort gerade dann eintreten, wenn der Mond im Zenit oder Nadir stände. In Wirklichkeit verspätet sich der Eintritt.



Aufgabe. Man setze die Entfernung Erde—Sonne gleich 23400 Erdhalbmessern, die Sonnenmasse gleich 320000 Erdmassen (s. Aufgabe § 56) und zeige, daß die fluterregende Kraft der Sonne für denselben Punkt der Erde etwas weniger als halb so groß wie die des Mondes ist. Warum treten die Springsfluten zur Zeit des Voll- und Neumondes auf, die Nippfluten während des ersten und letzten Viertels? Warum verhalten sich die Höhen dieser fluten etwa wie 3 zu 1?

Teil IV. Gleichgewicht und Bewegung der einzelnen Theilchen der Körper.

A. Feste Körper.

§ 60. § 60. Wir hatten bisher angenommen, daß die auf einen Körper wirkenden äußeren Kräfte keine Veränderung in der Lage seiner Theilchen zu einander hervorrufen. In der Natur gibt es derartige, vollkommen starre Körper nicht. Wenn wir einen Tisch mit Gewichtsstücken beladen, so erfährt Tischplatte und Beine eine Zusammendrückung; eine Last, die an einem Draht aufgehängt wird, bewirkt eine Verlängerung des Drahtes. Durch Zug wird der Rauminhalt eines Körpers vergrößert, durch Druck verkleinert. Im ersten Falle müssen sich die einzelnen Theilchen weiter voneinander entfernen, im zweiten muß eine Annäherung eintreten. Beide Arten von Verschiebungen zeigen sich, wenn wir einen Stab biegen oder einen Faden zusammendrehen.

1. Aggregatzustände.

§ 61. § 61. Man teilt die Körper je nach dem Grade der Verschiebbarkeit ihrer Theilchen ein in feste, flüssige und gasförmige.

Die festen Körper setzen allen Form- und Volumenänderungen meist einen beträchtlichen Widerstand entgegen. Sie haben deshalb, wenn keine anderen äußeren Kräfte auf sie wirken als die Schwere, eine selbstständige Gestalt und ein unveränderliches Volumen. Von den sehr geringen Veränderungen, denen sie durch die gewöhnlichen Temperatur- und Luftdruckschwankungen unterworfen sind, sehen wir hierbei ab. Es wird ferner vorausgesetzt, daß sie nach allen drei Dimensionen endliche und nicht allzu verschiedene Ausdehnung besitzen. Bei einem Draht oder einem Papierblatt können schon sehr geringe Kräfte beträchtliche Deformationen veranlassen.

Die Flüssigkeiten haben zwar ein unveränderliches Volumen, doch keine selbstständige Gestalt. Der Zusammenhang der Theilchen (Kohäsion) ist geringer als die eigene Schwere, wie man an einem schmelzenden Eiszapfen erkennt, und einer Teilung widerstehen sie nur in geringem Grade. Ihre Gestalt hängt von der Form des einschließenden Gefäßes ab. Das Volumen läßt sich, selbst durch sehr große Druckkräfte, nur sehr wenig vermindern. Sobald der Druck aufhört, nehmen sie wieder den früheren Raum ein.

Die Gase haben weder eine selbstständige Gestalt noch ein selbstständiges Volumen. Sie zeigen deutlich das Bestreben, sich auszudehnen, denn sie erfüllen in kurzer Zeit jeden ihnen dargebotenen Hohlraum und üben auf dessen Wände alsdann einen Druck aus. Einer Volumenverminderung durch Druck widerstehen auch die Gase, wenn auch in viel geringerem

Grade als feste und flüssige Körper. Diese Eigenschaft ist also allen Körpern gemeinsam und auf ihr beruht die Vorstellung von der Undurchdringlichkeit des Stoffes. In ein unten geschlossenes, zylinderförmiges Gefäß, das mit Luft oder Wasser gefüllt ist, läßt sich ein genau passender Kolben nicht bis auf den Boden drücken. Ein Glas, umgekehrt in ein Gefäß mit Wasser getaucht, wird nur zum Teil inwendig benetzt (Taucherglocke).

2. Porosität.

§ 62. Von den meisten festen Körpern läßt sich nachweisen, daß sie § 62. Hohlräume oder Poren enthalten. Dadurch erklärt es sich, daß z. B. Holz eine gewisse Menge Wasser aufnehmen kann, ohne merklich sein Volumen zu ändern. Taucht man Marmor in Öl und zerbricht ihn dann, so sieht man, daß das Öl eingedrungen ist. Metallene Röhren, in denen sich Wasser befindet, das einem großen Druck ausgesetzt ist, überziehen sich mit feinen, dem Tau ähnlichen Tröpfchen. Nicht porös scheint Glas zu sein, denn es zeigt sich für Flüssigkeiten und Gase selbst bei den höchsten bisher erreichbaren Drucken als undurchlässig.

3. Teilbarkeit.

§ 63. Alle Körper sind teilbar. Durch geeignete Werkzeuge kann § 63. die Zerteilung auch der festesten Stoffe außerordentlich weit getrieben werden. Auf einer Glasfläche von 1 mm Breite lassen sich mit einer Diamantspitze mehrere Tausend paralleler Furchen ziehen (Robertsche Gitter). Das gewöhnliche Blattgold besitzt eine Dicke von 0,0001 mm. Ein walnußgroßes Stück Quarz läßt sich zu einem Faden von etwa 0,0003 mm Durchmesser ausziehen, dessen Länge hinreichen würde, die Erde sechs- bis siebenmal zu umspannen (Boys 1887). Wenige Zentigramm Moschus erfüllen mit ihren Teilchen jahrelang ein Zimmer, selbst wenn es wiederholt gelüftet wird.

4. Molekeln und Atome.

§ 64. In Gedanken kann man die Teilung eines Stoffes bis ins § 64. Unendliche fortsetzen. Die damit übereinstimmende Vorstellung, daß ein Körper den von ihm eingenommenen Raum kontinuierlich erfüllt, entspricht auch den grobsinnlichen Wahrnehmungen, die uns das Tastgefühl und das Auge vermitteln. Doch hieraus folgt noch nicht, daß der Stoff auch tatsächlich unendlich teilbar ist. Durch die Erfahrung läßt sich weder dies, noch das Gegenteil feststellen, da der Wahrnehmungsfähigkeit unserer Sinne verhältnismäßig enge Grenzen gezogen sind. Alle Annahmen über die letzte Zerteilung der Materie haben deshalb nur einen bedingten Wert, es sind keine endgültigen Wahrheiten, sondern nur Hilfsvorstellungen, aus denen heraus man das gesamte Verhalten der Körper in physikalischer und chemischer Beziehung zu erklären sucht. In diesem Sinne ist auch die Molekularhypothese aufzufassen. Man geht dabei von der Annahme aus,

daß alle Körper aus sehr kleinen Theilchen (Molekeln) bestehen, die für ein und denselben Stoff gleichartig sind. Da ein Körper durch Druck, Zug oder Wärme Volumenänderungen erfährt, so können seine Molekeln sich nicht unmittelbar berühren, sondern müssen durch Zwischenräume getrennt sein, die sich vergrößern oder verkleinern lassen. Diese molekularen Zwischenräume sind wegen ihrer Kleinheit nicht direkt wahrzunehmen. Sie sind also nicht mit den mehr oder weniger sichtbaren und nachweisbaren Poren zu verwechseln.

In der Chemie teilt man die Stoffe in einfache und zusammengesetzte ein. Ein Stoff heißt einfach — Grundstoff oder Element —, wenn er sich durch die bisher bekannten Prozesse nicht weiter zerlegen läßt. So gehören Quecksilber und Schwefel zu den Elementen, dagegen der bekannte rote Farbstoff Zinnober zu den zusammengesetzten Körpern, da er eine Verbindung von Quecksilber und Schwefel ist. Zerreiben wir Zinnober immer feiner und feiner, so können wir uns vorstellen, daß wir endlich zu Theilchen gelangen, von denen jedes, wenn eine weitere mechanische Teilung möglich wäre, in Quecksilber und Schwefel zerfallen müßte. Jede Molekel eines chemisch zusammengesetzten Körpers besteht also mindestens noch aus zwei kleineren, verschiedenartigen Theilchen, die man Atome nennt. Da gewisse Grundstoffe, wie z. B. der Schwefel, in verschiedenen Zuständen ganz abweichende Eigenschaften zeigen, so hat man die Ansicht, daß auch die Molekeln der Elemente im allgemeinen zusammengesetzt sind, nämlich aus zwei oder mehreren gleichartigen Atomen. Hiernach kommen die Atome nicht frei für sich vor, sondern nur in Verbindung mit anderen Atomen derselben oder verschiedener Art.

5. Molekularkräfte.

§ 65. § 65. Als Grund für den Zusammenhalt der Theilchen eines Körpers nimmt man an, daß seine Molekeln sich gegenseitig anziehen und deshalb jeder Trennung einen Widerstand entgegensetzen. Man denkt sich diesen Widerstand durch Kräfte hervorgerufen, die man als Molekularkräfte oder kurz auch als Kohäsion bezeichnet. Die Gesetze, denen die Molekularkräfte gehorchen, sind noch wenig erforscht. Jedenfalls können sie nur auf außerordentlich kleine Entfernungen hin wirksam sein. Denn setzen wir die beiden Teile einer zerbrochenen Eisenstange noch so genau mit ihren Bruchflächen wieder zusammen, so läßt sich doch der frühere Zusammenhang auf diese Weise nicht mehr herstellen. Andererseits wird die Kohäsion bei manchen Körpern dadurch erhöht, daß man ihre Teile durch Hämmern oder Pressen näher aneinander rückt. So werden Leder und die meisten Metalle durch Hämmern dichter und fester, Papier durch Pressen.

Viele Körper wie Holz, Fischbein, Kristalle zeigen in verschiedenen Richtungen einen verschiedenen Grad von Kohäsion.

Auf der Kohäsion beruhen die Eigenschaften: hart, weich, — zähe, spröde, — elastisch, unelastisch.

Hart nennt man einen Körper, der schwer Eindrücke auf seine Oberfläche annimmt; zähe den Körper, dessen Teile sich ziemlich weit aus ihrer Lage bringen lassen, ohne sich voneinander zu trennen; elastisch ist ein Körper, wenn seine Teile, aus ihrer gegenseitigen Lage gebracht, in diese zurückzukehren streben. Stahl, Elfenbein und Glas sind hart, spröde und elastisch. Ein Körper ist härter als ein anderer, wenn er diesen ritzt. Dieses Merkmal hat man zur Aufstellung einer Härteskala in der Mineralogie benutzt. Der Diamant ist der härteste Körper.

Bei gewissen pulverförmigen Körpern, z. B. sehr fein zermahlenem Graphit, kann man die einzelnen Teilchen durch starken Druck so einander nähern, daß die Molekularkräfte wieder wirksam werden und eine zusammenhängende Masse sich bildet. Zwei Bleiplatten mit blanken Oberflächen werden durch Zusammenpressen zu einem einzigen Stück vereinigt. Wenn man die Enden zweier Eisenstangen bis zur Weißglut erhitzt, so lassen sich die Stangen durch Hämmern zu einer aneinander schweißen. Sehr ebene, aufeinander liegende Spiegelglasplatten haften auch im luftleeren Raume aneinander. — Man bezeichnet die molekulare Anziehung, die bei inniger Berührung zweier Körper sich zeigt, häufig als Adhäsion, zum Unterschiede von der Kohäsion, die zwischen den einzelnen Teilchen desselben Körpers stattfindet. Auf Adhäsion beruht alles Leimen und Ritten, das Schreiben mit Tinte, Bleistift, Kreide, das Naßwerden eines in Wasser oder Öl getauchten Körpers, das Hinunterfließen des Wassers am Rande der Gefäßwand beim Ausgießen. Die Luft adhärirt an den Wänden der Barometerröhre so stark, daß sie erst durch Kochen des Quecksilbers ausgetrieben wird. Rollt man ein Blatt Papier zu einer engen Röhre zusammen, zündet diese an dem einen Ende an und hält das andere Ende schräg auf die Tischplatte, so lagert sich hier der hervordringende Rauch und adhärirt sehr augenfällig am Tische.

6. Molekularbewegung.

§ 66. Die Annahme, daß die einzelnen Molekeln eines Körpers § 66. durch innere Kräfte zusammengehalten werden, legt die Frage nahe, weshalb die durch Zwischenräume getrennten Teilchen unter der Einwirkung dieser Kräfte sich nicht bis zur Berührung nähern. Daß die Himmelskörper trotz der gegenseitigen Massenanziehung nicht aufeinander stürzen, erklärt sich nach Newton aus ihrer Eigenbewegung. Man hat deshalb versucht, die entsprechenden Erscheinungen der Welt im Kleinen auf gleiche Ursachen zurückzuführen und nimmt an, daß die Molekeln der Körper sich in ständiger Bewegung befinden. Bei den festen Körpern entfernt sich jedes Teilchen nur sehr wenig aus einer bestimmten, mittleren Gleichgewichtslage, es bewegt sich dabei innerhalb der Grenzen der Molekularanziehung, und wir müssen deshalb eine verhältnismäßig große Kraft anwenden, um die Teilchen voneinander zu trennen oder einander zu nähern (§ 67). Erwärmen wir den Körper, so nimmt die Bewegungsenergie

der Molekeln zu. Diese machen nun weitere Schwingungen, der Körper dehnt sich aus, und der innere Zusammenhang wird mehr und mehr gelockert, bis endlich der Körper schmilzt. Da er auch im flüssigen Zustande noch eine gewisse Kohäsion zeigt, so können die meisten seiner Teilchen noch nicht das Anziehungsbereich der benachbarten Molekeln überschritten haben. Sie schwingen aber nicht mehr um dieselben festen Gleichgewichtslagen, sondern ändern diese allmählich, so daß bereits eine sehr kleine äußere Kraft ausreicht, um sie gegeneinander zu verschieben. Geht endlich ein Körper in den gasförmigen Zustand über, so verlassen seine Molekeln größtenteils das molekulare Wirkungsgebiet und haben nun das Bestreben, vermöge der Trägheit, geradlinig den Raum zu durchfliegen, etwa wie der Stein einer Schleuder, der nicht mehr durch den Faden nach einem festen Zentrum gezogen wird. Die Vorstellung einer geradlinigen, in den verschiedensten Richtungen fortschreitenden Bewegung der Gas-molekeln macht es verständlich, daß ein Gas den ihm dargebotenen Raum gleichmäßig zu erfüllen sucht und auf die benachbarten Körper insofern der fortgesetzten Stöße seiner Molekeln einen Druck ausübt.

7. Elastizität.

§ 67. § 67. Wenn wir einen Stahlstab nicht zu stark biegen, so nimmt er die ursprüngliche Form wieder an, sobald er sich selbst überlassen wird. Eine mäßig ausgedehnte Gummischnur verkürzt sich auf die alte Länge, wenn die Zugkraft nicht mehr wirkt. Körper, die sich ähnlich wie Stahl oder Gummi verhalten, heißen elastisch. Bis zu einem gewissen Grade kommt diese Eigenschaft allen Körpern zu, nur genügen bei denen, die man für gewöhnlich als unelastisch bezeichnet, wie das Blei, bereits sehr geringe Kräfte, um dauernde Formveränderungen hervorzurufen. Andererseits gibt es auch für sehr elastische Körper wie Stahl eine obere Grenze. Werden sie darüber hinaus beansprucht, so sind die Verschiebungen ihrer Teilchen nicht mehr vollkommen rückgängig zu machen. Bei allen Bau- und Maschinenkonstruktionen darf deshalb das verwendete Material höchstens bis zur Elastizitätsgrenze belastet werden, die man für verschiedene Stoffe durch Versuche ermittelt. Der größeren Sicherheit wegen werden praktisch nur Bruchteile der so gefundenen Maximalbelastung ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$) für zulässig angenommen.

§ 67a. § 67a. **Zug und Druck.** Ein Stab oder Draht, der an dem einen Endpunkt aufgehängt, an dem anderen durch Gewichte gespannt wird, erfährt eine Verlängerung λ , die innerhalb der Elastizitätsgrenze dem angehängten Gewicht P und der ursprünglichen Länge L direkt, dem Querschnitt Q aber umgekehrt proportional ist. Diese durch die Erfahrung festgestellten Gesetze werden durch die Gleichung $\lambda = \frac{1}{E} \cdot \frac{P}{Q} \cdot L$ wiedergegeben, wo $\frac{1}{E}$ einen nur vom Material abhängigen Faktor bezeichnet. Die

Gleichung gilt auch für die lineare Verkürzung λ , die ein Körper durch Druck erfährt. Man nennt die Größe E den Elastizitätsmodul. Er ist für Zug und Druck der gleiche. Da P , L , Q , λ der Messung zugänglich sind, so läßt sich E aus obiger Gleichung berechnen. Für $\lambda = L$ würde der Wert $E = \frac{P}{Q}$ folgen, d. h. der Elastizitätsmodul gibt diejenige auf die Querschnittseinheit entfallende Zugbelastung an, die einen Stab um die eigene Länge ausdehnen würde, falls dies innerhalb der Elastizitätsgrenze möglich wäre. — In der Technik ist es üblich, E in $\frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$ auszu- drücken. Hat man z. B. durch den Versuch gefunden, daß ein 1,94 m langer Messingdraht von 1,6 qmm Querschnitt durch eine Zugbelastung von 20 kg eine Verlängerung von 2,5 mm erfährt, so ergibt sich als Elastizitätsmodul $E = \frac{20}{1,6} \cdot \frac{1940}{2,5} = 9700 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$. Die Elastizitätsgrenze wird bei etwa $24 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$ erreicht, und eine Zugkraft von $70 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$ genügt, um den Draht sofort zu zerreißen. Die letztere Größe heißt die absolute Festigkeit. Unter rückwirkender Festigkeit versteht man die zur gewaltsamen Zerstörung des Materials durch Druck erforderliche Belastung. Sie beträgt für eine kurze Messingstange, bei der eine Durchbiegung ausgeschlossen ist, etwa $100 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$. Die angegebenen Zahlen sind nur rohe Durchschnittswerte, da man bei demselben Material je nach den verschiedenen Sorten beträchtlich abweichende Resultate erhält.

Das Gesetz, nach dem die Größe der Deformation innerhalb der Elastizitätsgrenze proportional der Belastung ist (Hooke 1679), läßt sich für Zug und Druck bequem an Spiralfedern aus Stahl oder Messing nachweisen, da bei ihnen bereits geringe Kräfte eine bedeutende Ausdehnung oder Verkürzung hervorrufen. Praktische Anwendung finden derartige Spiralen bei der Federwaage.

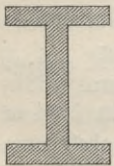
§ 67b. **Biegung.** Ein an dem einen Ende fest eingespannter, § 67b. horizontaler Balken (Fig. 83), dessen anderes Ende durch ein Gewicht P belastet ist, biegt sich unter dem Einfluß der Belastung. Dabei erfahren die Teilchen an der oberen, konvergen Seite ab eine Zerrung, die an der unteren, konkaven Seite eine Zusammendrängung. Innerhalb muß es deshalb eine Schicht cd geben, die weder ausgedehnt noch verkürzt wird, die sich also in einem neutralen Spannungszustande befindet. Während sich bei Zug oder Druck der Widerstand des Materials voll ausnutzen

Fig. 83.



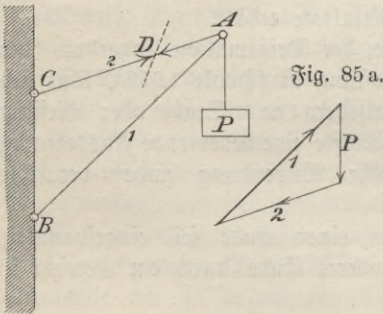
läßt, da alle Teilchen eines Querschnittes gleichmäßig gezogen oder gedrückt werden, ist dies nicht mehr möglich, sobald ein Körper mit vollen Querschnittsformen auf Biegung beansprucht wird. Den Balken (Fig. 83) kann man nur so weit belasten, daß die Spannungen in den oberen und unteren Schichten ein gewisses Maß nicht überschreiten. Dann wird aber die Tragfähigkeit der inneren Schichten nur zum kleinen Teil ausgenutzt. Wo es auf Materialersparnis oder auf Leichtigkeit der Konstruktion ankommt, gibt man deshalb den auf Biegung beanspruchten Trägern und Stützen eine hohle Querschnittsform. Die Natur bedient sich desselben Mittels, wie man an dem Bau der Knochen und Halme erkennt. Auch dadurch erlangt man eine günstigere Querschnittsform, daß man die Stellen größter Beanspruchung verstärkt. Ein Beispiel hierfür bietet der Doppel-T-Träger (Fig. 84).

Fig. 84.



Sobald es sich um größere Lasten handelt, ersetzt man den Tragbalken meistens durch ein System von Stäben, die an den Stellen, wo zwei zusammentreffen, durch Gelenkbolzen verbunden sind. Indem man die Belastung auf diese Knotenpunkte verteilt, werden die Stangen nur auf Druck und Zug, nicht aber auf Biegung beansprucht. Hängen wir die Last P nicht am Ende des Balkens Fig. 83 auf, sondern im Knotenpunkt A der Stangen 1 und 2 (Fig. 85), die sich außer bei A auch bei B und C um horizontale Gelenkbolzen drehen können, so werden dadurch

Fig. 85.



weder in 1 noch 2 Biegungsspannungen hervorgerufen. Denn nehmen wir an, die Stangen wären gewichtslos, und denken wir uns die eine, etwa 2, an irgend einem Punkte D durchgeschnitten, so würde an dem bisherigen Gleichgewichtszustand nichts geändert werden, wenn wir die Wirkung der unzerschnittenen Stange durch eine entsprechende Kraft an jeder Schnittfläche ersetzen. Die Richtung dieser Kräfte muß notwendig mit AC zusammenfallen,

da sonst eine Drehung um das Gelenk A oder C erfolgen würde. Daß 1 auf Druck, 2 auf Zug beansprucht wird, folgt aus dem Kräftedreieck Fig. 85a, aus dem sich auch die Größe der Spannungen ergibt. Da man in diesem Dreieck die Kraft P der Größe und Richtung nach kennt, 1 und 2 aber parallel den Stangen AB und AC sein müssen, so ist das Dreieck bestimmt. Die Längen der Seiten 1 und 2 geben die Größe der Spannungen an. Um ihre Richtungen zu finden, setzt man die Pfeile an 1 und 2 so, daß die Pfeilrichtungen aller drei Kräfte in demselben Sinne laufen (s. § 23 b Fig. 24).

Aufgabe. Welche Querschnitte müssen die schmiedeeisernen Stangen 1 und 2 (Fig. 85a) erhalten, wenn $AB = 3,5$ m, $AC = 2,6$ m, $BC = 1,6$ m und die größte Belastung $P = 2000$ kg beträgt? Als zulässige Spannung ist $6 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$ anzunehmen.

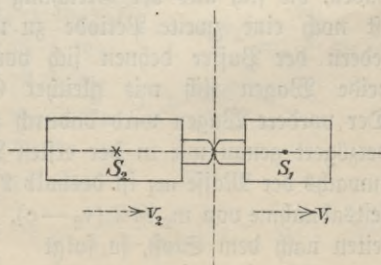
§ 67c. **Torsion.** Wenn man einen Draht, dessen oberes Ende § 67e festgeklemmt ist, an dem unteren Ende drückt, etwa mit Hilfe eines daran befestigten, horizontalen Stabes, so leistet er einen Widerstand. Es werden im Draht elastische Kräfte erregt, die ein Drehungsmoment ausüben, das dem der äußeren Kraft entgegenwirkt. Der Versuch ergibt, daß innerhalb weiter Grenzen der Winkel, um den der untere Querschnitt gegen den oberen verdreht wird, proportional dem Drehungsmoment der äußeren Kraft und der Länge des Drahtes wächst. Da dieser Winkel ferner der 4. Potenz des Drahthalbmessers umgekehrt proportional ist, so rufen bei dünnen Drähten bereits sehr kleine Kräfte beträchtliche Torsionen hervor. Man benutzt deshalb vielfach bei empfindlichen Meßapparaten dünne Drähte oder Fäden zur Aufhängung. In neuerer Zeit wendet man äußerst dünne Quarzfäden an (s. § 63), da diese eine sehr vollkommene Torsionselastizität zeigen.

Während Cavendish bei seinen Versuchen mit der Drehwaage (§ 56) Kugeln von 158 kg Masse auf Kugeln von etwa 0,8 kg Masse einwirken ließ, gelang es Boys (1889), der den metallenen Aufhängedraht des Wagebalkens durch einen Quarzfaden ersetzte, die Massenanziehung zwischen Kugeln von 800 Gramm auf Kugeln von 1 Gramm nachzuweisen und Kraftäufzungen zu messen, die noch nicht $6 \cdot 10^{-6}$ Dyn betragen.

8. Stoß.

§ 68. Die Vorgänge während des Stoßes sind der Beobachtung § 68. schwer zugänglich, da sie sich in außerordentlich kurzer Zeit abspielen. Die Erscheinungen vor und nach dem Stoß dagegen können leicht verfolgt werden, und die Gesetze, die sich auf diese Erscheinungen beziehen, lassen sich durch den Versuch prüfen. Diese Gesetze sind zuerst von Wallis, Wren, Huygens (1668 und 69) aufgestellt worden. Sie betreffen den Stoß vollkommen elastischer oder unelastischer Körper, gelten also genau genommen nur für diese Grenzfälle. Wir beschränken uns ferner auf die Betrachtung des geraden, zentralen Stoßes. Der Stoß ist ein zentraler, wenn die an der Berührungsstelle auf der Berührungsebene errichtete Senkrechte durch die Schwerpunkte der beiden Körper geht (Fig. 86). Fällt außerdem die Bewegungsrichtung mit jener Senkrechten zusammen, so heißt der Stoß gerade. Bei zwei Eisenbahnwagen, von denen der vordere sich mit der Geschwindigkeit v_1 , der zweite mit der

Fig. 86.



größeren Geschwindigkeit v_2 auf demselben Geleise in gleicher Richtung bewegt, mögen diese Voraussetzungen zutreffen. Sobald die Puffer des zweiten Wagens die des ersten berühren, entstehen an der Berührungsstelle Druckkräfte, die den vorderen Wagen beschleunigen, den stoßenden verzögern müssen. Wie auch jene Kräfte sich selbst ändern mögen, stets wird nach dem Gesetz von der Aktion und Reaktion (i. § 20) der Druck P , den die Masse m_2 des stoßenden Wagens auf die Masse m_1 des vorderen in einem bestimmten Augenblicke ausübt, gleich sein müssen dem von m_1 auf m_2 , so daß, wenn a_1 und a_2 die durch P erteilte Beschleunigung und Verzögerung bezeichnet, $P = m_1 a_1 = m_2 a_2$, also $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ ist. Die Bewegungsänderungen müssen so lange dauern, bis beide Wagen dieselbe Geschwindigkeit besitzen. In diesem Augenblick werden die spiralförmigen, stählernen Federn, mit denen die Puffer versehen sind, die größte Zusammenpressung erfahren haben. Würden wir jetzt auf irgend eine Weise die Federn verhindern sich wieder auszu dehnen, oder wären sie nicht aus Stahl, sondern aus Blei gefertigt, so könnte von diesem Augenblick an kein Druck zwischen den Wagen mehr stattfinden, sie würden sich mit der gemeinsamen Geschwindigkeit c weiterbewegen. Der vordere Wagen hätte dann während der ganzen Stoßdauer den Geschwindigkeitszuwachs $c - v_1$, der andere die Geschwindigkeitsabnahme $v_2 - c$ erfahren. Wie bereits gezeigt, verhalten sich aber die Geschwindigkeitsänderungen in einem beliebigen Zeittheilchen des Stoßes umgekehrt wie die Massen, deshalb müssen sich auch die gesamten Geschwindigkeitsänderungen so verhalten, es ist also

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2 - c}{c - v_1}$$

und $c = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \dots \dots \dots A)$

Beim Zusammenprall zweier Körper erfahren diese stets eine Formveränderung. Für die beiden Eisenbahnwagen besteht sie in der Zusammen drückung der Pufferfedern. Bei unelastischen Substanzen wie Blei, feuchtem Ton oder Sand ist die Deformation eine bleibende, und der Stoßvorgang ist beendet, sobald beide Körper dieselbe Geschwindigkeit angenommen haben, die sich aus der Gleichung A) bestimmt. Bei elastischen Körpern ist noch eine zweite Periode zu unterscheiden. Die stählernen Sprung federn der Puffer dehnen sich von dem Augenblick ab wieder aus, wo beide Wagen sich mit gleicher Geschwindigkeit weiterbewegen würden. Der vordere Wagen wird dadurch abermals beschleunigt und der stoßende verzögert genau wie in der ersten Periode. Der gesamte Geschwindigkeitszuwachs der Masse m_1 ist deshalb $2(c - v_1)$, und die gesamte Geschwindigkeitsabnahme von m_2 ist $2(v_2 - c)$. Sind nun c_1 und c_2 die Geschwindigkeiten nach dem Stoß, so folgt

$$c_1 = v_1 + 2(c - v_1) = 2c - v_1$$

$$c_2 = v_2 - 2(v_2 - c) = 2c - v_2,$$

und wenn wir für c den Wert $\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$ setzen,

$$c_1 = \frac{2 m_2 v_2 + v_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}$$

$$c_2 = \frac{2 m_1 v_1 + v_2 (m_2 - m_1)}{m_1 + m_2} \dots \dots \dots B)$$

Unelastische Körper bewegen sich nach dem Stoß mit der Geschwindigkeit

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

Wir schreiben diese Gleichung in der Form $m_1 v_1 +$

$$m_2 v_2 = m_1 c + m_2 c \text{ und erkennen:}$$

Die Summe der Bewegungsgrößen wird durch den Stoß nicht geändert. (S. § 22.)

Bei elastischen Körpern ist die Bewegungsgröße nach dem Stoß $m_1 c_1 + m_2 c_2 = m_1 (2c - v_1) + m_2 (2c - v_2) = 2c(m_1 + m_2) - (m_1 v_1 + m_2 v_2) = m_1 v_1 + m_2 v_2.$

Unser Satz gilt demnach auch für den elastischen Stoß.

§ 69. Die Gesetze vom Stoß und das Energieprinzip. Es § 69.

ist von Wichtigkeit, die Stoßgesetze auch vom Standpunkte des Energieprinzips auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Daß beim vollkommen elastischen Stoß die Summe der lebendigen Kräfte dieselbe bleiben muß, leuchtet ein, da die zuerst auf die Formveränderung verwendete Arbeit bei der elastischen Ausdehnung der Körper wieder vollständig in Bewegungsenergie umgesetzt wird. Es ergibt sich dies auch aus unseren Gleichungen. Die doppelte lebendige Kraft nach dem Stoß ist

$$m_1 c_1^2 + m_2 c_2^2 = m_1 (2c - v_1)^2 + m_2 (2c - v_2)^2 = 4c [c(m_1 + m_2) - (m_1 v_1 + m_2 v_2)] + m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2, \text{ d. h.}$$

Die Summe der Bewegungsenergie bleibt beim elastischen Stoß erhalten.

Die unelastischen Körper erleiden durch den Stoß eine dauernde Formveränderung, ein Teil ihrer kinetischen Energie geht deshalb für die Bewegung verloren. Vor dem Stoß ist ihre doppelte Energie:

$$2 E_V = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2,$$

nach dem Stoß

$$2 E_N = (m_1 + m_2) c^2 = \frac{(m_1 v_1 + m_2 v_2)^2}{m_1 + m_2} = m_1 v_1^2 \frac{m_1}{m_1 + m_2} + m_2 v_2^2 \frac{m_2}{m_1 + m_2} + \frac{2 m_1 m_2}{m_1 + m_2} v_1 v_2, \text{ mithin}$$

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

Der Verlust beträgt also $E_V - E_N = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_2 - v_1)^2.$ Dieser

Teil wird verwendet, die Deformationsarbeit zu leisten, wobei Wärme entwickelt wird. (S. § 137—139.)

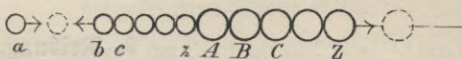
Die abgeleiteten Gleichungen gelten auch dann, wenn die Geschwindigkeit v_1 des einen Körpers Null oder entgegengesetzt der des anderen ist. Im letzteren Falle ist v_1 mit dem negativen Vorzeichen zu verstehen.

§ 70. § 70. Besondere Fälle und ihre Anwendungen. 1. Ist die gestoßene Masse m_1 anfänglich in Ruhe und im Vergleich zu der stoßenden als unendlich groß anzusehen, so folgt für elastische Körper aus den Gleichungen B) des § 68 $c_1 = 0$, $c_2 = -v_2$. Eine Kugel aus Elfenbein, die man auf eine feste, harte Unterlage, z. B. eine Marmorplatte, fallen läßt, springt fast zur ursprünglichen Höhe zurück. Die Abplattung, die sie während des Stoßes erfährt, läßt sich dadurch sichtbar machen, daß man die Marmorplatte mit Ruß schwärzt. Die vorsichtig auf die Platte gelegte Kugel trägt beim Abheben einen kleinen schwarzen Kreis. Läßt man sie aber herabfallen, so zeigt sich an der zurückspringenden und wieder völlig runden Kugel ein schwarzer Fleck von erheblich größerer Ausdehnung.

2. Für zwei gleiche Massen ergeben die Gleichungen B) $c_1 = v_2$ und $c_2 = v_1$, die Körper setzen ihre Bewegung also mit vertauschten Geschwindigkeiten fort. War die Masse m_1 vor dem Stoß in Ruhe, so wird $c_2 = 0$ und $c_1 = v_2$, die stoßende Masse m_2 gibt dann ihre ganze Energie an die gestoßene m_1 ab und kommt zur Ruhe, während m_1 die Bewegung mit der Geschwindigkeit v_2 aufnimmt. Dasselbe findet statt, wenn unmittelbar nach dem Stoß m_1 auf eine dritte gleich große, ruhende Masse trifft, diese auf eine vierte usw. Der Stoß pflanzt sich so fast augenblicklich und ungeschwächt durch die ganze Reihe der Massen fort bis zur letzten, die sich allein mit der ursprünglichen Geschwindigkeit v_2 weiterbewegt. Man kann sich hiervon überzeugen, wenn man eine Anzahl gleich großer Elfenbeinkugeln in einer geraden Linie an Fäden aufhängt (Mariottesche Maschine). Läßt man nicht eine, sondern von vornherein 2 Kugeln mit der Geschwindigkeit v_2 auf eine solche Kugelreihe stoßen, so kommen beide stoßenden Kugeln zur Ruhe, der Stoß pflanzt sich wiederum durch alle übrigen fort, und es bewegen sich die beiden letzten Kugeln mit der Geschwindigkeit v_2 weiter. Diese Versuche sind insofern von Wichtigkeit, als sie uns eine Vorstellung geben, wie in einem elastischen Mittel sich eine Erschütterung mit großer Geschwindigkeit ausbreiten kann, ohne daß die einzelnen Theilchen des Mittels selbst eine merkliche Bewegung ausführen. Wir erfahren ferner aus diesen Stoßversuchen, daß eine Bewegung niemals rückwärts schreiten kann, solange das Mittel gleichartig bleibt. Was muß aber geschehen, wenn die Bewegung an die Grenze zweier verschiedenen Mittel gelangt? Auch dies läßt sich in anschaulicher Weise durch den Stoß demonstrieren. Eine elastische Kugel von der Masse m_1 , die mit der Geschwindigkeit v_1 auf eine ruhende Kugel von der doppelten Masse stößt, erteilt dieser nach den Gleichungen B) § 68 die

Geschwindigkeit $c_2 = \frac{2}{3} v_1$ und bewegt sich selbst nach dem Stoß mit der Geschwindigkeit $c_1 = -\frac{v_1}{3}$, also entgegengesetzt ihrer ursprünglichen Richtung. Wir hängen nun 2 Reihen von elastischen Kugeln in einer geraden Linie auf. Jede Kugel der einen Reihe habe die Masse m_1 , jede der zweiten Reihe die Masse $2m_1$. Wir erteilen der ersten Kugel a (Fig. 87) die Geschwindigkeit v_1 . Sie gibt durch Stoß ihre ganze Energie an b ab, diese an c auf, bis die letzte Kugel z dieser Reihe auf die Kugel A der zweiten Reihe trifft. Ein Teil der Energie des Stoßes geht jetzt auf diese Reihe über, und die letzte Kugel Z wird endlich mit der Geschwindigkeit $\frac{2}{3} v_1$ abgestoßen. Der Rest der Stoßenergie aber pflanzt sich durch den Anprall, den z an A erfahren hat, rückwärts in der ersten Reihe fort und erreicht die Kugel a, die mit der Geschwindigkeit $\frac{1}{3} v_1$ zurückspringt. Wir schließen hieraus:

Fig. 87.



Gelangt eine Bewegung an die Grenze zweier elastischen Mittel, so geht nur ein Teil der Bewegung in das zweite Mittel über, der Rest wird reflektiert.

Aufgabe. Was geschieht, wenn man bei obiger doppelten Kugelreihe (Fig. 87) die Kugel Z als stoßende benützt?

3. Wir betrachten noch zwei besondere Fälle beim unelastischen Stoß, die von praktischer Bedeutung sind. Wenn die gestoßene Masse m_1 anfänglich in Ruhe ist, so folgt aus Gleichung A) § 68 für die gemeinsame

Geschwindigkeit $c = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_2$. Der durch den Stoß bedingte Verlust $E_V - E_N$ an lebendiger Kraft ist dann gleich

$$\frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} v_2^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \cdot \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

und der übrigbleibende Teil $E_N = \frac{c^2}{2} (m_1 + m_2) = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2}$,

demnach $\frac{E_N}{E_V - E_N} = \frac{m_2}{m_1}$.

Je nach der Wirkung, die man durch den Stoß erzielen will, wird man die stoßende Masse m_2 möglichst groß im Verhältnis zu der gestoßenen m_1 wählen oder umgekehrt. Im ersten Falle ist die nach dem Stoß noch zur Verfügung stehende Energie E_N möglichst groß im Verhältnis zu der durch die Formveränderung verbrauchten $E_V - E_N$. Das ist günstig beim Einschlagen eines Nagels, beim Einrammen eines Pfahles, kurz überall da, wo nach dem Stoß noch ein Widerstand auf einer gewissen Strecke zu überwinden ist. Soll dagegen der gestoßene Körper eine möglichst große Formveränderung erfahren, wie z. B. beim Schmieden eines glühenden Stückes Eisen, so muß m_1 möglichst groß im Vergleich zu der stoßenden Masse m_2 sein. Deshalb legt man das zu schmiedende Stück auf einen schweren Amboss.

Aufgaben. 1. Ein Dampfhammer wiegt 900 kg und trifft mit einer Geschwindigkeit von 6 m sec^{-1} auf das zu schmiedende Stück Eisen. Welcher Teil der Energie bewirkt die Formveränderung, wenn Umboß und Schmiedestück zusammen 63000 kg schwer sind? Wieviel Prozent der aufgewandten Energie beträgt die Nutzarbeit? 2. Ein 1000 kg schwerer Rammkloß fällt 3 m herab und trifft auf einen Pfahl, der 600 kg wiegt. Wie groß ist die Energie, mit der der Rammkloß aufschlägt? Welcher Teil dieser Energie dient zum Eintreiben des Pfahles, welcher zur Zusammendrückung des Pfahlkopfes? Wie groß ist der mittlere Widerstand, den der Erdboden dem Eindringen entgegensetzt, wenn der Pfahl durch einen Schlag 0,02 m tief eingetrieben wird?

9. Reibung.

§ 71. § 71. Reibung entsteht, wenn ein sich bewegender Körper mit einer Fläche in Berührung ist, die nicht vollständig an seiner Bewegung teilnimmt. Die Reibung wird hauptsächlich durch Unebenheiten der aufeinander gleitenden Flächen verursacht. Auch die bestgeschliffenen Oberflächen zeigen noch kleine Erhöhungen und Vertiefungen, die ineinandergreifend ein Hindernis für die Bewegung bilden. Bei Überwindung des Reibungswiderstandes werden die kleinen Erhöhungen entweder verbogen oder abgerissen. Diese Arbeit muß von einem Teil der bewegenden Kraft geleistet werden, und

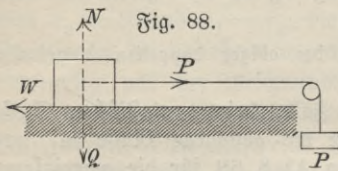


Fig. 88.

erst der übrigbleibende Teil beschleunigt den Körper. Ist der letztere Anteil Null, die bewegende Kraft also gerade so groß wie der Reibungswiderstand, so muß sich ein Körper mit der ihm einmal erteilten Anfangsgeschwindigkeit gleichförmig weiterbewegen. Man kann demnach den Reibungswiderstand experimentell bestimmen etwa in der Weise, wie das die Fig. 88 andeutet, indem man allmählich die Zugkraft P vergrößert, bis bei einem Anstoß der Körper sich gleichförmig bewegt.

Anstatt durch Gewichtsstücke die Zugkraft hervorzurufen, kann man auch das Gewicht des Körpers selbst als bewegende Kraft benutzen und durch Steilerstellen der ebenen Unterlage die herabtreibende Komponente des Körpergewichts so lange vergrößern, bis bei einem Anstoß ein gleichförmiges Gleiten eintritt. Ist der so ermittelte Neigungswinkel μ und das Gewicht des Körpers Q , dann wirkt parallel der schiefen Ebene die Komponente $Q \sin \mu$, die gleich dem Reibungswiderstande sein muß. Aus derartigen Versuchen hat sich ergeben:

1. Der Reibungswiderstand ist proportional dem senkrechten Druck auf die Unterlage;
2. er ist um so geringer, je härter und glatter die aufeinander gleitenden Flächen sind;
3. er ist unabhängig von der Größe der sich berührenden Flächen und innerhalb gewisser Grenzen auch von der Geschwindigkeit der Bewegung.

Bezeichnen wir den Reibungswiderstand mit W , den Normaldruck mit N , so können wir nach 1. setzen $W = f N$, wo f einen Zahlenfaktor bedeutet, der mit der Natur der reibenden Flächen sich ändert und Reibungskoeffizient genannt wird. Unter der Voraussetzung möglichst glatter Flächen ist

f für Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen	0,14,
„ Messing auf Gußeisen	0,19,
„ Eichenholz auf Eichenholz längs der Fasern	0,48,
„ „ „ „ bei gekreuzten Fasern	0,32.

Da bei den Versuchen auf der schiefen Ebene der Normaldruck $N = Q \cos \mu$ ist, so muß $W = f Q \cos \mu$ sein. Andererseits muß aber $W = Q \sin \mu$ sein, woraus folgt $f = \tan \mu$.

Für Schmiedeeisen auf Schmiedeeisen ist $\mu = 8^\circ$.

Von der bisher betrachteten gleitenden Reibung ist die wälzende zu unterscheiden, die dann auftritt, wenn ein Körper über den anderen fortrollt, so daß immer neue Punkte zur Berührung gelangen. Die wälzende Reibung ist viel geringer als die gleitende. Man bedient sich deshalb zur Fortbewegung schwerer Lasten untergelegter Walzen. Hieraus hat sich wahrscheinlich die Erfindung des Wagenrades entwickelt, bei dem am Achsenlager gleitende Reibung stattfindet, wo sie durch Anwendung glatter Flächen und durch Benutzung geeigneter Schmiermittel sehr vermindert werden kann, während am Umfange des Rades hauptsächlich wälzende Reibung vorhanden ist. Auf einer guten horizontalen Landstraße beträgt für einen Lastwagen die nötige Zugkraft etwa $\frac{1}{20}$ der Last, bei Eisenbahnen nur $\frac{1}{200}$.

In vielen Fällen ist uns die Reibung sehr erwünscht; man sucht sie daher zu vermehren, z. B. Keile, mit denen man Holzklöße spalten will, werden mit Kreide bestrichen. Im Winter streut man Sand oder Asche auf den Weg. Gäbe es keine Reibung, so würden wir gar nicht imstande sein zu gehen, am wenigsten bergauf, wir würden keinen Gegenstand mit den Händen festhalten, keinen Knoten knüpfen können, u. dgl. mehr.

Aufgaben. 1. Beweise, daß zur gleichförmigen Hinaufbewegung einer Last Q auf einer um den Winkel α geneigten Bahn die Kraft $P = Q (\sin \alpha + f \cos \alpha) = Q \frac{\sin(\alpha + \mu)}{\cos \mu}$ nötig ist, daß dagegen die Kraft $P = Q (\sin \alpha - f \cos \alpha)$ ausreicht, um eine im Hinabgleiten begriffene Last vor beschleunigter Bewegung zu schützen.

2. Man bestimme das Reibungsgewicht f , das man bei der Atwoodschen Maschine zum Übergewicht hinzufügen muß, um eine scheinbar reibungslose, nur durch das Übergewicht verursachte Bewegung zu erhalten. Auflösung. Man lege auf eine der beiden gleichen Massen ein hinreichendes Zusatzgewicht von z Gramm, so ist die Bewegung vor dem Abheben von z eine gleichförmig beschleunigte mit der Beschleunigung $a = g \frac{z - f}{Q}$, wenn mit Q das Gesamtgewicht aller bewegten Massen bezeichnet wird.

Nach dem Abheben von z ist die Bewegung gleichförmig verzögert. Sieht man davon ab, daß im zweiten Teil der Bewegung die Gesamtmasse um z kleiner ist als

im ersten Teil, so beträgt die Verzögerung $a^1 = g \frac{f}{Q}$. Der Weg für die beschleunigte Bewegung sei s cm, und nach weiteren s^1 cm höre die Bewegung auf. Für die Geschwindigkeit im Augenblick des Abhebens hat man dann $v^2 = 2as = 2a^1s^1$, demnach $\frac{s^1}{s} = \frac{a}{a^1} = \frac{z-f}{f}$ und $f = \frac{s}{s+s^1}z$.

3. Legt man auf eine der beiden gleichen Massen der Atwoodschen Maschine ein Zusatzgewicht von z Gramm, auf die andere ein kleineres von z^1 Gramm, und läßt sich das größere an einer bestimmten Stelle der Maschine bei der Bewegung nach unten abnehmen und bei der Bewegung nach oben wieder auflegen, so wechseln die beschleunigten und die verzögerten Bewegungen mehrere Male hintereinander ab. Warum wiederholen sie sich nicht ohne Ende?

B. Flüssige Körper.

Alle Gleichgewichts- und Bewegungsgesetze, die für feste Körper gelten und bei denen der Zusammenhang der Teile außer Betracht bleibt, z. B. die Fallgesetze, gelten auch für die flüssigen Körper. Es brauchen also hier nur die Erscheinungen betrachtet zu werden, bei denen die leichte Verschiebbarkeit der Teile von Einfluß ist (s. § 61 und 66).

1. Oberfläche einer Flüssigkeit.

§ 72. § 72. Die Oberfläche einer ruhenden Flüssigkeit ist eine wagerechte Ebene, oder genauer eine Kugelfläche, deren Mittelpunkt der Mittelpunkt der Erde ist.

In Gefäßen, überhaupt bei kleiner Oberfläche der Flüssigkeit, wo man die Richtungen der Schwerkraft für die einzelnen Flüssigkeitsteilchen als parallel annehmen kann, ist die Oberfläche eine wagerechte Ebene. Denn gesetzt, es befände sich (Fig. 89) auf der Oberfläche der Flüssigkeit eine

Fig. 89.



Erhöhung $cabf$, so würden die Teile über ab in lotrechter Richtung auf die zwischen ab und cf liegenden drücken, und diese würden nach beiden Seiten hin ausweichen. (Eine solche Erhöhung entsteht bisweilen, wenn man dem Gefäße einen Stoß gibt.) Die Oberfläche einer Flüssigkeit kann also keine Erhöhung behalten. — Beweise in derselben Art, daß sie keine Vertiefung behalten kann, wenn durch irgend eine Veranlassung eine solche entstanden ist, und daß die Oberfläche keine schiefe Ebene sein kann. An den Rändern der Gefäße ist die Richtung der Oberfläche wegen der Kapillanzanziehung eine etwas andere.

Alle größeren Wasserflächen, z. B. die Oberflächen der Seen und der Meere, sind Kugelflächen, deren Mittelpunkt der Mittelpunkt der Erde ist. Sie stehen in allen ihren Punkten auf der Richtung der Schwerkraft senkrecht. Denn ist die freie Oberfläche in irgend einem Punkte nicht senkrecht zur wirkenden Kraft, so bringt diese eine Bewegung hervor.

Aus demselben Grunde bilden frei fallende Flüssigkeitsteilchen in Folge der Kohäsion kugelförmige Tropfen.

Die Oberfläche des ruhenden Wassers heißt Wasserspiegel, Niveau.

Die Oberfläche der Flüsse ist eine schiefe Ebene.

2. Fortpflanzung des Druckes.

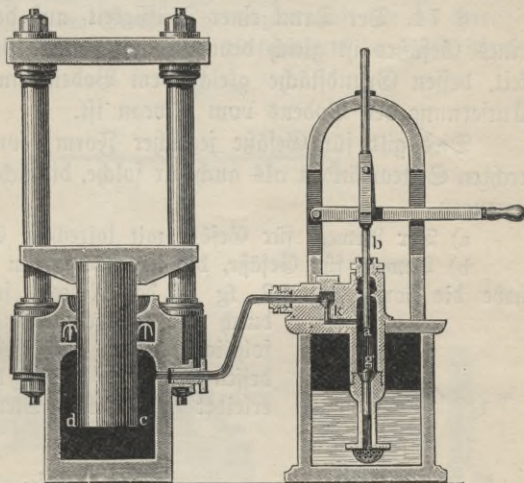
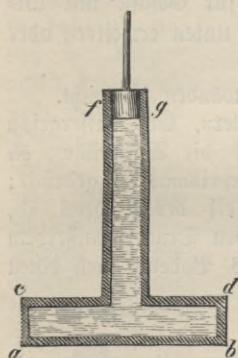
§ 73. Erfahrungssatz. Ist eine Flüssigkeit von allen Seiten eingeschlossen, und wird auf eine Stelle ein Druck ausgeübt, so pflanzt sich dieser gleichmäßig fort, d. h. jeder Teil der Umfassungswände, sowie jede Flüssigkeitsschicht, die gleiche Größe mit der gedrückten Stelle hat, erleidet auch den gleichen Druck wie diese, abgesehen von den etwaigen sonst noch vorhandenen Druckkräften.

Wird das in dem Gefäße *abcd* (Fig. 90) eingeschlossene Wasser durch den Kolben *fg* mit einer Kraft von 10 kg gedrückt, und ist die Grundfläche des Kolbens = 1 qdm, so erleidet jedes qdm der Umfassungswände einen Druck von 10 kg.

Ist eine Flasche so zugespöpft, daß der Pfropf auf die darin befindliche Flüssigkeit stößt, oder daß

Fig. 91.

Fig. 90.



nur ein wenig Luft dazwischen ist, so bedarf es nur eines geringen Schlags auf erstere, um die Flasche zu zersprengen.

Die hydraulische Presse (Fig. 91) besteht aus einer weiten und einer engen Röhre, die durch eine dritte in Verbindung stehen und in deren jeder sich ein Kolben befindet. Wird der Kolben *ab* mit einer Kraft von 50 kg nach unten gedrückt, und hat der Kolben *ed* eine *n* mal so große Grundfläche als *ab*, so erleidet *ed* einen Druck von 50 *n* kg nach oben.

Da aber durch ein einmaliges Niederdrücken des Kolbens *ab* der Kolben *ed* sich nur sehr wenig in die Höhe bewegt, so ist die engere Röhre in ein Saugrohr verlängert, das in einem Gefäße mit Wasser steht, und bei *g* und *k* sind Ventile angebracht. Was geschieht nun bei öfterem Auf- und Niederdrücken des Kolbens *ab*? (Siehe § 91, 8.)

Zusammendrückbarkeit. Aus dem oben angeführten Versuche erkennt man außer der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes noch die Eigentümlichkeit der flüssigen Körper, daß sie sich fast gar nicht zusammendrücken lassen.

Durch genaue Versuche hat Regnault gefunden, daß, wenn z. B. das Gefäß (Fig. 90) Wasser enthält und auf den Kolben ein Druck ausgeübt wird, der gleich ist dem Gewichte einer Quecksilbersäule, die 76 cm hoch und deren Grundfläche gleich der des Kolbens ist, das Wasser um 50 Milliontel seines Volumens zusammengedrückt wird, Quecksilber um 3 Milliontel. Hört der Druck zu wirken auf, so nehmen die Flüssigkeiten wieder genau ihr altes Volumen an, sie besitzen eine vollkommene Elastizität des Volumens.

Aus dem Gesetze der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes ergibt sich die Stärke des Druckes, den eine Flüssigkeit auf den Boden und die Seitenwände ausübt.

3. Bodendruck.

§ 74. § 74. Der Druck einer Flüssigkeit auf den horizontalen Boden eines Gefäßes ist gleich dem Gewichte eines Prismas aus dieser Flüssigkeit, dessen Grundfläche gleich dem Boden und dessen Höhe gleich der Entfernung des Bodens vom Niveau ist.

Dies gilt für Gefäße jeglicher Form, sowohl für Gefäße mit lotrechten Seitenwänden als auch für solche, die sich nach unten erweitern oder verengen.

a) Der Beweis für Gefäße mit lotrechten Seitenwänden ist leicht.

b) Beweis für Gefäße, die sich nach unten erweitern. Ein Wassergefäß habe die Form Fig. 92, fg sei das Niveau, so wird die Wasseroberfläche eh durch die Schwere des Wasserprismas ef gedrückt; folglich erleidet auch jeder Teil des Bodens ab, dessen Größe = eh ist, denselben Druck. Außerdem erleidet jede solche Stelle des Bodens noch einen

Fig. 92.

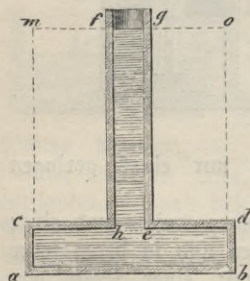


Fig. 93.

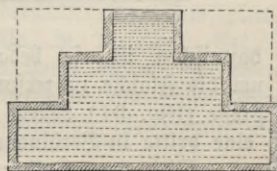
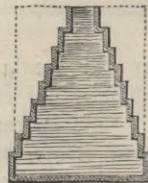


Fig. 94.



Druck durch die Schwere des in abde befindlichen Wassers, also noch einen Druck gleich der Schwere eines Wasserprismas, dessen Grundfläche = ab und dessen Höhe = bd ist usw.

Anmerkung. In gleicher Weise läßt sich zeigen, daß die Stelle de einen Druck erleidet, der gleich der Schwere eines Flüssigkeitsprismas ist, dessen Grundfläche = de und dessen Höhe = eg ist.

Ebenso läßt sich der Satz für Gefäße von der Form, wie sie Fig. 93 darstellt, beweisen. Gefäße, die sich allmählich nach unten erweitern, können als solche betrachtet werden, deren Seitenwände unendlich viele solche Abstufungen haben, wie das vorangehende deren zwei hat (Fig. 94).

c) Beweis für Gefäße, die sich nach unten verengen. In dem Gefäße (Fig. 95) wird das Wasserprisma abef von der Fläche ab getragen, und nur das Prisma chdg drückt mit seiner Schwere auf den Boden dg des Gefäßes.

Gefäße, deren Wände sich allmählich nach unten verengen, können als solche betrachtet werden, deren Wände unendlich viel solche Abstufungen haben (Fig. 96).

Daß der Bodendruck nur von der Größe des Bodens und seiner Entfernung vom Niveau, nicht von der Form des Gefäßes abhängig ist, läßt sich durch den sogenannten Pascalschen Apparat (Fig. 97) bestätigen. Das zylindrische Glasgefäß G ist auf ein Stativ a geschraubt und hat als beweglichen Boden eine eben geschliffene, horizontale Metallplatte b; diese hängt an einem Drahte,

der an dem einen Arme einer Wage so befestigt ist, daß der Wagebalken horizontal steht, wenn b die Öffnung von G schließt. Erhöht man nun durch Auflegen von Gewichten auf die andere Schale der Wage den Druck der Platte b gegen G, so kann man bei vorsichtigem Ein-

gießen G bis zu einer gewissen Höhe mit Wasser füllen. Die aufgelegten Gewichte halten dem Druck des Wassers (und dem Gewicht der Platte b) das Gleichgewicht. Läßt man dann das Wasser durch Niederdrücken des Bodens b ab und schraubt statt G Gefäße von der Form H und J auf, so halten dieselben Gewichte einer ebenso hohen Wassersäule in H und J das Gleichgewicht.

Hiernach ist der Bodendruck in Gefäßen mit lotrechten Seitenwänden ebenso groß, in unten sich erweiternden Gefäßen größer, in unten sich verengenden Gefäßen kleiner als das Gewicht der darin befindlichen Flüssigkeitsmenge.

Fig. 95.

Fig. 96.

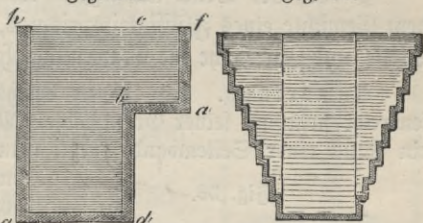
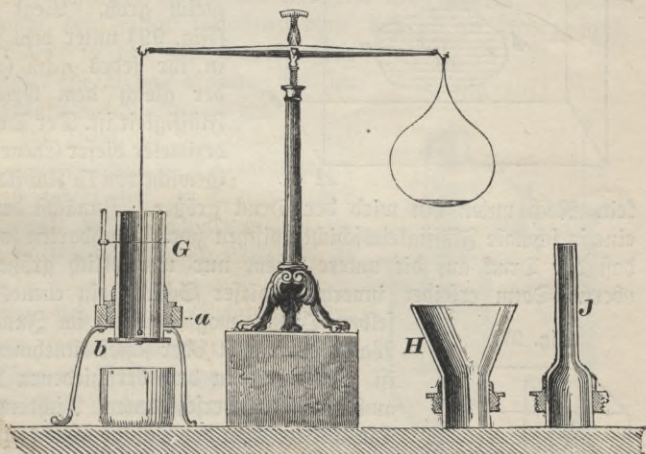


Fig. 97.



Daraus scheint hervorzugehen, daß man, um eine Flüssigkeit in einem sich nach unten erweiternden Gefäße zu tragen, mehr Kraft anwenden müsse, als das Gewicht der Flüssigkeit beträgt. Warum ist das nicht der Fall?

4. Seitendruck.

§ 75. § 75. Der Druck auf irgend eine Stelle der Seitenwand ist gleich dem Gewichte eines Flüssigkeitsprismas, das zur Grundfläche die gedrückte Stelle und zur Höhe die Entfernung ihres Schwerpunktes vom Niveau hat.

Anmerkung. Es ist zu beachten, daß die Höhe eines Prismas senkrecht steht auf seiner Grundfläche. Man erhält also den Druck auf irgend ein Stück einer Seitenwand, wenn man sich dieses um seinen Schwerpunkt in wagerechte Lage gedreht und auf ihm die bis ans Niveau reichende lotrechte Flüssigkeitssäule ruhend denkt.

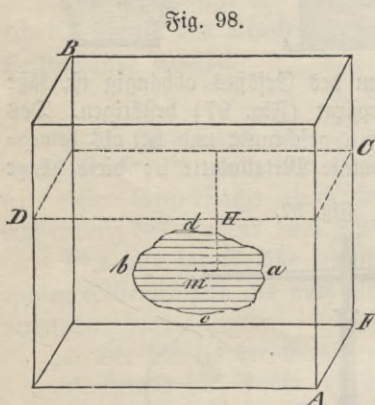


Fig. 98.

(Fig. 98.) AB sei ein Gefäß mit einer Flüssigkeit, deren Niveau CD. Denkt man sich innerhalb der Flüssigkeit irgend eine wagerechte Ebene, so ist in allen ihren Punkten der Druck gleich groß. Liegt sie h Dezimeter (Fig. 99) unter dem Niveau, so erfährt in ihr jedes qdm (abef) einen Druck, der gleich dem Gewicht von h edm Flüssigkeit ist. Der Druck auf f Quadratdezimeter dieser Ebene ist also gleich dem Gewicht von fh Kubikdezimetern Flüssigkeit.

Nach unten hin wird der Druck größer. Zunächst denke man sich aber eine so schmale Flüssigkeitsschicht zwischen zwei benachbarten wagerechten Ebenen, daß der Druck auf die untere Ebene nur unmerklich größer ist als auf die obere. Dann erleidet innerhalb dieser Schicht ein ebenes Flächenstück denselben Druck, mag man es im Innern oder an der

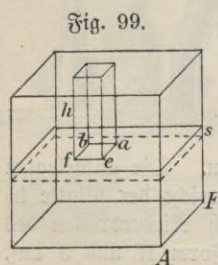


Fig. 99.

Wand, wagerecht oder schief annehmen, denn der Druck ist nicht nur in den verschiedenen Punkten, sondern auch in den verschiedenen Richtungen gleich stark. Die Grenzebenen der Schicht schneiden auf einer Seitenwand einen schmalen Streifen s heraus. Hat irgend ein Stück dieses Streifens f Quadratdezimeter Inhalt, so erleidet es also einen Druck gleich dem Gewicht von fh Kubikdezimetern Flüssigkeit.

Um den Druck auf eine beliebige Fläche der Seitenwand FB, etwa auf $abce$ (Fig. 98) zu bestimmen, denken wir uns diese Fläche durch horizontale Linien in sehr schmale Streifen von $f_1, f_2, f_3 \dots$ qdm geteilt. Sind $h_1, h_2, h_3 \dots$ die Abstände der Streifen von der Flüssigkeitsoberfläche, dann ist der Druck auf die Fläche $abce$ gleich dem Gewicht von $f_1 h_1 + f_2 h_2 + \dots = \sum f_i h_i$ Kubikdezimetern Flüssigkeit. Nach der Lehre vom Schwerpunkt (§ 27) kann

man den Ausdruck $\Sigma f_i h_i$ durch das Produkt FH ersetzen, wenn F den Inhalt der Fläche $adbc$ und H den Abstand ihres Schwerpunktes m vom Niveau bezeichnet.

Der Druck auf die Seitenwände eines Gefäßes ist also unabhängig von dessen Weite. Die Gesetze über Boden- und Seitendruck lassen sich hiernach so zusammenfassen:

Jeder Teil der Umfassungswände eines Gefäßes erleidet von der darin befindlichen Flüssigkeit einen Druck, der gleich ist der Schwere eines Flüssigkeitsprismas, dessen Grundfläche gleich der gedrückten Stelle und dessen Höhe gleich der Entfernung ihres Schwerpunktes von dem Niveau ist.

Erkläre die Wirkungsweise des Segner'schen Wasserrades (Fig. 100).

Das Gesetz gilt auch für die Flächen eines jeden in eine Flüssigkeit getauchten Körpers und für jede Flüssigkeitsschicht.

Wird die abgeschliffene Glasplatte ab (Fig. 101) mittelst des Fadens C an den Glaszylinder B gedrückt und nun der Zylinder in Wasser getaucht, so kann man den Faden loslassen, ohne daß ab zu Boden sinkt. Gießt man dann Wasser in den Zylinder, so sinkt ab , wenn das Wasser in B das Niveau des im Gefäß befindlichen Wassers fast erreicht hat.

Wie groß ist der Druck auf den Boden eines Rahnes, wenn sein Flächeninhalt $= q$ Quadratmeter ist und der Rahn h Meter tief im Wasser geht? Die Seetiere, die Leute in den Taucherglocken erleiden einen desto stärkeren Druck, je tiefer sie im Wasser sind.

Hieraus lassen sich nun Erscheinungen erklären, die eintreten, wenn man zwei mit Flüssigkeiten gefüllte Gefäße in Verbindung setzt, zweitens, wenn man in den Boden oder die Seitenwand eines Gefäßes eine Öffnung macht, und drittens, wenn man einen festen Körper in eine Flüssigkeit taucht.

Fig. 100.

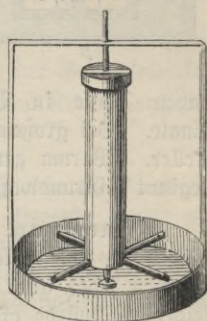
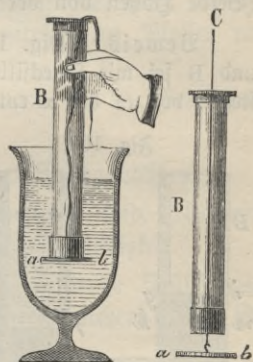


Fig. 101.

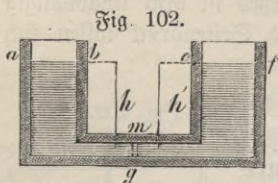


5. Kommunizierende Gefäße.

§ 76. Gefäße, die so in Verbindung stehen, daß eine Flüssigkeit § 76. aus dem einen in das andere fließen kann, heißen kommunizierende Gefäße.

a) Enthalten kommunizierende Gefäße eine einzige Flüssigkeit, so liegen die freien Flüssigkeitsoberflächen in ein und derselben wagerechten Ebene.

Beweis. *ab* und *cf* (Fig. 102) seien die beiden freien Oberflächen, *mg* eine Flüssigkeitsschicht in der Verbindungsröhre; deren Schwerpunkt sei von *ab* um *h*, von *cf* um *h'* entfernt, so ist der Druck auf die eine Seite von $mg = mg \cdot h$, auf die andere Seite $= mg \cdot h'$. Da nun die Flüssigkeit im Gleichgewicht ist, so muß $mg \cdot h = mg \cdot h'$ sein, folglich $h = h'$.



Wasserleitungen. Standmesser sind gläserne Röhren, die an Gefäße angesetzt sind, um den Stand der Flüssigkeiten in ihnen zu erkennen. Standbrunnen, in denen das Wasser stets dieselbe Höhe hat, stehen gewöhnlich mit einem

nahen Flusse in Verbindung, z. B. der Solbrunnen in Halle mit der Saale. Bei großem Wasser füllen sich die in der Nähe der Flüsse liegenden Keller. Warum gewöhnlich erst dann, wenn das Wasser im Flusse zu fallen beginnt? Grundwasser auf Wiesen, die durch Dämme geschützt sind.

Anmerkung. Im obigen Satz ist vorausgesetzt, daß die freien Oberflächen *ab* und *cf* keinen oder in jedem qdm denselben Druck erleiden. Würde dagegen jedes qdm der Fläche *ab* einen Überdruck von *k* Kilogramm erleiden, so würde *cf* so viel höher stehen als *ab*, daß eine lotrechte Flüssigkeitssäule von 1 qdm Grundfläche zwischen den beiden Ebenen *ab* und *cf* das Gewicht von *k* Kilogramm hat.

b) Befinden sich in kommunizierenden Gefäßen verschiedene Flüssigkeiten, so ist die lotrechte Höhe der spezifisch leichteren *n* mal so groß, wenn ihr spezifisches Gewicht *n* mal so klein ist als das der anderen. (Beide Höhen von der gemeinsamen Berührungsfläche aus gemessen.)

Beweis. (Fig. 103.) Die Verbindungsröhre der beiden Gefäße *A* und *B* sei mit Quecksilber gefüllt, das in dem Gefäß *A* bis *cf*, in *B* bis *gi* stehe; von *cf* bis *x* enthalte das Gefäß *A* Sole. Denkt man sich die Ebene *cf* bis zum Gefäße *B* erweitert, so steht das Quecksilber unter *cf* und *km* im Gleichgewicht (nach Gesetz a). Der Druck der Sole auf die Fläche *cf* beträgt, wenn ihre Größe *q* Quadratdezimeter, ihre Entfernung von *x* gleich *h* Dezimeter, das spezifische Gewicht der Sole $= s$, das Gewicht eines Kubikdezimeters Wasser $= 1$ kg ist, *qhs* Kilogramm.

Dieser Druck pflanzt sich gleichmäßig auf die Fläche *km* fort. Er beträgt also auf diese, wenn sie *r* mal so groß ist als *cf*, *rqhs* Kilogramm. Der Druck der Quecksilbermenge *ki* auf *km* beträgt aber, wenn die Entfernung zwischen *km* und *gi* gleich *H* Dezimeter und das spezifische Gewicht des Quecksilbers *ns* ist, *rqHns* Kilogramm. Sollen nun die Flüssigkeiten in Ruhe sein, so muß der Druck auf die Fläche *km* von unten und von oben derselbe sein. Es muß also sein:

$$\begin{aligned} rqhs &= rqHns, \\ \text{d. i. } h &= n \cdot H, \end{aligned}$$

Beide Gesetze gelten, mögen die Gefäße von gleicher oder ungleicher Weite sein, mögen sie vertikal oder schief stehen. Denn die Beweise für beide Gesetze sind ohne Rücksicht auf ihre Stellung, der erste Beweis auch ohne Rücksicht auf ihre Weite geführt; in dem Beweise für das zweite ist aber die Weite durch allgemeine Zahlzeichen ausgedrückt; also ist auch hier die Weite als beliebig angenommen.

6. Gesetze des Ausfließens.

§ 77. Torricellis Theorem: Durch eine Öffnung des Bodens oder § 77. der Seitenwand eines Gefäßes fließt die Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit aus, die ein vom Niveau bis zur Öffnung frei fallender Körper erreicht;

$$\text{d. i. } v = \sqrt{2hg}.$$

Da der Druck auf eine Stelle der Seitenwand ebenso groß ist als auf eine ebenso große und gleich tief unter dem Niveau liegende Stelle des Bodens (eines anderen Gefäßes), so muß die Ausfließgeschwindigkeit aus einer Seitenöffnung ebenso groß sein als aus einer Bodenöffnung, wenn sie mit dieser gleiche Tiefe unter dem Niveau hat. Tritt der Flüssigkeitsstrahl nicht lotrecht aus, so muß er nach den Wurfgesetzen eine Parabel bilden.

Aufgaben. 1. Wieviel Wasser fließt aus einer q Quadratdezimeter großen Öffnung, die sich h Dezimeter unter dem Niveau befindet, in t Sekunden?

2. Wie groß muß eine h Dezimeter unter dem Niveau liegende Öffnung sein, damit sie in t Sekunden m Kubikdezimeter Flüssigkeit gebe?

Die nach diesen Gesetzen für eine bestimmte Öffnung und eine bestimmte Ausflußzeit berechnete Flüssigkeitsmenge stimmt aber nicht mit der durch den Versuch gefundenen überein. Diese beträgt bei Wasser nur ungefähr 64 Prozent der Ausflußzeit.

Die wirkliche Geschwindigkeit ist also geringer als die berechnete, und zwar aus folgenden Ursachen:

1. Weil die Flüssigkeit an den Wänden der Öffnung adhärirt.

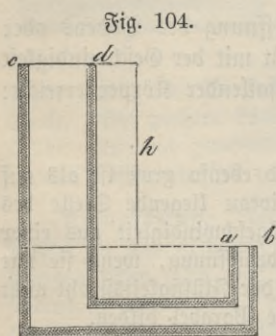
2. Weil die flüssigen Körper nicht absolut flüssig sind. (Je dickflüssiger ein Körper ist, desto geringer die Ausfließgeschwindigkeit.)

3. Weil die vom Niveau bis zur Öffnung fallende Flüssigkeitsmenge von den seitwärts sich befindenden Flüssigkeitsteilchen in der Bewegung gehemmt wird.

Erläuterung zu Nr. 3. Gießt man aus einem Gefäße Wasser, so wird in einiger Entfernung der Strahl dünner, und noch weiter unten zerreißt er in Tropfen. Das kommt daher, weil die unteren Teile des fallenden Wassers eine größere Geschwindigkeit haben als die oberen. Ganz dieselbe Erscheinung würde nun innerhalb eines Gefäßes mit der vom Niveau bis zur Öffnung fallenden Flüssigkeit eintreten, wenn nicht die durch das Dünnwerden und Zerreißen des Strahles entstehenden Lücken durch die seitwärts im Gefäß befindlichen Flüssigkeitsteilchen ausgefüllt würden. Durch diese aber wird die Geschwindigkeit des fallenden Wassers vermindert. Aus dieser

Betrachtung ergibt sich auch, erstens, warum die Differenz zwischen der berechneten und der beobachteten Ausflußmenge desto größer ist, je tiefer die Öffnung unter dem Niveau liegt; zweitens, warum durch Ansatzröhren die wirkliche Ausflußmenge größer wird.

- § 78. § 78. Springbrunnen. Wenn eine von zwei kommunizierenden Röhren kürzer ist als die andere, und die längere durch Zufluß gefüllt erhalten wird, so würde die Flüssigkeit bis zum Niveau der längeren steigen, wenn nicht Luftwiderstand, Adhäsion und die zurückfallende Flüssigkeit diese Höhe verminderten.



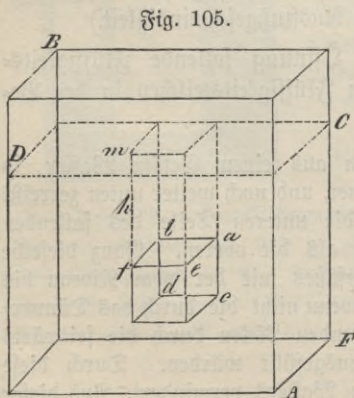
Wegen dieser Hindernisse erreicht der Strahl nur ungefähr zwei Drittel dieser Höhe.

Die oberste Flüssigkeitsschicht ab (Fig. 104) erleidet einen Druck, der gleich der Schwere einer Flüssigkeitssäule ist, deren Grundfläche ab und deren Höhe h ist. Ein solcher Druck erteilt aber, wie aus § 77 hervorgeht, der Flüssigkeit eine Geschwindigkeit $= \sqrt{2hg}$. Ein Körper aber, der mit einer Geschwindigkeit von $\sqrt{2hg}$ senkrecht in die Höhe geworfen wird, erreicht, wie sich aus den Gesetzen des vertikalen Wurfs ergibt, eine Höhe h. Artesische Brunnen.

7. Gleichgewicht fester Körper in Flüssigkeiten.

- § 79. § 79. Wird ein fester Körper in eine Flüssigkeit getaucht, so sinkt er entweder unter, oder er taucht nur zum Teil oder gerade bis zur Oberfläche ein.

a) Er sinkt unter, wenn er spezifisch schwerer ist als die Flüssigkeit, und zwar sinkt er mit dem Überschusse seines Gewichtes über das Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge unter, oder was dasselbe ist:



Er verliert an seinem Gewichte so viel, als die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt. (Das Archimedische Prinzip.)

Dabei ist es gleichgültig, wie tief sich der Körper unter der Oberfläche befindet.

Beweis. (Fig. 105). AB sei ein Gefäß mit Wasser, CD dessen Niveau, cf die später von dem einzutauchenden Körper verdrängte Flüssigkeitsmenge. Bevor

der Körper eingetaucht wird, steht die Flüssigkeit in Ruhe; jedes Flüssigkeitsteilchen wird also genau um sein eigenes Gewicht stärker nach oben als nach unten gedrückt (sonst würde ja seine Schwerkraft nicht genau aufgehoben). Auf eine Flüssigkeitsmasse cf , welche Größe und welche Form sie auch haben mag, wirkt also im ganzen ein nach oben gerichteter Überdruck (Auftrieb) gleich ihrem eigenen Gewicht v . Sie würde also auch an ihrer Stelle bleiben, wenn sie ohne Dichtigkeitsänderung innerhalb der Flüssigkeit erstarren würde.

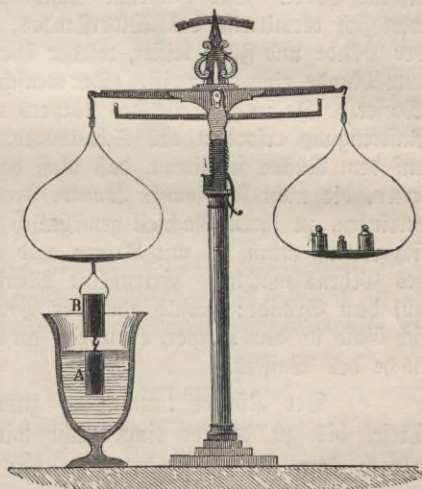
Denkt man sich nun an ihrer Stelle (cf) einen Körper, der zwar ihren Raum genau ausfüllt, aber das Gewicht $v + r$ hat, so erleidet dieser doch nur denselben Auftrieb v . Der Rest r treibt ihn nach unten, oder, falls der Körper, an einem Faden befestigt, zu sinken gehindert ist, wird der Faden nur mit diesem Reste r gespannt, während doch das absolute Gewicht des Körpers $v + r$ beträgt. Der Körper ist also um das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit scheinbar leichter geworden.

Hat ein Körper das Gewicht $v + r$, eine gleiche Raummenge Flüssigkeit das Gewicht v , und wird der Körper an einem befestigten Faden hängend in die Flüssigkeit untergetaucht, so steigt das Niveau im Gefäße, und es vermehren sich Seitendruck und Bodendruck und das Gewicht des Gefäßes gerade so, als ob eine Gewichtsmenge v von derselben Flüssigkeit hinzugegossen würde, und der Faden wird mit dem Überschuß (r) des Körpergewichts nach unten gezogen.

Bestätigung durch den Versuch (Fig. 106). An der einen Wagschale einer Wage hängt ein hohler Zylinder B und darunter ein massiver A, der genau den Zylinder B ausfüllt. Legt man auf die andere Wagschale so viel Gewichte, daß die Wagschalen im Gleichgewicht stehen, und taucht dann den unteren Zylinder A ins Wasser, so wird das Gleichgewicht gestört. Es wird aber wieder hergestellt, wenn man den hohlen Zylinder voll Wasser gießt.

Daher ist es leichter, schwere Körper im Wasser zu heben als in der Luft; z. B. Taucher holen vom Grunde des Wassers eiserne Kugeln heraus. Schöpft man mit einem Eimer Wasser, so ist es leicht, ihn bis an die Oberfläche zu heben. Ein im Wasser befindlicher Mensch kann sich durch Festhalten an einem sehr dünnen Zweige vor dem Untersinken schützen. Steigt man aus dem Wasser in einen Kahn, so muß die Kraftanstrengung größer werden, je mehr Teile des Körpers über die Oberfläche des Wassers kommen. Waldbäche, die eine starke Strömung

Fig. 106.



haben, vermögen große Felsstücke fortzuführen, weil diese einen großen Teil ihres Gewichtes im Wasser verlieren.

b) Der Körper sinkt bloß zum Teil ein, wenn er spezifisch leichter ist als die Flüssigkeit, nämlich so weit, daß das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge dem seinigen gleich ist.

In diesem Falle wiegt der Körper weniger als die gleiche Raummenge Flüssigkeit. Der Körper wiege $v - r$, und die gleiche Raummenge Flüssigkeit wiege v Kilogramm. Ist der Körper ganz untergetaucht, so ist der Auftrieb, v Kilogramm, dießmal größer als das Gewicht des Körpers ($v - r$). Der Überdruck von r Kilogramm treibt ihn also nach oben, und der Körper wird so weit aus der Flüssigkeit auftauchen, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit gleich seinem Gewicht ist. Jeder schwimmende Körper, z. B. ein Schiff, kann so weit belastet werden, bis sein Gewicht und das der Last gleich dem der verdrängten Flüssigkeit ist. Je spezifisch schwerer hiernach eine Flüssigkeit ist, ein desto größerer Teil des schwimmenden Körpers ragt über die Oberfläche heraus, z. B. Kork taucht so wenig in Quecksilber ein, daß er darauf zu ruhen scheint. Schiffe, die aus dem Meere in einen Fluß einlaufen, müssen erleichtert werden. Das Wasser des Toten Meeres soll so schwer sein, daß selbst Menschen, die nicht schwimmen können, darin nicht ganz untersinken. Auf Quecksilber schwimmt sogar Eisen.

Auch Körper, deren Stoff spezifisch schwerer ist als Wasser, schwimmen, wenn sie eine solche Form haben, daß das von ihnen verdrängte Wasser mehr wiegt als sie selbst. Z. B. leere Flaschen, metallene hohle Kugeln, eiserne Boote. Das künstliche Schwimmen der Menschen besteht darin, daß man sich vermittelt des Widerstandes, den das Wasser bei der Bewegung der Hände und Füße leistet, wieder über das Wasser erhebt, so oft man bis zum Munde eingesenkt ist. (Der menschliche Körper ist nur wenig schwerer als Wasser.) Je mehr Teile des Körpers unter dem Wasser sind, desto weniger Anstrengung erfordert das Schwimmen, daher am wenigsten, wenn man so auf dem Rücken schwimmt, daß bloß das Gesicht über dem Wasser ist. Personen, die nicht schwimmen können, strecken, wenn sie in Gefahr kommen zu ertrinken, zu ihrem Nachteil gewöhnlich die Arme übers Wasser. Sie würden sich retten, wenn sie mit Armen und Füßen die gewöhnlichen Bewegungen des Gehens machten. Ertrunkene Menschen oder Tiere liegen eine Zeitlang auf dem Grunde; sobald aber der Prozeß der Fäulnis beginnt, entwickeln sich Gase in dem Körper, er nimmt an Volumen zu und kommt an die Oberfläche des Wassers.

c) Der Körper taucht bis zum Niveau ein und bleibt in jeder Tiefe, bis zu der er eingetaucht wird, wenn sein spezifisches Gewicht gleich dem der Flüssigkeit ist. (Er verliert also scheinbar sein ganzes Gewicht.)

Beweis. Befindet sich an der Stelle der Flüssigkeitsmenge cf (Fig. 105) ein Körper, der ebensoviel wiegt als das verdrängte Wasser, so ist der Druck auf die Flüssigkeitsschicht, auf der er ruht, ebenso groß, als ob bloß Flüssigkeit über ihr stände, und folglich muß Gleichgewicht stattfinden.

Lebende Fische vermögen in jeder Tiefe ohne Bewegung irgend eines

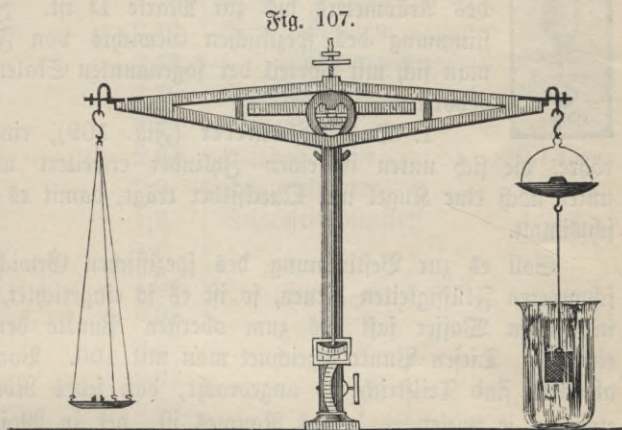
Körperteils in Ruhe zu verharren; sie sinken nicht unter, verlieren also im Wasser ihr ganzes Gewicht. Folgt hieraus, daß ein zum Teil mit Wasser gefülltes Gefäß nicht schwerer wird, wenn man lebende Fische hineinwirft?

8. Bestimmung des spezifischen Gewichts.

§ 80. Aus den Gesetzen des § 79 ergeben sich bequeme Methoden, das § 80. spezifische Gewicht der Körper zu bestimmen. Man kann nämlich leicht finden, wieviel eine Menge Wasser wiegt, die gleiches Volumen mit dem zu untersuchenden Körper hat, und daraus, wievielmals so schwer dieser ist als ein gleiches Volumen Wasser.

a) Das spezifische Gewicht fester Körper erhält man, indem man den Auftrieb des in destilliertes Wasser untergetauchten Körpers bestimmt und mit diesem in sein absolutes Gewicht dividiert. (Fig. 107.)

Ist der Körper spezifisch schwerer als Wasser, so ist der Auftrieb gleich dem Gewichtsverlust innerhalb des Wassers. Ist der Körper spezifisch leichter als Wasser, so ist der Auftrieb größer als das Gewicht des Körpers. In jedem Falle ist der Auftrieb gleich dem Gewichte des verdrängten Wassers.



b) Das spezifische Gewicht eines flüssigen Körpers findet man, wenn man den Gewichtsverlust eines hinreichend schweren, festen Körpers in der zu untersuchenden Flüssigkeit und dann den im Wasser bestimmt und mit diesem in jenen dividiert.

Das spezifische Gewicht flüssiger Körper bestimmt man auch durch ein Fläschchen mit eingeriebenem Glaspfropfen, dessen Kubikinhalt 10 bis 20 ccm beträgt, das also an Gewicht 10 bis 20 Gramm destilliertes Wasser faßt. Hat man nun die Wassermenge genau bestimmt, füllt dann das Fläschchen mit der zu untersuchenden Flüssigkeit und bestimmt deren Gewicht, so findet man durch Division, wievielmals schwerer sie ist als eine gleiche Raummenge Wasser.

c) Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes kleiner fester Körper dient das sogenannte Nicholson'sche, richtiger wohl nach Charles (1780) zu

benennende Aräometer. (Fig. 108.) Ein hohler Metallzylinder A trägt oben an einem dünnen Drahte ein Schälchen B, unten einen schweren Körper C, der oben und unten mit einem hervorstehenden Rande versehen ist. Der obere Draht hat eine Marke bei D. Das Aräometer ist so eingerichtet, daß es im Wasser aufrecht schwimmt und ein Teil des Zylinders aus dem Wasser hervorragt.

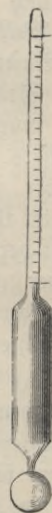
Fig. 108.



Bermittelst dieses Aräometers kann man erstens das absolute Gewicht fester Körper bestimmen, zweitens den Auftrieb im Wasser sowohl solcher festen Körper, die spezifisch schwerer, als auch solcher, die spezifisch leichter als Wasser sind. (Letztere legt man beim Eintauchen in Wasser unter das Gefäß C.) Drittens kann man mit dem Apparat das Gewicht einer Flüssigkeitsmenge bestimmen, deren Rauminhalt gleich dem des Aräometers bis zur Marke D ist. Zur schnelleren Bestimmung des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten bedient man sich mit Vorteil der sogenannten Skalenaräometer. Hierzu gehören:

1. Das Volumeter (Fig. 109), eine Glasröhre, die sich unten in einen Zylinder erweitert und darunter noch eine Kugel mit Quecksilber trägt, damit es aufrecht schwimmt.

Fig. 109.



Soll es zur Bestimmung des spezifischen Gewichts von schwereren Flüssigkeiten dienen, so ist es so eingerichtet, daß es in reinem Wasser fast bis zum obersten Punkte der Röhre einsinkt. Diesen Punkt bezeichnet man mit 100. Von diesem abwärts sind Teilstriche so angebracht, daß jedes Röhrenstück zwischen je zweien $= \frac{1}{100}$ des Raumes ist, der in Wasser eintaucht; diese Teilstriche sind mit den Zahlen 100, 99, 98, 97, 96 usw. bezeichnet. Soll das Volumeter für spezifisch leichtere Flüssigkeiten gebraucht werden, so liegt der Wasserpunkt ziemlich tief, die Teilung geht von diesem aufwärts, und die Zahlen werden vom Wasserpunkte an größer.

Taucht das Volumeter in einer Flüssigkeit bis zur Zahl a ein, so ist deren spezifisches Gewicht $= \frac{100}{a}$. Warum?

2. Das Alkoholometer ist von dem Volumeter nur darin unterschieden, daß die Skala angibt, wieviel Prozent (nach Tralles Raum-, nach Richter Gewichtsprocente) Alkohol der wasserhaltige Spiritus enthält. Wie konstruiert man die Skala?

3. Die Solwage. Die Skala derselben gibt an, den wievielten Teil derjenigen Menge Salz die Sole enthält, durch die das Wasser gesättigt wird.

**Tabelle der spezifischen Gewichte
einiger festen Körper bei 0°.**

Platin	21,5.
Gold	19,3.
Blei	11,35.
Silber	10,5.
Kupfer	8,9.
Messing	8,4.
Nickel	8,8.
Stahl	7,8.
Schmiedeeisen	7,8.
Guß Eisen	7,1—7,7.
Zinn	7,3.
Aluminium	2,7.
Diamant	3,52.
Flintglas	3,78.
Spiegelglas	2,37.
Marmor	2,84.
Schwefel	2,0.
Elfenbein	1,9.
Phosphor	1,8.
Bernstein	1,08.
Natrium	0,97.
Kalium	0,86.
Lindenholz	0,82.
„ trocken	0,44.

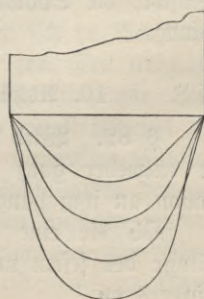
**Tabelle der spezifischen Gewichte
einiger Flüssigkeiten bei 0°.**

Destilliertes Wasser	0,99988.
Quecksilber	13,598.
Verdünnte Schwefelsäure:	
10 prozentige	1,066.
50 "	1,387.
100 "	1,840.
Verdünnte Salpetersäure:	
10 prozentige	1,054.
50 "	1,295.
100 "	1,500.
Milch	1,030.
Wein: Malaga	1,022.
Rheinwein	0,999.
Olivenöl	0,915.
Terpentinöl	0,872.
Alkohol (abs.)	0,793.
Schwefeläther	0,715.
Schwefelkohlenstoff	1,272.

9. Tropfenbildung.

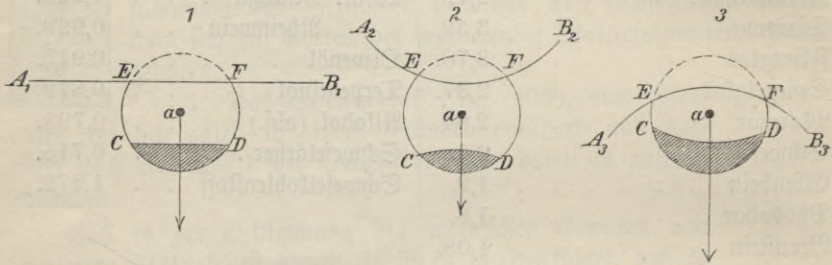
§ 81. Lassen wir aus einem engen, vertikal gestellten Rohre sehr langsam Wasser austreten, so bildet sich ein allmählich wachsender Tropfen, der sich am oberen Teil immer mehr einschnürt und endlich bei einer bestimmten Größe abfällt (Fig. 110). Die Erscheinung kann sehr anschaulich nachgeahmt werden, wenn man auf eine Kautschukmembran, die über einen Holzring gespannt ist, Wasser strömen läßt (C. B. Boys). In diesem Falle wird die Wassermenge von der sich spannenden Membran getragen. Man nimmt an, daß auch bei der wirklichen Tropfenbildung durch den Einfluß der Kohäsionskräfte eine Art von Flüssigkeitshäutchen entsteht, wodurch das Wasser als Tropfen zusammengehalten wird.

Fig. 110.



Im Innern einer vollkommenen Flüssigkeit erfährt jedes Theilchen von allen Seiten die gleiche molekulare Anziehung, die resultierende Wirkung ist deshalb Null. Das trifft nicht mehr zu, wenn ein Theilchen sich so nahe an der Oberfläche befindet, daß sein molekularer Wirkungsbereich etwas über die Oberfläche herausragt. In den Figuren 111 stellt $A_1 B_1$ eine horizontale, $A_2 B_2$ eine konkave und $A_3 B_3$ eine konvexe Flüssigkeitsoberfläche dar, a ein Flüssigkeitsteilchen und der Kreis um a das kugelförmige, molekulare Wirkungsbereich von a . Hier heben sich nur die anziehenden Wirkungen der in dem Raume $CDE F$ vorhandenen Molekeln in bezug auf a gegenseitig auf. Die anziehenden Kräfte dagegen, die von den Theilchen des schraffierten Kugelabschnitts ausgeübt werden, setzen sich zu einer Resultante zusammen, die senkrecht zur Oberfläche und nach innen gerichtet ist. Die Größe des dadurch erzeugten Druckes hängt, wie ein

Fig. 111.



Blick auf die Figuren 111 zeigt, von der Gestalt der Flüssigkeitsoberfläche ab. Je nachdem sie eine konkave oder konvexe Krümmung besitzt, ist der Druck unter sonst gleichen Bedingungen kleiner oder größer als bei ebener Oberfläche. Durch diesen Druck wird die äußerste Flüssigkeitsschicht derartig verändert, daß sie ähnlich wirkt wie ein elastisches Häutchen. Hieraus erklären sich dann nicht nur die Tropfenbildung, sondern auch viele andere Erscheinungen, wie das Schwimmen einer Nadel auf Wasser, das Dahingleiten gewisser Insekten auf einer Wasseroberfläche, das Zusammenkleben der Haare eines befeuchteten Pinsels, das Herabrinnen einer Flüssigkeit an einem Glasstabe beim Eingießen in eine Flasche, die Spannungserscheinungen an dünnen Häutchen einer Seifenlösung.

10. Adhäsion zwischen festen und flüssigen Körpern.

§ 82. § 82. Wird ein fester Körper in eine Flüssigkeit getaucht, so wird er entweder ganz von ihr benetzt, oder es bleiben nur geringe Spuren davon an ihm hängen.

Ob die eine oder die andere Erscheinung eintritt, hängt von dem Stoffe des festen und des flüssigen Körpers und von der Oberfläche jenes Körpers ab.

Taucht man einen Holzstab in Wasser, so wird er ganz naß, taucht man aber ein Talg- oder ein Wachslicht in Wasser, so bleiben nur einzelne Tropfen daran hängen. Noch kleinere Tröpfchen bleiben an einem Glasstabe hängen, wenn man ihn in Quecksilber taucht. Ein Talglicht in Öl getaucht überzieht sich ganz mit diesem. Polierte Körper werden vom Wasser nicht benetzt.

Als Ursache der ersten Erscheinung nimmt man an, daß die Adhäsion zwischen beiden Körpern größer ist als die Kohäsion der Flüssigkeitsteilchen, als Ursache der zweiten das entgegengesetzte Verhalten der beiden Stoffe. Hieraus lassen sich folgende Erscheinungen erklären:

a) Auf der wagerechten Oberfläche eines Körpers zerfließt ein Tropfen von einer ihn benetzenden Flüssigkeit, ein Tropfen einer nicht benetzenden Flüssigkeit behält dagegen mehr oder weniger seine Kugelgestalt. Warum?

Wassertropfen auf Glas fließen auseinander, ebenso Öltropfen auf Wachseleinwand; dagegen bilden Quecksilbertropfen auf dem Tische, Wassertropfen auf einer mit semen lycopodii bestreuten Fläche kleine Kugeln. Drückt man Wassertropfen auf Wachseleinwand mit dem Finger auseinander, so sieht man, wie sich die Wasserteilchen wieder zusammensziehen.

b) Jede Flüssigkeit bildet in einem Gefäße, dessen Wände von ihr benetzt werden, am Rande eine konkave, in einem Gefäße, dessen Wände nicht benetzt werden, eine konvexe Fläche. Warum?

— Beispiele. —

c) Wird ein ganz enges Röhrchen (Haarröhrchen, Kapillarröhrchen) in eine es netzende Flüssigkeit getaucht, so steigt diese in ihm über das Niveau derselben; ist die Flüssigkeit eine die Röhre nicht netzende, so findet die entgegengesetzte Erscheinung statt. — Erklärung. —

Auf der Haarröhrchenanziehung (Kapillarität) beruhen folgende Erscheinungen: Das Einziehen der Flüssigkeiten in Schwamm, Löschpapier, des Wassers in Sand, Erde, Mauern, in Zucker, des Öles in den Docht, das Entstehen und Größerwerden der Fettflecke in wollenem Zeuge. In trockenes Holz wird das Wasser mit solcher Kraft eingezogen, daß nicht bloß seine Teile auseinander getrieben werden (wodurch sich sein Rauminhalt vergrößert), sondern daß durch das aufquellende Holz sogar Steine gesprengt werden können.

11. Lösung.

§ 83. In vielen Fällen, wo ein fester Körper sich in Berührung § 83. mit einer Flüssigkeit befindet, wird er vollständig oder zum Teil aufgelöst. Die nicht kristallisierbaren Körper, die sogenannten Kolloide, wie Leim, Gummi, Eiweiß, Stärke, werden durch die Flüssigkeit zuerst erweicht und dann zähflüssig. Eine Grenze zwischen gelöster und ungelöster Substanz läßt sich deshalb bei ihnen nicht angeben. Von den Kristalloiden dagegen, wie z. B. Kochsalz, die unmittelbar vom festen in den flüssigen Zustand übergehen, kann eine gegebene Flüssigkeitsmenge nur eine begrenzte Menge fester Substanz auflösen. Ist diese Grenze erreicht, so heißt die Lösung

gesättigt. Die Lösungsmenge hängt außer von der Natur des festen und flüssigen Körpers von den Verhältnissen ab, unter denen die Lösung vor sich geht. Vor allem spielt die Temperatur dabei eine wichtige Rolle. In der Regel nimmt die Löslichkeit mit steigender Temperatur zu. Wird eine gesättigte Lösung abgekühlt, so scheidet sich meist ein Teil der gelösten Substanz, und zwar oft in Kristallform wieder ab.

Es gibt Flüssigkeiten, wie z. B. Wasser und Öl, die sich so gut wie gar nicht miteinander mischen; andere wieder, wie Alkohol und Wasser, Schwefelsäure und Wasser, können in jedem Mengenverhältnis ineinander gelöst werden. Eine dritte Gruppe bilden die Flüssigkeiten, die sich in bestimmten Mengen lösen. Hierzu gehören z. B. Äther und Wasser. Bemerkenswert ist die Volumenveränderung, die zuweilen beim Lösen von Flüssigkeiten stattfindet. So verdichten sich 50 Vol Alkohol und 50 Vol Wasser, die bei Zimmertemperatur gemischt werden, auf 96,3 Vol.

Schichtet man die spezifisch leichtere von zwei Flüssigkeiten vorsichtig über die schwerere, z. B. Wasser über eine wässrige Lösung von Kupfervitriol, so sind anfangs beide Stoffe durch eine verhältnismäßig scharfe Grenze getrennt. Nach einiger Zeit jedoch erweist sich die ganze Flüssigkeit als gleichartig. Diese sich allmählich und von selbst vollziehende Mischung zweier Flüssigkeiten nennt man Diffusion.

12. Osmose.

§ 84. § 84. Wenn man einen Lampenzylinder auf der einen Seite mit einer Tierblase zubindet, dann eine Lösung von Kupfervitriol hineingießt und ihn so tief in ein Gefäß mit Wasser taucht, daß die beiden Flüssigkeiten in gleicher Höhe stehen, so steigt allmählich die Flüssigkeit im Zylinder, während sie in dem äußeren Gefäße sinkt, und das Wasser nimmt nach und nach die Farbe der Vitriollösung an. Befindet sich die Lösung im äußeren Gefäße und das Wasser im Zylinder, so steigt die Flüssigkeit im äußeren Gefäße. Dieser Vorgang findet so lange statt, bis die Flüssigkeiten in beiden Gefäßen gleichartig sind. Es muß also ein Teil des Wassers durch die Poren der Blase nach der Vitriollösung und ein Teil von dieser, aber ein kleinerer, in das Wasser übergehen.

Man erklärt diese Erscheinung auf folgende Weise: Zwischen Kupfervitriol und Wasser findet eine größere Anziehung statt als zwischen den gleichartigen Theilen beider Stoffe, also suchen sie sich zu vereinigen. Die Poren der Blase gestatten aber dem Wasser einen leichteren Durchgang als der Vitriollösung; daher sammelt sich in dem Gefäße, in dem die Lösung sich befindet, mehr Flüssigkeit als in dem anderen.

Die Richtigkeit dieser Erklärungsweise wird durch folgende Erscheinung bestätigt: Wird eine Blase in Wasser eingeweicht, so zieht ein Teil desselben in ihre Poren ein. Nimmt man sie dann wieder heraus und bestreut sie mit Salz, so fließt ein Teil des eingedrungenen Wassers wieder ab, und die

Blase schrumpft zusammen. Dasselbe geschieht, wenn man sie, anstatt mit Salz zu bestreuen, in Alkohol legt.

Auch zur Lösung irgend eines anderen Salzes oder zu einer Zuckertlösung oder zu Weingeist u. dgl. m. dringt das Wasser durch die Poren einer Blase oder eines Zylinders aus ungebranntem Ton. Diesen Austausch von Flüssigkeiten durch eine poröse Scheidewand nennt man *Osmose*.

C. Gase.

1. Eigenschaften der Gase.

§ 85. Die luftförmigen Körper oder Gase haben die Schwere und § 85. die leichte Verschiebbarkeit ihrer Teile mit den flüssigen Körpern gemein (s. § 61 und 66); es müssen daher alle Gesetze der flüssigen Körper, die aus diesen beiden Eigenschaften entspringen, auch für die luftförmigen gelten.

Beweis für die Schwere. Ein Glasballon, aus dem die Luft ausgepumpt ist, ist leichter, als wenn er mit Luft gefüllt ist.

Sie unterscheiden sich von den flüssigen Körpern dadurch, daß sie jeden ihnen gebotenen Raum ausfüllen, daß sie also nur durch äußere Kräfte in einem begrenzten Raum erhalten werden können, und daß sie bei Veränderung der Druckkräfte sich erheblich zusammenziehen oder ausdehnen. Dabei sind sie vollkommen elastisch.

Beweis für die Elastizität. Wird ein genau schließender Kolben in eine unten geschlossene Röhre gedrückt, so treibt ihn die Luft wieder zurück.

Da wir uns selbst in dem Luftmeere befinden, so kann von den Gesetzen, die die Oberfläche der Flüssigkeiten in Gefäßen betrafen, hier nicht die Rede sein. Die ganze die Erde umgebende Luftmasse muß aber, wie die Meere, wegen der Schwere und der leichten Verschiebbarkeit ihrer Teile eine kugelförmige Oberfläche haben, wenn wir nämlich von den Schwankungen absehen, denen die Luftmasse wegen ihrer großen Beweglichkeit unterworfen ist und die auf der Oberfläche unfehlbar weit größere Wogen veranlassen, als die Meereswogen sind.

Wegen der Schwere und Elastizität der Luft muß die Dichtigkeit der Atmosphäre von oben nach unten zunehmen und dicht an der Oberfläche der Erde am größten sein.

Denn je größer die Masse ist, die auf einem elastischen Körper ruht, desto mehr wird er zusammengedrückt, und desto dichter wird er.

Ferner gelten die folgenden, aus der Schwere und der leichten Verschiebbarkeit der Teile für die flüssigen Körper entspringenden Gesetze auch für die luftförmigen Körper:

a) Der Druck pflanzt sich gleichmäßig fort (§ 73).

b) In der Luft erleidet jeder Körper und jede Luftschicht einen Druck, der so groß ist wie die Schwere einer Luftsäule, die zur Grundfläche die gedrückte Stelle und zur Höhe die Höhe der Atmosphäre hat (§ 75).

c) Jeder Körper erleidet in der Luft einen Auftrieb, der gleich dem Gewichte der verdrängten Luft ist (§ 79).

Zu a. Drückt man mittelst eines Kolbens die Luft in einem Gefäße zusammen, so erleiden alle Teile der Umfassungswände des Gefäßes diesen Druck; befindet sich irgendwo eine Öffnung, und hält man diese mit dem Finger zu, so fühlt man den Druck. Der Druck, den die Atmosphäre durch ihr Gewicht hervorbringt, ist im Zimmer ebenso groß als unter freiem Himmel; der Barometerstand ist also hier und dort der gleiche, siehe § 86.

Zu b. Der Luftdruck zeigt sich z. B. in folgenden Erscheinungen: Füllt man eine an beiden Seiten offene Glasröhre mit Wasser, indem man die eine Öffnung mit dem Finger zuhält, und taucht sie mit dem offenen Ende in Wasser, so sinkt das in der Röhre erst dann bis zum Niveau des außerhalb der Röhre befindlichen, wenn man den Finger oben wegnimmt. Aus dem Zapfloche eines Fasses läuft der Wein erst dann, wenn das Spundloch geöffnet wird. Bedeckt man ein Glas Wasser mit Papier und kehrt es um, so bleibt das Wasser darin. Noch genauer werden wir diesen Luftdruck im nächsten Paragraphen betrachten.

Zu c. Wenn der Körper spezifisch schwerer ist als die Luft, so fällt er innerhalb derselben, oder, falls er unterstützt ist, verliert er an Gewicht so viel, als die verdrängte Luft wiegt. (Scheinbares Gewicht = Absolutes Gewicht — Gewicht der Luft.) Ein Körper, der mit der Luft gleiches spezifisches Gewicht hat, verliert scheinbar in ihr sein ganzes Gewicht und schwebt innerhalb derselben. Ein mit verdünnter Luft oder Wasserstoffgas gefüllter Ballon steigt in die Höhe, bis er Luftschichten erreicht, in denen die verdrängte Luft ebensoviel wiegt wie er selbst. — Leichte Körper, wie Flaumfedern, Staub und dergleichen, sinken ganz langsam zur Erde. — Der fliegende Vogel schwimmt in der Luft auf ähnliche Weise wie der Mensch im Wasser. —

Fig. 112.



2. Das Barometer.

§ 86. § 86. Füllt man eine an dem einen Ende zugeschmolzene Glasröhre von etwa 80 cm Länge mit Quecksilber und taucht sie umgekehrt in ein Gefäß mit Quecksilber (Fig. 112), so sinkt das in der Röhre enthaltene um einige Zentimeter herunter, so daß sein Niveau ungefähr 76 cm über dem Niveau des Quecksilbers im Gefäße steht. (Torricellischer Versuch.)

Erhebt man sich mit dieser Vorrichtung über die Erdoberfläche, etwa in einem Luftballon, oder indem man einen Berg ersteigt, so sinkt die Quecksilbersäule, und zwar um so mehr, je höher man steigt. Hat man anstatt der an einer Seite zugeschmolzenen Röhre eine an beiden Seiten offene genommen und sie oben mit dem Finger zugehalten, so fällt die ganze Quecksilbersäule, sobald man den Finger wegnimmt.

Daraus geht hervor, daß die Quecksilbersäule von dem Luftdrucke getragen wird.

Daraus aber, daß die Quecksilbersäule beim Umkehren von 80 bis auf ungefähr 76 cm sinkt, geht hervor, daß der Luftdruck, der auf dem Quecksilber des Gefäßes ruht, nur einer Quecksilbersäule von ungefähr 76 cm Höhe das Gleichgewicht zu halten vermag, daß also die Luftmasse, wie wir im vorigen Paragraphen einstweilen ohne Beweis angenommen hatten, wirklich eine begrenzte ist und nicht etwa den ganzen Weltraum erfüllt. Man hat somit eine Vorrichtung, vermittelst deren man den Druck der Atmosphäre messen kann. Um die Höhe der Quecksilbersäule genau messen zu können, bringt man einen Maßstab an, dessen Nullpunkt auf dem Quecksilberniveau des Gefäßes steht.

Eine solche Vorrichtung heißt Barometer, die Höhe der von der Luft getragenen Quecksilbersäule Barometerstand.

Unsere Stubenbarometer haben gewöhnlich die Form Fig. 113.

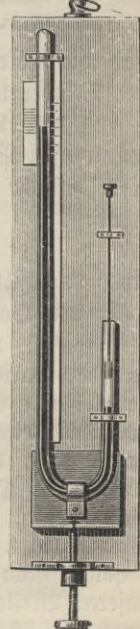
Von dem Maßstabe ist bloß der obere Teil gezeichnet, und obwohl der Barometerstand, wie wir später sehen werden, veränderlich ist, also auch das Niveau im Gefäße bald höher, bald niedriger steht, so läßt man doch den Stand des Maßstabes unverändert, weil das Steigen und Fallen im Gefäße so gering ist, daß man hiervon absehen kann. Ein Barometer von dieser Form heißt Birnbarometer. Für wissenschaftliche Zwecke bedient man sich des sogen. Heberbarometers. Bei diesem ist entweder der Maßstab oder das Rohr (Fig. 114) verschiebbar, so daß sich der Nullpunkt immer auf das Niveau des kürzeren Schenkels stellen läßt; oder es ist für jeden Schenkel ein Maßstab angebracht.

Der obere Raum im Barometer muß möglichst luftleer sein; warum? Wie erkennt man, ob er luftleer ist? Das Quecksilber selbst muß durch Auskochen von allen Luftblasen befreit sein; weshalb? Ist es notwendig, daß die Röhre überall genau gleichweit sei? Beim Heberbarometer ist dies wünschenswert; weshalb? Warum braucht die Öffnung im Gefäße des Stubenbarometers nur ganz klein zu sein? Warum wird die Quecksilbersäule länger, wenn man die Barometerröhre schief hält? Wie muß man das Barometer beim Tragen halten, wenn man sicher sein will, daß das Quecksilber die Röhre nicht zerichlägt?

Fig. 113.

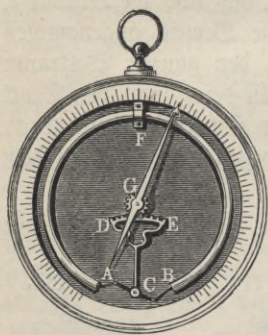


Fig. 114.



Da die Zerbrechlichkeit des Quecksilberbarometers dessen Anwendbarkeit bei Höhenmessungen beeinträchtigt, so bedient man sich, wenn nicht große Genauigkeit beabsichtigt wird, gern des von Bourdon erfundenen Aneroidbarometers. Es besteht aus einer elastischen Röhre AFB (Fig. 115),

Fig. 115.



die fast luftleer ist. Bei Zunahme des Luftdruckes krümmt sich die Röhre nach innen, bei Abnahme nach außen. Im ersten Falle nähern sich die freien Enden A und B und drehen einen um die Achse C drehbaren Winkelhebel so, daß der gezahnte Kreisbogen DE nach rechts, das Rad G und mit diesem der Zeiger entgegengesetzt gedreht wird. Bidi hat die Röhre AFB durch einen dünnen Deckel aus Kupferblech ersetzt, das bei der Zunahme des Luftdruckes sich nach innen krümmt. Selbstverständlich wird die Skala durch Vergleichen mit genauen Quecksilberbarometern hergestellt,

und die Ablesungen bedürfen verschiedener Korrekturen, besonders wegen der Temperatur.

§ 87. § 87. Anwendung des Barometers. Das Barometer gibt, wie im vorigen Paragraphen gezeigt ist, den Druck an, den jeder Teil der Erdoberfläche und die Begrenzungsflächen jedes Körpers durch die Luft erleiden.

1. Der Luftdruck auf jede Fläche ist so groß wie die Schwere einer Quecksilbersäule, die zur Grundfläche die gedrückte Stelle und zur Höhe den Barometerstand hat.

Gesetzt, der innere Querschnitt einer Heberbarometerröhre sei 1 qcm und der Barometerstand = 76 cm, so müßte, wenn das Quecksilber in dem geschlossenen Schenkel der Barometerröhre anstatt durch den Luftdruck durch den Druck einer Quecksilbersäule im Gleichgewicht gehalten werden sollte, auf dem Niveau des Quecksilbers in dem offenen Schenkel eine Quecksilbersäule von 76 cm Höhe stehen. Der Rauminhalt derselben ist aber 76 ccm, und diese wiegen, da das spezifische Gewicht des Quecksilbers = 13,6 ist, $13,6 \cdot 76$ Gramm, d. i. 1034 Gramm = 1,034 kg. So groß ist der Druck auf je 1 qcm. Man bezeichnet diesen Druck kurz als eine Atmosphäre und den in unseren Breiten an der Oberfläche des Meeres herrschenden, mittleren Luftdruck von 76 cm Quecksilber als den normalen.

Wie groß ist der Luftdruck auf eine Tischplatte, deren Oberfläche = 2 qm? oder auf den Körper eines Mannes, dessen Oberfläche ungefähr = 1,27 qm ist? Wie ist es möglich, daß wir diesen Druck gar nicht merken? daß der Tisch nicht zusammenbricht?

2. Hieraus läßt sich nun das ungefähre Gewicht der ganzen unsere Erde umgebenden Luftmasse bestimmen.

Der Radius der Erde ist = 860 Meilen, 1 Meile ist = 7420 Meter. Hieraus läßt sich die Oberfläche der Erde berechnen; da man nun den Druck

der Luft, wie vorhin gezeigt, auf eine Fläche von 1 qcm kennt, so kann man auch den Luftdruck auf die ganze Erdoberfläche finden, und dieser ist gleich dem Gewichte der ganzen Luftmasse. Führe diese Rechnung aus!

3. Da das Barometer sinkt, wenn man sich über die Erdoberfläche erhebt, so würde sich mit diesem Apparat sehr leicht die Höhe der Berge, überhaupt der Höhenunterschied zweier Orte bestimmen lassen, wenn die Luft nicht elastisch wäre, sondern überall gleiche Dichtigkeit, also gleiches spezifisches Gewicht hätte. Denn wäre dann z. B. gefunden, daß das Barometer bei einer Erhebung von 21 m um 2 mm sinkt, so wäre ein Ort, an dem das Barometer $n \cdot 2$ Millimeter niedriger stände als an einem anderen, um $n \cdot 21$ Meter höher gelegen als letzterer.

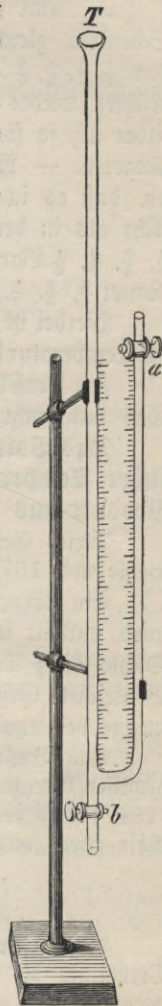
Nun ist aber die Luft elastisch; sie hat daher in den unteren Schichten eine größere Dichtigkeit und also auch ein größeres spezifisches Gewicht als in den oberen. Es muß daher zuvor untersucht werden, in welchem Verhältnisse die Dichtigkeit der Luft bei zunehmender Höhe sich vermindert. Und dazu ist wieder nötig, zu untersuchen, in welchem Verhältnisse die Dichtigkeit der Luft bei zunehmendem Drucke wächst.

Genauere Wägungsversuche haben ergeben, daß bei 0° Celsius und 76 cm Barometerstand 1 Liter Luft 1,293 Gramm wiegt, also 1 ccm $0,001293 = \frac{1}{773}$ Gramm. Hiernach ist das auf Wasser von 4° bezogene spezifische Gewicht der Luft unter den angegebenen Bedingungen 0,001293 oder $\frac{1}{773}$. Diese Zahl gibt auch die Dichtigkeit der Luft, d. h. die Masse von 1 ccm an, wenn man die Grammasse als Einheit annimmt (s. § 19).

3. Das Boyle'sche Gesetz.

§ 88. Füllt man in die durch Fig. 116 dargestellten, lotrecht stehenden kommunizierenden Glasröhren, zwischen denen sich ein Maßstab befindet, nachdem man den Hahn b geschlossen und den bei a geöffnet hat, so viel Quecksilber, daß in der kürzeren Röhre nur ein kleiner Raum von etwa 10 cm unterhalb des Hahnes a frei bleibt, und schließt dann den Hahn bei a, so steht das Quecksilber in den beiden Röhren gleich hoch und die unter a eingeschlossene Luft unter einem Drucke von einer Atmosphäre. Füllt man nun in die längere so viel Quecksilber, daß es hier um einen Barometerstand höher steht als in der kürzeren, also die unter a abgesperrte Luft einen Druck von zwei Atmosphären erleidet, so

Fig. 116.



nimmt diese nur einen halb so großen Raum ein als vorher. Läßt man dann durch das Öffnen des Hahnes h so viel Quecksilber ab, daß dieses in der längeren Röhre um $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5} \dots$ Barometerstand höher steht als in der kürzeren, so daß der Druck auf die eingeschlossene Luft $\frac{2}{3}, \frac{4}{5}, \frac{5}{6}, \frac{6}{7} \dots$ mal so groß ist als in dem Falle, wo das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch stand, so ist der Raum, den die Luft einnimmt, nur $\frac{3}{2}, \frac{5}{4}, \frac{6}{5}, \frac{7}{6} \dots$ mal so groß. Ist dann der Quecksilberstand in beiden Röhren wieder gleich geworden, und zapft man dann noch mehr Quecksilber ab, so steht das Quecksilber in der kürzeren Röhre höher als in der längeren. — Warum? Läßt man jetzt nach und nach so viel Quecksilber ab, daß es in der kürzeren Röhre um $\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ Barometerstand höher steht als in der längeren, so daß der Druck auf die abgesperrte Luft nur $\frac{5}{3}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{1}{2}$ Barometerstand beträgt, so ist der von der Luft eingenommene Raum $\frac{3}{2}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, 2$ mal so groß als da, wo das Quecksilber gleich hoch stand.

Hierbei ist vorausgesetzt, daß am Anfang und am Ende jedes Versuches die Temperatur der ausgedehnten oder zusammengepreßten Luft die gleiche ist.

Zu denselben Resultaten gelangt man, wenn statt Luft ein anderes Gas untersucht wird, so daß sich folgendes Gesetz ergibt:

Das Volumen einer bestimmten Gasmenge ist bei unveränderlicher Temperatur dem Druck umgekehrt proportional, oder das Produkt aus Druck und Volumen ist konstant.

Dieses Gesetz heißt das Boyle'sche (Mariotte'sche); es wurde 1662 von Boyle und 1679 von Mariotte gefunden.

Ein Körper, der auf den n ten Teil seines Volumens zusammengedrückt wird, enthält in der Volumeneinheit n mal soviel Masse als vorher, seine Dichte (i. § 19) ist also dem Volumen umgekehrt proportional. Dem Boyle'schen Gesetz zufolge ist demnach die Dichte einer bestimmten Gasmenge bei unveränderlicher Temperatur dem Druck direkt proportional.

Das Boyle'sche Gesetz ist kein absolut genaues, es gilt aber innerhalb gewisser Grenzen mit großer Annäherung. Nach den Versuchen von Regnault (1847) wird Wasserstoffgas bei wachsendem Druck etwas weniger, die übrigen Gase etwas mehr zusammengedrückt, als das Gesetz es verlangt.

4. Barometrische Höhenmessung.

§ 89. § 89. Vermittelt des Boyle'schen Gesetzes läßt sich finden, in welchem Verhältnis die Dichtigkeit der Atmosphäre von unten nach oben abnimmt, vorausgesetzt, daß sie sich vollkommen in Ruhe befindet und überall gleiche Temperatur besitzt.

Denkt man sich eine vertikale Luftsäule in horizontale Schichten von 1 m Höhe zerlegt, so kann man in jeder einzelnen Schicht die Dichtigkeit und den Druck als konstant ansehen und annehmen, daß sich diese Größen erst an der Grenze zweier Schichten sprungweise ändern. Wenn der Barometerstand in einer beliebigen Höhe h cm beträgt, und wenn bei einer Erhebung um 1 m die Quecksilbersäule auf h_1 , also um $h - h_1 = x$ cm fällt, so muß das Gewicht der Quecksilbersäule von x cm Länge und dem

Querschnitt q gleich sein dem Gewicht der Luftschicht vom Querschnitt q und der Höhe 100 cm. Es besteht somit die Beziehung

$$1. \quad \dots \quad x \cdot 13,6 = 100 \cdot s,$$

wo s das auf Wasser bezogene spez. Gewicht der Luft beim Barometerstande b bedeutet. Nach dem Boyle'schen Gesetz verhält sich aber

$$2. \quad \dots \quad b : 76 = s : \frac{1}{773'}$$

vorausgesetzt, daß die Temperatur der Luftschicht 0° ist. Durch Elimination von s aus Gl. 1. und 2. folgt

$$3. \quad \dots \quad x = b - b_1 = \frac{100 b}{773 \cdot 76 \cdot 13,6'}, \text{ also}$$

$$4. \quad \dots \quad b_1 = b \left(1 - \frac{100}{773 \cdot 76 \cdot 13,6} \right) = b \lambda,$$

wo λ den Zahlenfaktor in der Klammer bezeichnet.

In gleicher Weise erhält man bei einer Erhebung um 2 m

$$b_2 = b_1 \cdot \lambda = b \cdot \lambda^2$$

und allgemein bei einer Erhebung um h Meter:

$$5. \quad \dots \quad b_h = b \cdot \lambda^h, \text{ d. h. :}$$

Wenn die Höhen in arithmetischer Reihe wachsen, so nehmen die Luftdrucke in geometrischer Reihe ab.

Hat man nun an zwei Orten die Barometerstände b und b_h gemessen, so findet man aus Gl. 5.

$$6. \quad \dots \quad h = - \frac{1}{\log \lambda} (\log b - \log b_h) \text{ Meter.}$$

Der Faktor $-\frac{1}{\log \lambda}$, dessen Wert etwa 18400 ist, kann entweder aus der Gleichung 4. berechnet oder durch den Versuch ermittelt werden, indem man für zwei Orte, deren Höhenunterschied auf trigonometrischem Wege genau bestimmt worden ist, die Barometerstände mißt.

Die für h abgeleitete Formel 6. setzt voraus, daß die ganze Luftsäule zwischen den beiden Beobachtungsorten die Temperatur 0° habe. Wenn aber die Temperaturen t und t_1° sind, also die Säule durchschnittlich die Temperatur $T = \frac{t + t_1}{2}$ besitzt, so ist der Höhenunterschied größer als der berechnete in dem Verhältnis, als sich die Luft von 0° bis T° ausdehnt, d. h. im Verhältnis $1 : (1 + aT)$. Hier bedeutet a den Ausdehnungskoeffizienten der Luft $\frac{1}{273}$ (s. § 125). Die Barometerstände b und b_h sind in diesem Falle auf 0° zu reduzieren, es ist also dafür $B = \frac{b}{1 + 0,00018 t}$ und $B_H = \frac{b_h}{1 + 0,00018 t_1}$ zu setzen, so daß man erhält $H = 18400 \left(1 + \frac{T}{273} \right) (\log B - \log B_H)$.

Auch diese Formel ist nur eine angenäherte, da weder der Feuchtigkeitsgehalt der Luft noch die Abnahme des Quecksilbergewichts mit der Höhe in Betracht gezogen wurde.

Auf dem								
Chimborazo	steht das Barom.	bei 6700 m	Höhe im	Mittel	auf 34	cm		
Montblanc	" " "	" 4800	" " "	" " "	" 43	"		
Ätna	" " "	" 3300	" " "	" " "	" 51	"		
Schneekoppe	" " "	" 1600	" " "	" " "	" 62,5	"		
Brocken	" " "	" 1145	" " "	" " "	" 66	"		

Die erste barometrische Höhenmessung wurde 1648 auf Pascals Veranlassung auf dem Berge Puy de Dôme angestellt.

5. Manometer.

§ 90. Die Manometer dienen dazu, den Druck eines Gases zu messen. Bei sehr geringen Drucken benutzt man ein verkürztes Barometer (Barometerprobe). — Für Gasspannungen, die nur wenig vom Atmosphären-

Fig. 117.

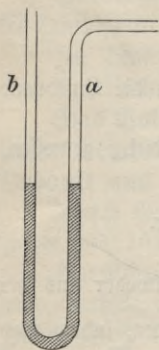
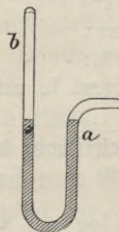


Fig. 118.



druck abweichen, bedient man sich des offenen Manometers (Fig. 117). Es ist dies ein U-förmig gebogenes Glasrohr, dessen einer Schenkel a mit dem Gasraum, der andere b mit der Luft in Verbindung steht. Das Rohr wird bis zur Hälfte mit Quecksilber oder Wasser gefüllt. Steht die Flüssigkeit in beiden Schenkeln gleich hoch, so besitzt das Gas Atmosphärenspannung. Anderenfalls erkennt man an dem Niveauunterschied in beiden Schenkeln, um wieviel der Gasdruck größer oder geringer ist als der herrschende Atmosphärendruck.

Wollte man mit dieser Vorrichtung Gasspannungen von mehreren Atmosphären messen, so müßte das Rohr eine beträchtliche Länge erhalten, was unbequem ist. Man verwendet dann ein Manometerrohr (Fig. 118), dessen Schenkel b oben zugeschmolzen ist, während a mit dem Gasbehälter kommuniziert. Über der Absperrflüssigkeit befindet sich im Schenkel b Luft, die Atmosphärenspannung hat, solange die Flüssigkeit in beiden Schenkeln gleich hoch steht. Treibt der Gasdruck die Flüssigkeit im Schenkel b in die Höhe, so wird dadurch die Luft in b auf $\frac{1}{n}$ ihres ursprünglichen Volumens zusammengedrückt und übt nun ihrerseits nach dem Boyle'schen Gesetz einen Druck von n Atmosphären aus. Der Gasdruck ist also um den Druckunterschied der beiden Flüssigkeitssäulen größer als n Atmosphären.

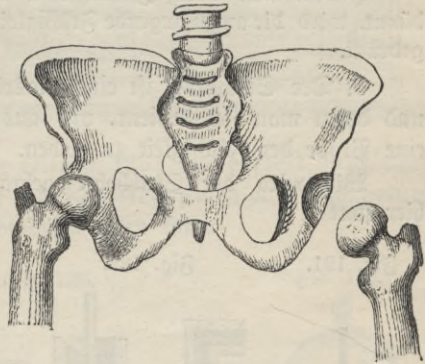
Weniger zerbrechlich als die beschriebenen Spannungsmesser sind die Metallmanometer. Sie unterscheiden sich von Aneroidbarometern (§ 86) prinzipiell nur dadurch, daß die elastische Röhre oder Dose nicht luftleer gemacht und geschlossen ist, sondern mit dem Gasbehälter in Verbindung steht.

6. Einige Anwendungen des Luftdruckes.

§ 91. Auf dem Drucke der Luft, ihrer Ausdehnbarkeit und der Eigenschaft, daß Druck und Dichtigkeit in gleichem Verhältnisse wachsen, beruhen eine Menge Erscheinungen und die Einrichtung vieler Instrumente.

1. Von merkwürdiger Bedeutung ist der Luftdruck für die Glieder des menschlichen Körpers. Der Knochen des Oberschenkels ist nämlich am oberen Ende mit einem kugelförmigen Ansätze, dem Gelenkkopfe, versehen, und dieser paßt in eine entsprechende Vertiefung des Hüftknochens, die Gelenkpfanne (siehe Fig. 119). Diese beiden Knochenstücke sind von dem Kapselbande, d. i. einer sehr sehnigen Haut, umschlossen, die an dem Halse des Gelenkkopfes und den Rändern der Pfanne angewachsen ist. Legt man nun einen menschlichen Leichnam so auf einen Tisch, daß das eine Bein frei herunterhängt, und schneidet man alle Muskeln, die das

Fig. 119.



erwähnte Gelenk bekleiden, sowie das Kapselband durch, so sollte man, da nun jede Verbindung zwischen dem Beine und dem Oberkörper aufgehoben ist und die Pfanne noch nicht eine Halbkugel bildet, erwarten, daß das Bein herunterfiel. Aber es bleibt hängen; Pfanne und Gelenkkopf sind nämlich mit einer außerordentlich glatten Substanz, mit Knorpel, bekleidet und passen luftdicht ineinander, so daß das Bein vom Luftdruck getragen wird, eine bedeutende Erleichterung für die Muskeln, die es sonst halten müßten. Daß der Luftdruck diesen Dienst leistet, wird erstens dadurch bestätigt, daß, wenn man die Pfanne von außen durchbohrt, das Bein sogleich abfällt, sobald die Spitze des Bohrers die Pfannenwand öffnet, zweitens dadurch, daß, wenn man den Gelenkkopf wieder in die Pfanne einpaßt und das Loch mit dem Finger zuhält, das Bein hängen bleibt, aber wieder abfällt, wenn man den Finger wegnimmt.

2. Der Heber (Fig. 120) ist eine gebogene Röhre, an der der eine Arm länger ist als der andere. Wird diese Röhre mit Wasser gefüllt und der kürzere Arm in ein Gefäß mit Wasser getaucht, so leert sich das Gefäß soweit, bis das Niveau die Öffnung b erreicht hat.

Fig. 120.



Erklärung. Der Luftdruck auf die im Heber enthaltene Flüssigkeit ist bei a so groß wie auf die Flüssigkeitsschicht im eintauchenden Schenkel, die mit dem äußeren

Niveau in einer Ebene liegt; aber von dem Druck bei a wird durch die im längeren Schenkel sa enthaltene Wassersäule mehr aufgehoben als von dem Druck in sb. Daher erfolgt in der Röhre eine Bewegung des Wassers von b nach a.

3. Das Atmen.

Das Einatmen geschieht durch Erweiterung, das Ausatmen durch Zusammendrückung der Lungen. Im ersten Falle wird die Luft in ihnen verdünnt, im zweiten verdichtet.

4. Das Saugen, Rauchen, Trinken.

Indem man durch Zurückziehen der Zunge im Munde die Luft verdünnt, wird die aufzusaugende Flüssigkeit durch die äußere Luft in den Mund gedrückt.

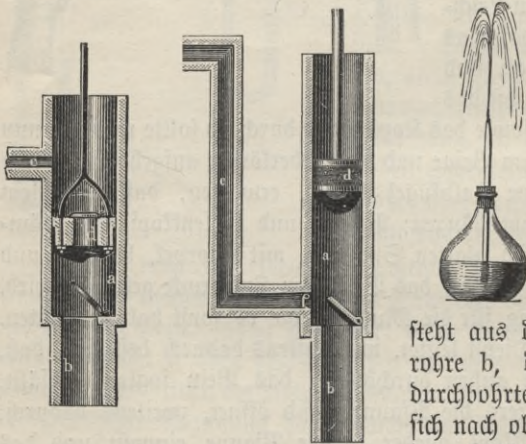
5. Der Stechheber ist eine Glasröhre, die sich oben bauchig erweitert und deren man sich bedient, um aus einem Fasse durch das Spundloch eine Probe der Flüssigkeit zu ziehen.

Wie wird der Stechheber gebraucht, und welche Vorgänge finden hier statt?

Fig. 121.

Fig. 122.

Fig. 123.



6. Die Handspritze besteht aus einer zylindrischen Röhre, in der sich ein Kolben bewegt.

Wird die Spritze ins Wasser getaucht und der Kolben in die Höhe gezogen, so füllt sich der Zylinder mit Wasser. Warum?

7. Die Saugpumpe (Fig. 121). Sie besteht aus dem Stiefel a, dem Saugrohr b, dem Ausgufrohre c, dem durchbohrten Kolben d und den beiden sich nach oben öffnenden Ventilen über dem Kolben und dem Saugrohr.

Auf welche Weise wird sie benutzt, und welche Vorgänge finden dabei statt?

8. Die Druckpumpe (Fig. 122). Ihre Bestandteile sind: der Stiefel a, das Saugrohr b, das Steigrohr c, der Kolben d und die beiden Ventile über dem Saugrohr und in dem Steigrohr.

Beschreibe und erkläre ihren Gebrauch!

9. Der Heronsball (Fig. 123) ist ein verschlossenes Gefäß, durch dessen oberen Teil eine Röhre geht, die fast bis zum Boden reicht.

Heron von Alexandrien, 100 v. Chr.

Welches Experiment läßt sich mit dem Heronsball anstellen?

10. Die Feuerspritze (Fig. 124) besteht aus 2 Druckpumpen B, die abwechselnd das Wasser in einen Heronsball A (Windkessel genannt) treiben.

11. Die Luftpumpe (Fig. 125). Sie besteht erstens aus dem Stiefel A, in dem sich ein Kolben bewegt, zweitens dem Teller, der mit dem Stiefel durch die Röhre C in Verbindung steht und auf den die Glasglocke B (Rezipient) gestellt wird, in der man die Luft verdünnen will, und endlich drittens aus dem Hahne D (Fig. 126), der doppelt durchbohrt ist, so daß man den Stiefel einmal mit dem Rezipienten und das andere Mal mit der äußeren Luft in Verbindung setzen kann.

Wie verdünnt man die Luft in dem Rezipienten?

Versuche mit der Luftpumpe:

1. Der Rezipient wird von dem äußeren Luftdrucke so auf den Teller gedrückt, daß man ihn erst dann wieder abnehmen kann, wenn man wieder Luft hat einströmen lassen.

2. Die Magdeburger Halbkugeln.

3. Setzt man als Rezipient einen unten und oben offenen Metallzylinder auf den Teller und schließt ihn oben luftdicht mit einer Blase, so wird diese beim Auspumpen von der äußeren Luft zerdrückt; hält sie aber den Luftdruck aus, und durchsticht man sie mit einem sehr spitzen Federmesser, so wird sie in kleine Stücke zertrümmert.

4. Der Quecksilberregen.

Man benutzt hierzu einen kleinen Rezipienten (Fig. 127), der oben in einen offenen Hals ausläuft, auf den durch Messingfassung ein Holznapfchen a befestigt ist. Eine aus dem Boden des letzteren in den Rezipienten führende, runde, fingerdicke Öffnung ist luftdicht durch einen massiven Zylinder von Weidenholz b verschlossen, der in den Rezipienten bis über dessen Mitte hinabgeht, dessen obere Schnittfläche den Boden des Holznapfchens bildet,

Fig. 124.

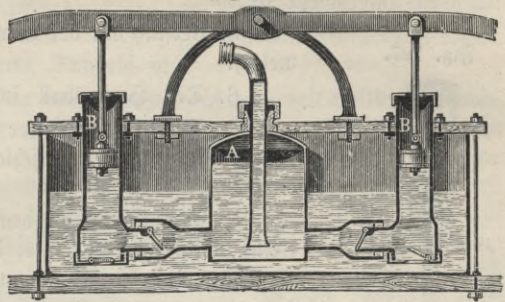


Fig. 126.

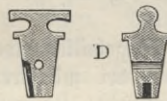
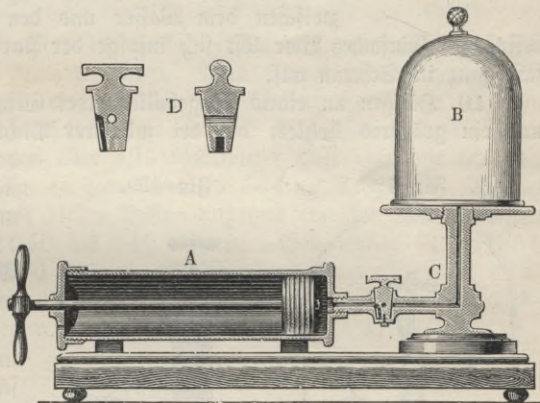


Fig. 125.



und der unten durch 4 schräge Schnitte zugespitzt ist. Das in das Näpfschen gegossene Quecksilber wird durch den Luftdruck durch das Weidenholz gedrückt und kommt an den unteren Schnittflächen in Form staubfeiner Tröpfchen oder haardünnere Strahlen heraus, zu deren Aufnahme ein Holznäpfschen untergesetzt ist.

Fig. 127.



5. Versuch mit der Barometerprobe (ein kleines Barometer).

6. Der Heronsball springt unter dem Rezipienten.

7. Ein verschrumpfter Apfel wird unter dem Rezipienten ganz glatt; eine schlaffe, zugebundene Blase schwillt an und platzt wohl gar.

8. Macht man an dem spitzen Ende eines Eies eine kleine Öffnung, stellt es, diese nach unten gekehrt, in ein Glas und bringt es unter den Rezipienten, so treibt die am runden Ende des Eies befindliche Luftblase den Inhalt heraus, sobald man die Luft verdünnt. Die ganze Masse geht aber in das Ei zurück, wenn man wieder Luft in den Rezipienten treten läßt.

9. Aus einem Gefäße mit Wasser steigen an den Wänden Luftblasen in die Höhe, ein Beweis, daß sich zwischen dem Wasser und den Gefäßwänden Luftteilchen befinden. Einfaches Bier löst sich in Folge der starken Kohlensäureentwicklung fast ganz in Schaum auf.

10. Hängen an einem Wagebalken zwei Gewichte, ein kleines massives und ein größeres hohles, die bei mittlerer Dichtigkeit der Luft einander

Fig. 128.

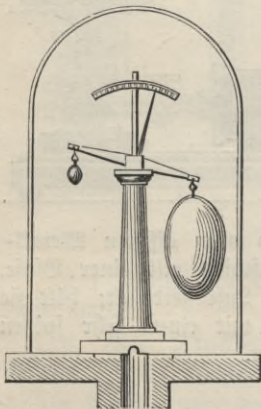
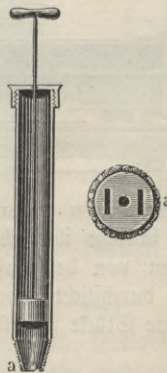


Fig. 129.



das Gleichgewicht halten, und stellt man diesen Apparat unter den Rezipienten (Fig. 128), so sinkt das größere Gewicht, wenn man die Luft in dem Rezipienten verdünnt.

11. Eine Flaumsfeder fällt in luftverdünnten Raume so schnell zu Boden wie ein Geldstück.

12. Eine unter dem Rezipienten angeschlagene Glocke hört man nicht.

13. Laues Wasser kocht, kaltes Wasser kann zum Gefrieren gebracht werden.

14. Ein Licht erlischt.

15. Ausstrahlung der Elektrizität im luftverdünnten Raume.

Die Verdichtungspumpe (Fig. 129) besteht aus einem Stiefel, in dem sich ein Kolben luftdicht bewegt. Am unteren Ende des Stiefels ist ein sich nach außen öffnendes Blasenventil a und nahe am oberen Ende in der Seitenwand, jedoch mehr als die Kolbenhöhe von diesem entfernt,

eine Öffnung; das Ende a läßt sich auf Gefäße mit starken Wänden aufschrauben.

Erkläre den Gebrauch! Wie kann man mit der gewöhnlichen Sahnluftpumpe die Luft verdichten? Die verdichtete Luft findet Anwendung zur Fortbewegung von Geschossen (Windbüchse), zur Bewegung von Maschinen, bei der Rohrpost, zum Empordrücken von Flüssigkeiten, zur Einführung reiner, kalter Luft in Keller, Bergwerke, Tunnels usw.

Die Saugpumpe war schon lange vorher, ehe man den Luftdruck kannte, im Gebrauch; man erklärte sich das Aufsteigen des Wassers in ihr durch die Annahme, daß die Natur einen Abscheu vor dem leeren Raume habe. Die zuerst von Brunnenbauern beobachtete Erscheinung, daß man mit einer Saugpumpe Wasser nur 10 m hoch heben könnte, brachte Torricelli auf die Vermutung, daß wohl die Schwere der Luft das Wasser in der Pumpe in die Höhe treibe. Er schloß nun: Wenn der Luftdruck einer Wassersäule von 10 Metern das Gleichgewicht hält, so muß er eine Quecksilbersäule von nur 76 Zentimetern Höhe tragen, da das Quecksilber $13\frac{1}{2}$ mal so schwer ist als Wasser, und fand durch den in § 86 angeführten Versuch seine Ansicht bestätigt.

Die Luftpumpe wurde von Otto v. Guericke (1602—1686), Ratscherrn zu Magdeburg, erfunden und zu Regensburg dem Kaiser Ferdinand III. vorgeführt.

Die Gebrüder Montgolfier ließen den ersten mit erwärmter Luft gefüllten Ballon 1783 zu Anonay steigen. Bald darauf füllte Charles, ein bekannter Physiker zu Paris, einen Ballon mit Wasserstoffgas, das ungefähr 14 mal so leicht ist als atmosphärische Luft. Sein Rauminhalt betrug 495 Kubikmeter. Es wiegen aber 495 Kubikmeter Luft ungefähr 607 kg, ebensoviel Wasserstoff 43 kg, er hatte demnach 564 kg Tragkraft. Charles stieg selbst nebst Robert mit diesem Ballon auf und erreichte binnen einigen Minuten eine Höhe von 750 bis 940 Metern. Gay-Lussac stieg (1804) bis zu einer Höhe von 6900 Metern, Glaisher und Cogwell erreichten im Jahre 1862 eine Höhe von 8838 Metern und Verson im Dezember 1894 eine solche von 9150 Metern (231 Millimeter Druck, — 47,9° C).

7. Diffusion.

§ 92. Die Erscheinung der Mischung zweier Körper ohne Einwirkung äußerer Kräfte haben wir bereits bei Flüssigkeiten kennen gelernt (§ 83). Daß auch Gase ineinander diffundieren, dafür ist die atmosphärische Luft ein Beispiel. Sie ist erfahrungsgemäß ein sehr konstantes Gasgemisch. Es sind enthalten in

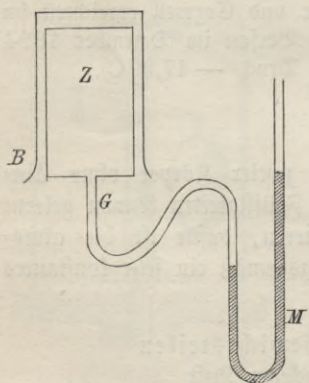
	100 Raumteilen trockener Luft	100 Gewichtsteilen trockener Luft	
Stickstoff	78,04 Raumteile	75,46 Gewichtsteile	Stickstoff
Sauerstoff	20,99 "	23,19 "	Sauerstoff
Argon	0,94 "	1,3 "	Argon
Kohlensäure	0,03 "	0,05 "	Kohlensäure.

Die Diffusion von Gasen kann man leicht zeigen, wenn man einen Standzylinder mit Leuchtgas füllt und ihn mit der nach unten gefehrten Öffnung auf einen gleich weiten, Luft enthaltenden Zylinder setzt. Nach etwa 10 Minuten befindet sich in beiden Gefäßen ein explosives Gasgemisch. Es muß also ein Teil des Leuchtgases, obgleich es spezifisch leichter als Luft ist, nach unten und ein Teil der Luft nach oben geströmt sein. Der Vorgang wird durch die Annahme verständlich, daß die Molekeln der Gase sich nach allen Richtungen hin bewegen (s. § 66). Dabei prallen sie fortgesetzt aufeinander, und es bedarf deshalb einer ziemlich langen Zeit, bis sich ein gleichmäßiges Gasgemisch gebildet hat. Der Druck dieses Gemisches ist gerade so groß wie der Luftdruck, dem die Gase vor der Diffusion ausgesetzt waren. Diese Tatsache hat zu der Vorstellung geführt, daß sich ein Gas in einem Raume, der bereits andere Gase enthält, gerade so ausbreitet, als ob jener Raum leer wäre, vorausgesetzt, daß jene Gase nicht chemisch aufeinander einwirken.

Wir wollen annehmen, daß in dem einen Zylinder anfänglich v_1 cem Leuchtgas, im anderen v_2 cem Luft vorhanden waren, und daß der Gasdruck in beiden Gefäßen b cem Quecksilber betrug. Dann müssen sich obiger Vorstellung gemäß die v_1 cem Leuchtgas nach beendigter Diffusion auf $v_1 + v_2$ cem ausgedehnt haben, und ihr Druck muß dem Boyle'schen Gesetz zufolge auf $\frac{v_1}{v_1 + v_2} b$ cem sinken. Aus gleichem Grunde muß der

Druck der v_2 cem Luft auf $\frac{v_2}{v_1 + v_2} b$ zurückgehen. Da die Summe dieser Partialspannungen gleich b ist, so steht obige Vorstellung mit der Erfahrung in Übereinstimmung, und erläutert das von Dalton (1801) gefundene Gesetz: **Der Druck eines Gasgemisches ist gleich der Summe der Drucke, die jedes Gas für sich allein ausübt.**

Fig. 130.



Gase diffundieren auch durch poröse Scheidewände. Um dies zu demonstrieren, verbindet man eine geschlossene Tonzelle Z (Fig. 130), in die ein Glasrohr G eingekittet ist, durch einen Schlauch mit dem einen Schenkel eines offenen Manometers M. Stülpt man über Z ein mit Leuchtgas gefülltes Becherglas B, so steigt sofort die Flüssigkeit in dem anderen Schenkel. Hieraus folgt, daß das spezifisch leichtere Leuchtgas

rascher in das Innere der mit Luft erfüllten Tonzelle einströmt als die Luft aus der Zelle in die umgebende Leuchtgasschicht. Die umgekehrte Erscheinung tritt ein, wenn man die Tonzelle in ein Gefäß taucht, das Kohlenäure enthält.

8. Absorption.

§ 93. a) Gase, die mit einer Flüssigkeit in Berührung sind, werden § 93. zum Teil von ihr aufgelöst. So ist bekannt, daß gewöhnliches Fluß- oder Leitungswasser eine beträchtliche Menge Luft enthält, die beim Erwärmen in Blasen entweicht. Sehr augenfällig zeigt sich bei verschiedenen künstlichen Getränken der Gehalt an Kohlensäure. Beim Öffnen einer Flasche Selterwasser wird ein großer Teil des eingepreßten Gases frei. Der Grund hierfür ist offenbar die plötzliche Druckentlastung, die bei Abnahme des Verschlusses eintritt. Nach Henry (1803) ist die Gasmenge, die sich bei einer bestimmten Temperatur in einem gegebenen Flüssigkeitsvolumen lösen kann, dem Druck des ungelöst bleibenden Gases proportional. V Liter Wasser z. B. absorbieren bei 0° 1,8 V Liter Kohlensäure von Atmosphärenspannung, bei n fachem Gasdruck dagegen die n fache Menge. Da diese nach dem Boyleschen Gesetz wiederum ein Volumen von 1,8 V Liter einnimmt, so ist das Verhältnis aus Flüssigkeitsvolumen zum gelösten Gasvolumen unabhängig vom Druck. Der konstante Faktor, der für Kohlensäure und Wasser von 0° 1,8 beträgt, heißt der Absorptionskoeffizient. Er ändert sich mit der Temperatur und der Natur der Flüssigkeit und des gelösten Gases. Folgende Werte des Koeffizienten beziehen sich auf die Löslichkeit in Wasser:

t°	Stickstoff	Sauerstoff	Kohlensäure	Ammoniak
0°	0,02	0,04	1,8	1050
10°	0,016	0,03	1,18	813
20°	0,014	0,028	0,9	654

Hiernach nimmt der Absorptionskoeffizient mit wachsender Temperatur ab. Man benutzt dies, um Flüssigkeiten durch Auskochen von den gelösten Gasen zu befreien.

b) Steht ein Gasgemisch, dessen Bestandteile nicht chemisch aufeinander einwirken, mit einer Flüssigkeit in Berührung, so sind die Volumina der gelösten Bestandteile proportional den Partialdrücken (§ 92) und den Absorptionskoeffizienten. Dies hat zur Folge, daß sich die Zusammensetzung eines Gasgemisches bei der Absorption gewöhnlich ändert. Da der Partialdruck

für den Stickstoff der atmosph. Luft 0,7804 · 76 cm Quecksilber
 " " Sauerstoff " " " 0,2099 · 76 cm " " "
 beträgt, so ergibt sich für das Volumenverhältnis des in Wasser von 10° in Lösung gehenden Stickstoffs und Sauerstoffs

$$\frac{V_N}{V_O} = \frac{0,7804 \cdot 0,016}{0,2099 \cdot 0,03} = 1,98.$$

Die absorbierte Luft enthält somit dem Volumen nach etwa 66% Stickstoff und 34% Sauerstoff, sie ist also sauerstoffreicher als die

atmosphärische Luft, was für die unter Wasser atmenden Tiere von Wichtigkeit ist.

c) Jeder feste Körper, der sich in einer Gasatmosphäre befindet, überzieht sich mit einer sehr dünnen, stark verdichteten Gasschicht, die fest an ihm adhärirt. Besonders lebhaft zeigt sich diese Erscheinung bei porösen Körpern, weil bei diesen die mit dem Gase in Berührung tretende Oberfläche verhältnismäßig sehr groß ist. Durch Erhitzen bis zum Glühen lassen sich die absorbierten Gase wieder austreiben. Fängt man Kohlensäure in einem Probiergläschen über Quecksilber auf und läßt ein frisch ausgeglühtes Stückchen Holzkohle in dem Gläschen aufsteigen, so erfüllt das Quecksilber in kurzer Zeit das ganze Probierglas, ein Beweis, daß die Kohlensäure vollständig absorbiert worden ist. (Warum sinkt anfangs die Quecksilbersäule etwas?)

Da bei jeder Gasverdichtung Wärme entwickelt wird, so findet auch bei der Gasabsorption durch feste Körper stets eine Erwärmung statt. Wenn Wasserstoffgas auf Platinschwamm strömt, so steigert sich die Erwärmung bis zum Glühen des Platinschwammes, und der Wasserstoff entzündet sich (Döbereiners Zündmaschine).

Sehr eigentümlich ist das Verhalten gewisser Metalle, nicht nur an der Oberfläche Gase zu verdichten, sondern sie gleichsam zu lösen. So kann Palladium eine Wasserstoffmenge verschlucken, deren Volumen bei Atmosphärendruck etwa das 1000fache des Metalls beträgt. Dabei nimmt das Volumen des Palladiums um 10% zu.

Teil V: Wellenlehre.

1. Fernwirkungen.

§ 94. § 94. Eine Kraftäußerung von einem Körper A auf einen entfernten B kann dadurch hervorgerufen werden, daß von A aus irgend eine Masse weggeschleudert wird, die B trifft. So übt z. B. ein Schütze durch die Kugel, die er abschießt, eine Wirkung auf das Ziel aus. Eine Einwirkung von A auf B kann aber auch dadurch zustande kommen, daß zwischen ihnen ein Seil, ein Stab, eine Wassermasse, die Luft oder irgend ein anderes Medium sich befindet, das die von A ausgehende Kraftäußerung von Teilchen zu Teilchen nach B übermittelt. In dieser Weise pflanzt sich z. B. eine Stoßwirkung durch eine Reihe sich berührender, elastischer Kugeln fort. (S. § 70.) Während im ersten Falle die übertragene Energie an den bewegten Stoff gebunden ist und mit diesem fortschreitet, wandert sie im zweiten Falle gleichsam durch den Stoff hindurch, indem jedes Teilchen den ihm aufgezwungenen Bewegungszustand an die benachbarten Teilchen mehr oder weniger vollständig abgibt.

Man hat versucht, auch diejenigen Fernwirkungen, wo weder ein Abschleudern von Massen noch die Erregung eines Mediums direkt wahrnehmbar ist, auf eine der beiden uns geläufigen Arten von Energieübertragung zurückzuführen. In der Optik z. B. herrschte bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts die Emissionshypothese, nach der man die Ausbreitung des Lichtes durch Lichtpartikelchen erklärte, die von den leuchtenden Körpern in zahlloser Menge ausgesandt würden. Als sich zeigte, daß diese Ansicht im Widerspruch mit gewissen Erfahrungstatsachen stand, ersetzte man sie durch die Huygens'sche Hypothese von der Wellennatur des Lichtes. Diese nimmt an, daß ein außerordentlich feiner und deshalb unwägbarer Stoff — der Äther — überall im Weltenraum verbreitet ist und alle Körper durchdringt. Ihm wird die Rolle des Mediums zugewiesen, das die Wirkungen des Lichts, der strahlenden Wärme und der elektrischen Strahlung überträgt. Die allgemeine Massenanziehung auf Nahwirkungen zurückzuführen ist bis jetzt nicht gelungen.

2. Wasserwellen.

§ 95. Werfen wir einen Stein in einen Teich, so bemerken wir, wie § 95. von der getroffenen Stelle A aus sich kreisförmige Erhöhungen und Vertiefungen auf der Oberfläche ausbreiten und einen von A entfernten Körper B, etwa ein auf dem Wasser schwimmendes Boot, in Bewegung setzen. Da, wo der Stein auftrifft, wird das Wasser zur Seite gedrängt, es bildet sich deshalb an dieser Stelle eine Vertiefung, ringsherum eine wallartige Erhöhung. Diese Gleichgewichtsstörung der Flüssigkeitsoberfläche kann nicht bestehen bleiben. Durch den Druck des umgebenden Wassers steigen an der Vertiefung die Teilchen empor, während die ringsförmig erhöhten wegen ihrer Schwere herabsinken. Gelangen die Teilchen in die ursprüngliche Gleichgewichtslage, so kommen sie hier nicht sofort zur Ruhe, sondern schwingen, ähnlich wie ein Pendel, darüber hinaus, so daß am Erregungsort eine Erhöhung, ringsherum eine Vertiefung entsteht. Letztere Bewegung veranlaßt wieder ein Aufsteigen der nach außen konzentrisch anliegenden Teilchen, die nun in gleichem Takt, doch etwas verspätet gegen die vorhergehenden, auf- und abspringen. Solange die Bewegung im Mittelpunkt dauert, entwickeln sich von hier aus immer neue Wellenberge und Wellentäler und breiten sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit nach allen Seiten auf der Oberfläche aus. Dadurch entsteht die Täuschung, als ob jedes einzelne Wasserteilchen eine nach außen fortschreitende Bewegung besäße. In Wirklichkeit verlassen sie nicht den Ort, an dem sie ihre Schwingungen ausführen, wie man an einem schwimmenden Stück Kork erkennt.

Die Gebr. Weber (1825) haben zuerst beobachtet, daß die Bewegungen der Teilchen in vertikalen, durch das Wellenzentrum gelegten Ebenen erfolgen und daß bei sehr regelmäßigen Wellen die Bahnen in der Nähe der Oberfläche kreisförmig sind.

Auf diesen Fall bezieht sich die Darstellung einer Wasserwelle in Fig. 131. Die Punkte 0 1 . . . 8 bezeichnen die Lage ebenso vieler gleichweit voneinander entfernten Wasserteilchen der unbewegten Oberfläche. Die Kreise geben die Bahnen an, die infolge der ankommenden

Fig. 131.



Welle von den einzelnen Wasserteilchen gleichförmig in der Richtung des Uhrzeigers durchlaufen werden. Hat 0 gerade seine erste Schwingung vollendet und ist die Bewegung dann von links nach rechts um die Strecke λ bis zum Punkt 8 fortgeschritten, so haben die Teilchen 1 2 . . . 7 der Reihe nach erst $\frac{7}{8}$, $\frac{6}{8}$. . . $\frac{1}{8}$ ihrer Bahn zurückgelegt und befinden sich in den Punkten 1_1 2_1 . . . 7_1 . Der diese Punkte verbindende Wellenzug zeigt die augenblickliche Lage der zwischen 0 und 8 gelegenen Wasserteilchen an, während die punktiert gezeichnete Wellenlinie von ihnen nach einer halben Schwingungsdauer gebildet wird.

Sobald das Teilchen 0 einen Umlauf vollendet hat, beginnt es den nächsten gleichzeitig mit 8, beide befinden sich deshalb stets in demselben Schwingungszustande. Das gleiche gilt für irgend zwei in der Fortpflanzungsrichtung um die Strecke λ , 2λ , 3λ . . . entfernte Punkte.

Man nennt die Strecke λ , um die die Bewegung fortschreitet, während ein Teilchen eine Schwingung ausführt, die Wellenlänge.

Wenn die Dauer einer Schwingung t Sekunden beträgt, so hat sich die Bewegung in 1 Sekunde um die Strecke $\frac{\lambda}{t}$ fortgepflanzt. Die Größe $c = \frac{\lambda}{t}$ heißt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Macht jedes Teilchen in 1 Sekunde n Schwingungen, so ist die Dauer einer Schwingung $t = \frac{1}{n}$ Sekunde und demnach $c = n\lambda$.

Auf tiefer See schreitet eine Welle von 63 m Länge um etwa 46 km in einer Stunde fort.

Bei den Wasserwellen ist die Schwerkraft die Ursache, daß ein aus der Gleichgewichtslage gebrachtes Teilchen periodische Bewegungen ausführt, deren Übertragung auf die Umgebung durch den Zusammenhang der Teilchen (Kohäsion) bewirkt wird. Wegen gewisser Ähnlichkeiten hat

man die Bezeichnung Wellenbewegung auf alle Erscheinungen ausgedehnt, wo durch periodische Zustandsveränderungen der Teilchen eines Mediums Energie übertragen wird, obgleich die Kräfte, die dabei ins Spiel kommen, von ganz anderer Art sind als bei den Wasserwellen.

3. Elastische Schwingungen.

§ 96. Eine vertikal herabhängende Drahtspirale, die an dem unteren § 96. Ende einen leichten, horizontalen Zeiger trägt, spannt man mäßig durch ein Gewichtstück von der Masse M Gramm (Fig. 132). Fügt man zu M der Reihe nach die Massen m , $2m$, $3m \dots$ Gramm hinzu, so beobachtet man an dem daneben stehenden Maßstabe eine Ausdehnung der Spirale um a , $2a$, $3a \dots$ cm, die Verlängerung wächst also proportional den spannenden Kräften, die die Übergewichte m , $2m$, $3m \dots$ erzeugen (Hookesches Gesetz § 67 a). Nach Entfernung dieser Massen verkürzt sich die Spirale wieder so weit, daß die Mitte von M sich in O befindet. Zieht man nun den Körper M mit der Hand um etwa $2a$ cm aus seiner Ruhelage nach unten, so vollführt er, sobald man ihn losläßt, sogenannte Sinusschwingungen (§ 10), deren Mittelpunkt O ist. Denn befindet sich M z. B. 1 cm unterhalb seiner Gleichgewichtslage, so wirkt auf ihn wie aus dem Vorversuch hervorgeht, eine nach oben treibende Kraft von $\frac{mg}{a}$ Dyn, nämlich der Überschuf der elastischen Kraft der Spirale über das Gewicht von M . Ist dagegen der Körper oberhalb seiner Gleichgewichtslage angelangt, so wirkt nun umgekehrt der Überschuf des Gewichtes von M über die elastische Kraft herabtreibend und ist in der Entfernung 1 cm von O wiederum gleich $\frac{mg}{a}$ Dyn. Hiernach erfährt die Masse M im Abstände

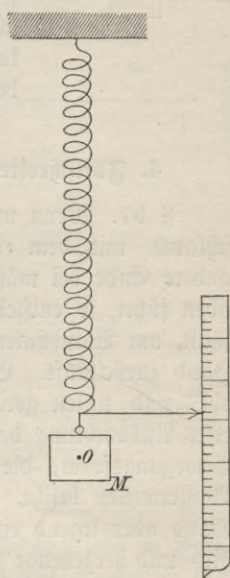
1 cm vom Schwingungsmittelpunkt die Beschleunigung $\frac{mg}{a \cdot M}$ [cm sec⁻²], also ergibt sich für die Schwingungsdauer zufolge der Ableitung in § 10

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{aM}{mg}},$$

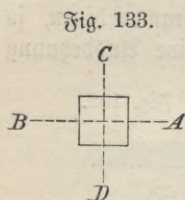
ein Resultat, das durch den Versuch sehr genau bestätigt wird. Da ferner in gleichen Zeiten stets gleich viel Schwingungen gezählt werden, obgleich die Amplitude allmählich abnimmt, so ist damit auch der von der Theorie geforderte Isochronismus (s. § 10) experimentell nachgewiesen.

Jeder elastische Körper läßt sich in Schwingungen versetzen, die den gleichen Gesetzen folgen wie die eben besprochenen. Befestigt man an der einen Zinke einer Stimmgabel eine Schreibspitze und führt an dieser, während die Gabel schwingt, eine beruhte Glasplatte mit gleichförmiger Geschwindigkeit vorbei, so ist die aufgezeichnete Wellenlinie fast genau eine Sinuskurve.

Fig. 132.



(S. Fig. 16.) Statt der Stimmgabel kann man auch einen Stahlstab benutzen, dessen eines Ende man in einem Schraubstock festgeklemmt hat. Ein derartiger Stab kann auch dazu dienen, die Zusammenfügung zweier senkrecht zueinander gerichteten Schwingungen zu zeigen. Ist sein Querschnitt quadratisch (Fig. 133), so versetzt ihn ein Stoß in der Richtung AB in Schwingungen von gleicher Dauer wie ein Stoß in der dazu senkrechten Richtung CD. Bei schiefem Anstoß führt er gleichzeitig beide Bewegungen aus, und sein freies Ende beschreibt eine Kurve (§ 10 c), die man deutlich beobachten kann, wenn an dem Stabende eine glänzende Perle befestigt ist.



4. Fortschreitende transversale und longitudinale Wellen.

§ 97. § 97. Wenn man ein langes, elastisches Seil, z. B. einen Gummischlauch, mit dem einen Ende an einem Wandhaken befestigt und das andere Ende bei mäßiger Spannung mit der Hand rasch ein wenig nach oben führt, so entsteht eine Ausbuchtung nach oben, die das Seil entlang läuft, am Wandhaken sich umkehrt und als Ausbuchtung nach unten zur Hand zurückläuft. Bei einem sehr langen Seil kann man mehrere, nach oben und unten gerichtete Rucke rasch aufeinander folgen lassen, bevor die erste Ausbuchtung das befestigte Ende erreicht. Man beobachtet dann eine Bewegungsform, die große Ähnlichkeit mit den Bergen und Tälern von Wasserwellen besitzt. Nehmen wir an, das freie Seilende werde durch die Hand oder irgend eine geeignetere Vorrichtung in eine vertikale, geradlinig hin- und hergehende Bewegung versetzt, die als Sinusschwingung angesehen werden kann, so läuft eine Wellenbewegung das Seil entlang, wie es die Fig. 134 darstellt. Hier bedeuten die Punkte 0, 1, . . . 8 ebenso viele, gleichweit voneinander abstehende Teilchen des horizontal gespannten Seiles in der Gleichgewichtslage, 0 das freie Seilende und A die Befestigungsstelle an der Wand. Ist in der Zeit von t Sek., in der 0 eine Schwingung vollendet hat, die Bewegung um die Strecke λ bis zum Punkt 8 fortgeschritten, so finden wir die Lage der Teilchen 1, 2 . . . 7 in diesem Augenblick auf ganz entsprechende Weise wie bei der Zeichnung der Wasserwellen Fig. 131. Denken wir uns bei diesen die gleichförmige Kreisbewegung jedes Teilchens in eine vertikale und horizontale Schwingung zerlegt (§ 10) und die Bewegung in horizontaler Richtung unterdrückt, so würde jedes Wasserteilchen, mathematisch genommen, genau in derselben Weise schwingen wie die Teilchen des elastischen Seiles. Könnten wir dagegen allein die vertikale Bewegung unterdrücken, so würde jedes Wasserteilchen nur horizontal, also in der Fortpflanzungsrichtung schwingen. In Fig. 135 sind für eine elastische Punktreihe 0, 1 . . . 8 die Lagen gezeichnet, die jedes Teilchen einnimmt, wenn 0 eine horizontale Schwingung

vollendet hat und die Bewegung in dieser Zeit bis 8 fortgeschritten ist. Bei 0' und 8' hat sich eine Verdichtung, bei 4' eine Verdünnung gebildet. An den entsprechenden Stellen der Fig. 134 besitzen in demselben Augenblick die Teilchen des Seiles die größte Geschwindigkeit nach aufwärts oder abwärts.

Man nennt eine Welle transversal oder longitudinal, je nachdem die Schwingungen der Teilchen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung oder in dieser Richtung erfolgen. Für beide Arten von Bewegung besteht

Fig. 134.

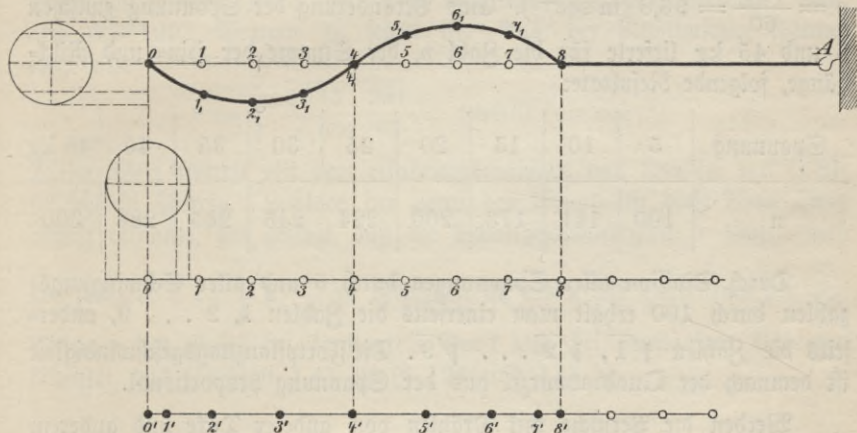


Fig. 135.

zwischen Wellenlänge λ , Schwingungsdauer t , Schwingungszahl n , Fortpflanzungsgeschwindigkeit c die für Wasserwellen (§ 95) abgeleitete Beziehung $c = \frac{\lambda}{t} = n\lambda$.

Das Fortschreiten einer longitudinalen Welle in einem elastischen Mittel läßt sich an einer horizontal aufgehängenen Drahtspirale (Weinhold) beobachten. Ein Stoß, der das eine Ende in der Längsrichtung trifft, drängt die Windungen an dieser Stelle zusammen, ein Zug in entgegengesetzter Richtung entfernt sie voneinander. Man sieht, wie Verdichtung und Verdünnung die Spirale entlang laufen. In welcher Weise sich ein Stoß in einer Reihe elastischer Kugeln fortpflanzt, wurde im § 70,2 auseinandergesetzt.

5. Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

§ 98. a) Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Seilwelle läßt sich § 98. vermittelt eines sehr langen, horizontal gespannten Drahtes experimentell bestimmen. Grimsehl¹⁾ empfiehlt, als spannende Kraft nicht Gewichte zu

¹⁾ Pöschelsche Zeitschrift. XV. Jahrg. S. 200.

benutzen, sondern mit Hilfe eines Flaschenzuges den Draht zu spannen und die Spannung an einer eingeschalteten Federwaage zu messen. Erteilt man dem Draht nahe an einem Ende einen kurzen Schlag mit dem Finger, so läuft die dadurch hervorgerufene Gleichgewichtsstörung als Ausbiegung bis an das andere Drahtende und wieder zurück zur Hand. Bei einem etwa 60 m langen Stahldraht von 0,93 mm Dicke konnte G. auf einem Drahtstück von 58,1 m Länge, das durch untergesetzte Stege abgegrenzt wurde, in 1 Minute 50 Hin- und Rückgänge zählen, wenn die Spannung 5 kg betrug. Hieraus ergibt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $c = \frac{5810}{60} = 96,8$ (m sec⁻¹). Eine Veränderung der Spannung zwischen 5 und 45 kg lieferte für die Zahl n, der Summe der Hin- und Rückgänge, folgende Resultate:

Spannung	5	10	15	20	25	30	35	40	45 kg
n	100	141	173	200	224	245	265	283	300

Durch Division aller Spannungen durch 5 und aller Schwingungszahlen durch 100 erhält man einerseits die Zahlen 1, 2 . . . 9, andererseits die Zahlen $\sqrt{1}$, $\sqrt{2}$. . . $\sqrt{9}$. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist demnach der Quadratwurzel aus der Spannung proportional.

Werden die Versuche mit Drähten von anderer Dicke und anderem Material wiederholt, so findet man ferner, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Masse der Längeneinheit des Drahtes ist. Diese Resultate lassen sich durch die Formel wiedergeben $c = \sqrt{\frac{e}{d}}$ (cm sec⁻¹), wo e die Spannung in Dyn und d die Masse von 1 cm Draht in Grammen bezeichnet. Für den Stahldraht von 0,093 cm Dicke und 7,7 spez. Gewicht ist bei einer Spannung von 5 kg = 5000 · 981 Dyn

$$c = \sqrt{\frac{5000 \cdot 981}{0,0465^2 \cdot \pi \cdot 7,7}} = 9684 \text{ (cm sec}^{-1}\text{)}.$$

b) Ein sehr wichtiges Beispiel für das Fortschreiten einer longitudinalen Gleichgewichtsstörung im elastischen Mittel ist die Fortpflanzung des Schalles in der Luft. Jeder elastische Körper, der in Schwingungen versetzt wird, ruft in der ihn umgebenden Luft abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen hervor, die sich im allgemeinen mit gleichförmiger Geschwindigkeit nach allen Richtungen hin ausbreiten. Sind die Schwingungen rasch genug, so werden die unser Ohr treffenden Luftstöße als Schall empfunden. Die Geschwindigkeit des Schalles ist demnach auch die Geschwindigkeit, mit der eine Luftwelle fortschreitet. Genaue Versuche

wurden 1822 bei Paris von Arago, Gay-Lussac, Humboldt und anderen angestellt, die auf zwei Stationen von 10 zu 10 Minuten Kanonenschüsse abfeuern ließen, deren Blitz und Knall man an beiden Orten wahrnehmen konnte. Man fand auf diese Weise für die Schallgeschwindigkeit in Luft von 16° C. den Wert von etwa 341 (m sec⁻¹).

Newton hatte auf theoretischem Wege die Formel $c = \sqrt{\frac{e}{d}}$ abgeleitet, wo e die Spannung und d die Dichtigkeit der Luft bezeichnet. Für Luft beträgt bei 0° und 76 cm Barometerstand die Spannung, d. i. der Druck auf 1 qcm, 1033 · 981 Dyn, während für d die Masse von 1 cem, also 0,001293 Gramm zu setzen ist. Aus der Newtonschen Formel folgt also

$$c = \sqrt{\frac{1033 \cdot 981}{0,001293}} = 28000 \text{ (cm sec}^{-1}\text{)}.$$

Dieser Wert stimmt mit dem erfahrungsmäßigen von 333 (m sec⁻¹) für 0° schlecht überein. Laplace, der zuerst den Grund für diese Abweichung richtig erkannte, hat gezeigt, daß die Schallgeschwindigkeit in Gasen nach

der Formel $c = \sqrt{k \cdot \frac{e}{d}}$ zu berechnen ist, wo k das Verhältnis der spez.

Wärmen des Gases bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen bedeutet, das für Luft 1,41 ist (§ 127 und 137₄).

6. Interferenz.

§ 99. Wenn man auf einer Wasserfläche gleichzeitig an zwei, nicht § 99. zu weit entfernten Punkten Wellen erregt, so sieht man, wie bei weiterer Ausbreitung die beiden Bewegungen zum Teil übereinander hinlaufen und die Wasserfläche in ein zierliches Netzwerk von Erhöhungen und Vertiefungen zerschneiden, während außerhalb des gemeinsamen Wirkungsbereichs die jedem System angehörigen Wellenkreise sich ungestört fortpflanzen. Da, wo zwei gleich hohe Berge sich übereinanderlegen, wird das Wasser auf die doppelte Höhe gehoben, wo ein Tal mit einem gleich tiefen Tal zusammentrifft, sinkt es zur doppelten Tiefe herab. Begegnet sich Berg und Tal, so heben sich gegenseitig ihre Wirkungen auf, wenn die Höhe des Berges gleich der Tiefe des Tales ist.

Man bezeichnet die Vorgänge, die durch das Zusammenwirken mehrerer Wellenbewegungen verursacht werden, als Interferenzerscheinungen. Bei den wichtigsten uns bekannten Schwingungen in elastischen Mitteln sind die Ausbiegungen der Teilchen meist so klein, daß die von einer Erregungsstelle ausgehenden Wellen die Eigenschaften des Mediums nicht merklich ändern. Deshalb pflanzen sich, wenn gleichzeitig von einer anderen Stelle Wellen ausgesendet werden, die Bewegungen beider Systeme so fort, als ob jedes allein vorhanden wäre (Prinzip von der Übereinanderlagerung

oder Superposition der Schwingungen). Interferieren also mehrere Wellen, so erfährt jedes Teilchen eine Verschiebung, die gleich der algebraischen Summe ist aus allen ihm gleichzeitig mitgetheilten einzelnen Verschiebungen.

7. Huygens'sches Prinzip.

§ 100. In einem dreidimensionalen Mittel schreitet von dem Punkt, wo Wellen erregt werden, die Bewegung nach allen Richtungen fort. Nach einer gewissen Zeit gelangt sie bis zu bestimmten Punkten, die alle auf einer Fläche liegen, die man Wellenfläche nennt und die dadurch ausgezeichnet ist, daß auf ihr überall gleichzeitig derselbe Schwingungszustand herrscht. In einem vollkommen gleichartigen Mittel pflanzt sich eine Welle in jeder Richtung gleich schnell fort. Alle Wellenflächen sind also in diesem Falle konzentrische Kugelschalen, die den Erregungsort zum Mittelpunkt haben.

Man kann nun annehmen, daß für die Wirkung, die vom Wellenzentrum auf einen entfernten Punkt übertragen wird, nur jene Bewegung maßgebend ist, die scheinbar auf dem Verbindungsstrahl beider Punkte fortschreitet. Eine andere Vorstellung, die den wirklichen Vorgängen bei einer Wellenausbreitung jedenfalls mehr entspricht, rührt von Huygens her (1690). Nach diesem ist jeder Punkt einer Wellenfläche, da er in

Fig. 136.

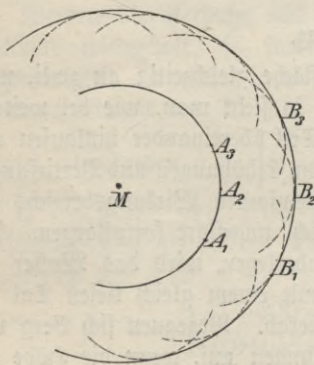
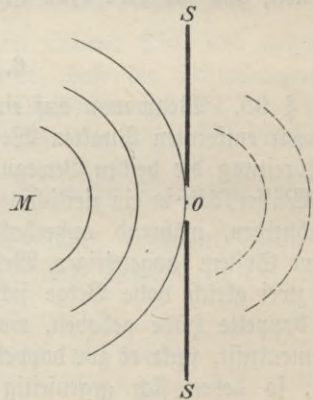


Fig. 137.



derselben Weise schwingt wie das Zentrum, als Ausgangspunkt eines neuen Wellensystems anzusehen, und die Gesamtwirkung auf einen entfernten Punkt läßt sich durch die einer beliebigen Wellenfläche des Erregungsortes ersetzen, die jenen Punkt nicht einschließt.

Eine Welle sei von M aus bis zur Kugelfläche $A_1, A_2, A_3 \dots$ vom Radius R gelangt (Fig. 136). Von $A_1, A_2, A_3 \dots$ gehen nun kugelförmige Wellen aus, deren Radius nach einer gewissen Zeit r sein wird. Durch das Zusammenwirken aller dieser unzähligen vielen Elementarwellen

kommt die große Hauptwelle $B_1, B_2, B_3 \dots$ zustande mit dem Mittelpunkt M und dem Radius $R + r$, die alle Elementarwellen einhüllt.

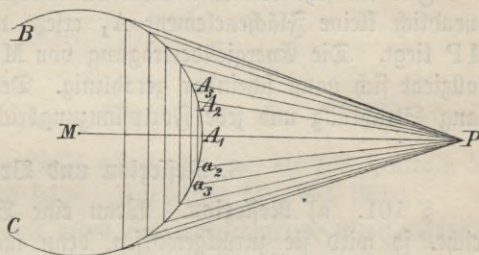
Auf einer größeren Flüssigkeitsoberfläche läßt sich das Huygens'sche Prinzip durch einfache Versuche veranschaulichen. Stellen wir z. B. in den Weg der Wellen, die in M erregt werden, einen Schirm S mit einer Öffnung O , dann breiten sich hinter dem Schirm schwache, kreisförmige Wellen aus, deren Mittelpunkt nicht M ist, sondern in der Öffnung O liegt (Fig. 137).

Um die Entstehung eines umhüllenden Wellenkreises zu zeigen, ruft man gleichzeitig in einer Reihe von Punkten der Flüssigkeitsoberfläche Einzelwellen hervor.

Das Huygens'sche Prinzip hat durch Fresnel (1788—1827) eine wichtige Erweiterung erfahren. Huygens nahm an, die Schwingungswerte auf einer Elementarwelle wäre unendlich klein im Vergleich zu der Schwingungswerte der Teilchen auf der Hauptwelle, denn erstere werden nur durch ein einzelnes Teilchen A_1 oder A_2 usw. verursacht, die Bewegung auf der Hauptwelle dagegen durch unzählig viele Elementarwellen.

Fresnel untersuchte mathematisch, welche Wirkungen auf einen Punkt P sämtliche Elementarwellen ausüben, die von den Punkten einer Wellenfläche BC ausgehen (Fig. 138), und wies nach, daß dabei nur ein dem Strahle MP zunächst gelegener kleiner Teil der Wellenfläche in Betracht kommt, da die Wirkung der anderen Teile von BC auf P durch Interferenz vernichtet wird.

Fig. 138.



Wir bezeichnen die Länge der von M ausgesandten Wellen mit λ

und beschreiben um P Kreise mit den Radien $PA_1 + \frac{\lambda}{2}, PA_2 + 2 \frac{\lambda}{2},$

$PA_3 + 3 \frac{\lambda}{2} \dots$, die auf der Wellenfläche BC die Zonen $Z_1 = A_2 A_1 a_2,$

$Z_2 = A_3 A_2 a_2 a_3 \dots$ ausschneiden. Es läßt sich dann zu jedem Punkt einer beliebigen Zone stets ein Punkt auf einer der beiden benachbarten

so finden, daß ihre Entfernungen von P sich um $\frac{\lambda}{2}$ unterscheiden. Da

überall auf BC gleichzeitig derselbe Schwingungszustand herrscht, so müssen die von jenen Punkten gleichzeitig nach P gelangenden Elementarwellen

stets einen Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$ haben und müssen sich deshalb gegen-

seitig schwächen. Um diesen Umstand in Rechnung zu ziehen, versehen wir die Wirkungen $w_1, w_3, w_5 \dots$ der Zonen $Z_1, Z_3, Z_5 \dots$ mit dem

Vorzeichen +, dagegen $w_2, w_4, w_6 \dots$ mit dem Vorzeichen —. Die Gesamtwirkung der Wellenfläche BC auf P ist dann $W = w_1 - w_2 + w_3 - w_4 + w_5 - \dots$.

Der Inhalt irgend einer Zone ist aber, wie sich elementar beweisen läßt, das arithmetische Mittel aus den Inhalten der beiden benachbarten Zonen, also $Z_n = \frac{Z_{n-1} + Z_{n+1}}{2}$, und für eine Wellenlänge λ , die im Verhältnis zu MP und MA_1 sehr klein ist, kann man die Einzelwirkungen auf P von je drei benachbarten Zonen ihrem Inhalt proportional annehmen, also $w_n = \frac{w_{n-1} + w_{n+1}}{2}$. Es ergibt sich somit

$$W = w_1 - \frac{w_1 + w_3}{2} + w_3 - \frac{w_3 + w_5}{2} + w_5 - \dots$$

Je nachdem man diese Reihe beim n ten oder $n+1$ ten Gliede abbricht, erhält man

$$W = \frac{w_1}{2} + \frac{w_n}{2} \quad \text{oder} \quad \frac{w_1}{2} - \frac{w_{n+1}}{2}.$$

Da die Wirkungen der einzelnen Zonen um so mehr abnehmen, je weiter diese von P entfernt sind, so kann man das letzte Glied gegen das erste vernachlässigen und findet

$$W = \frac{w_1}{2}.$$

Für ein sehr kleines λ kann die wirkjame halbe Zone Z_1 durch das unendlich kleine Flächenelement A_1 ersetzt werden, das auf dem Strahl MP liegt. Die Energieübertragung von M auf P durch Wellenbewegung vollzieht sich dann scheinbar geradlinig. Deshalb nennt man diesen Vorgang Strahlung und jede Fortpflanzungsrichtung einen Strahl.

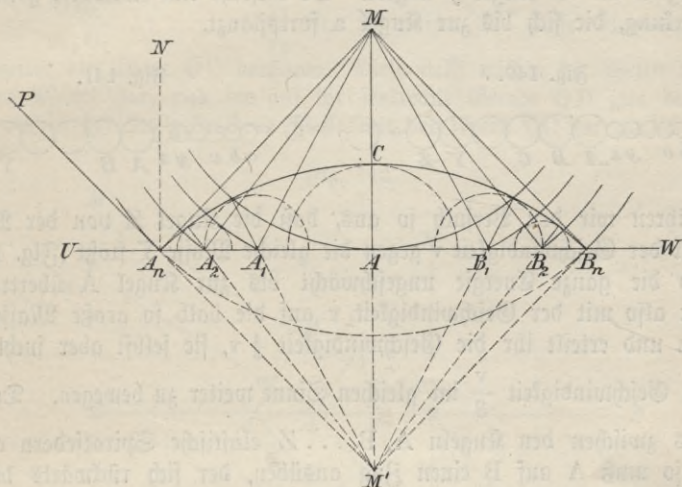
8. Reflexion und Brechung.

§ 101.

§ 101. a) **Reflexion.** Wenn eine Wasserwelle das feste Ufer erreicht, so wird sie zurückgeworfen, denn man sieht, wie eine neue Welle von hier aus sich nach rückwärts ausbreitet. Eine von M ausgegangene Welle trifft nach T Sek. die Uferwand UW zuerst mit ihrem vordersten Punkt in A (Fig. 139). Hier beginnt die Zurückwerfung. Etwa t Sek. später ist um A eine halbkreisförmige Elementarwelle vom Radius $AC = r$ durch Reflexion entstanden, so daß die Bewegung auf dem Strahle MA innerhalb $T + t$ Sek. den Weg $MA + r$ zurückgelegt hat. Während dieser Zeit ist aber die ursprüngliche Welle auf jedem durch M gezogenen Strahl, der in der Wasserfläche liegt, um die gleiche Strecke $MA + r$ fortgeschritten und würde sich, wenn kein Hindernis vorhanden wäre, zu einem vollständigen Kreise mit dem Radius $MA_n = MA + r$ erweitern haben. In der Zeit von t Sek. sind alle Punkte der Wand zwischen A_n und B_n von der allmählich sich ausdehnenden, direkten Welle getroffen worden. Es müssen sich also um diese Punkte durch Zurückwerfung Halbkreiswellen gebildet haben vom Radius $r_1 = MA_n - MA_1$,

$r_2 = MA_n - MA_2$ usw. Beschreibt man um den Punkt M' , der symmetrisch zu M in bezug auf die Wand gelegen ist, den durch A_n und B_n gehenden Kreis, so berührt dieser sämtliche von $A, A_1, A_2 \dots B_1, B_2 \dots$ ausgegangenen Elementarwellen, denn es ist die Zentrallinie $M'A = M'A_n - r$, ferner $M'A_1 = M'A_n - r_1$, $M'A_2 = M'A_n - r_2$ usw. Die zurückgeworfene Welle hat also auf Grund des Huygens'schen Prinzips $T + t$ Sek. nach dem Abgang der ursprünglichen Welle von M , oder t Sek. nach Beginn der Reflexion die Form des Kreisbogens $A_n C B_n$.

Fig. 139.



In diese Lage würde auch eine Welle gekommen sein, die das Zentrum M' $T + t$ Sek. vorher ausgesandt hätte. Es besteht also das Gesetz:

Von einer ebenen Wand wird eine ankommende Welle gerade so reflektiert, als ginge sie von einem Mittelpunkt aus, der ebensoweit hinter dieser Wand liegt wie der Mittelpunkt der ankommenden Welle vor der Wand.

Die Fortschrittrichtung einer Welle in irgend einem Punkte wird durch die Normale auf der zugehörigen Wellenfläche angegeben. Für den Punkt A_n der ursprünglichen Welle ist MA_n diese Richtung, während die reflektierte Welle sich in der Richtung $M'A_n P$ fortpflanzt. Errichtet man auf der Wand in A_n die Senkrechte $A_n N$, das sogenannte Einfallslot, so ist der Einfallswinkel $MA_n N$ gleich dem Reflexionswinkel $PA_n N$. Obiges Gesetz kann also auch so ausgesprochen werden:

Eine Welle wird von einer ebenen Wand so zurückgeworfen, daß der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist.

Im § 70 Nr. 2 hatten wir aus Stoßversuchen an einer Reihe elastischer Kugeln erkannt, daß eine Bewegungsenergie, die an die Grenze

zweier elastischen Mittel gelangt, nur zum Teil in das zweite Mittel übergeht, der Rest aber reflektiert wird. Stößt die Kugel a (Fig. 140), deren Masse m sei, mit der Geschwindigkeit v gegen die gleiche Kugel b, so teilt sie dieser ihre Geschwindigkeit mit und kommt zur Ruhe, b drückt nun gegen c, und so wird die ursprüngliche Energie des Stoßes auf die letzte, gleich große Kugel z übertragen. Diese trifft auf die Kugel A von der Masse $2m$ und erteilt ihr die Geschwindigkeit $\frac{2}{3}v$ (s. § 70), während sie selbst mit der Geschwindigkeit $\frac{v}{3}$ zurückgeworfen wird und diese Geschwindigkeit an die Kugel y abgibt. So entsteht eine rückwärts gerichtete Stoßwirkung, die sich bis zur Kugel a fortpflanzt.

Fig. 140.

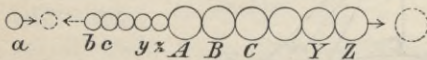
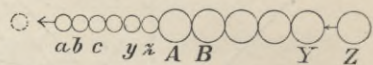


Fig. 141.



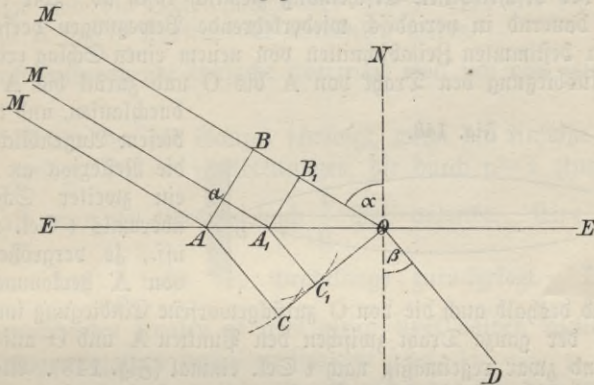
Führen wir den Versuch so aus, daß die Kugel Z von der Masse $2m$ mit der Geschwindigkeit v gegen die gleiche Masse Y stößt (Fig. 141), so wird die ganze Energie ungeschwächt bis zur Kugel A übertragen. A trifft also mit der Geschwindigkeit v auf die halb so große Masse der Kugel z und erteilt ihr die Geschwindigkeit $\frac{1}{3}v$, sie selbst aber sucht sich mit der Geschwindigkeit $\frac{v}{3}$ im gleichen Sinne weiter zu bewegen. Denken wir uns zwischen den Kugeln A, B, ... Z elastische Spiralfedern angebracht, so muß A auf B einen Zug ausüben, der sich rückwärts bis Z fortpflanzt. Es findet also auch in diesem Falle Reflexion statt. Während sich aber bei der Reflexion am dichteren Mittel die Geschwindigkeitsrichtung des stoßenden Teilchens umkehrt und die Bewegung mit entgegengesetzter Phase zurückgeworfen wird, behält bei der Reflexion am dünneren Mittel das letzte Teilchen seine Geschwindigkeitsrichtung bei, die Zurückwerfung geschieht ohne Phasenänderung.

Dieser Unterschied zeigt sich nicht nur bei longitudinalen Verschiebungen, er kann auch bei transversalen Gleichgewichtstörungen beobachtet werden. Bei den Versuchen mit einem gespannten Seil oder Draht § 97 und 98 a findet die Reflexion am befestigten Ende, also an einem verhältnismäßig unendlich dichten Mittel statt. Die Reflexion an einem dünneren Mittel läßt sich zeigen, wenn man das eine Seilende an eine Seidenschnur knüpft und deren freies Ende an einer Wand befestigt.

b) **Brechung.** Wir untersuchen noch auf Grund des Huygensschen Prinzips die Richtungsänderung oder Brechung, die eine Welle beim Übergang aus einem Medium in ein anderes erfährt, wenn beide Mittel in Punkten einer Ebene EE sich berühren und die von einem Wellenzentrum M ausgehenden Strahlen in schräger Richtung jene Ebene treffen (Fig. 142).

AaB sei ein kleiner Teil einer Wellenfläche und M weit genug entfernt, so daß wir diesen Teil als eben und die zugehörigen Wellenstrahlen, da sie senkrecht zu AaB sind, als parallel ansehen können. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im ersten Mittel sei v_1 , im zweiten v_2 . In dem Augenblick, wo die Bewegung auf dem linken äußeren Strahle MA das zweite Medium erreicht, befindet sie sich auf dem rechten äußeren Strahle erst in B, auf einem beliebigen mittleren Strahle in a . Während die Bewegung auf MB bis O fortschreitet, sind alle Punkte zwischen A und O von Wellenstrahlen getroffen worden, und es haben sich um sie im zweiten Mittel elementare Kugelwellen vom Radius AC, A_1C_1 usw. gebildet. Da $\frac{OB}{AC} = \frac{OB_1}{A_1C_1} \dots = \frac{v_1}{v_2}$ ist, so müssen alle diese Elementarwellen gleichzeitig die Ebene OC berühren. Diese stellt mithin die Wellenfläche im zweiten Mittel dar, und die auf ihr senkrechte Gerade OD gibt die Richtung an, in der die gebrochene Welle mit der Front OC im zweiten Mittel

Fig. 142.



sich ausbreitet. Bildet der einfallende Strahl BO mit dem Einfallslot NO den Winkel α , der gebrochene Strahl OD mit der Verlängerung von NO den Winkel β , so ist

$$\sin \alpha = \sin OAB = \frac{OB}{AO}$$

$$\sin \beta = \sin AOC = \frac{AC}{AO}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{OB}{AC} = \frac{v_1}{v_2}$$

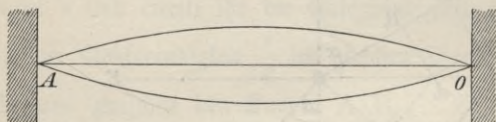
In der Optik heißt der Quotient $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ der Brechungsquotient, und es wird dort experimentell gezeigt, daß er für dieselben beiden Mittel eine unveränderliche Größe hat, für Luft—Wasser z. B. $\frac{4}{3}$. Besteht also das Licht in einer Wellenbewegung, so folgt aus obiger Entwicklung, daß sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft zu der in Wasser wie 4:3 verhalten muß (s. § 205,3).

9. Stehende Wellen.

§ 102. § 102. Eine bemerkenswerte Wellenform entsteht, wenn zwei sich entgegelaufende Wellenzüge von gleicher Wellenlänge und Amplitude interferieren. Die Erscheinung kann z. B. bei einem gespannten Seil oder Draht beobachtet werden, an dessen einem Ende eine äußere Kraft Wellen erregt, die sich mit den am anderen Ende reflektierten Wellen übereinander lagern.

Wir nehmen an, ein Draht sei zwischen den festen Punkten A und O horizontal gespannt. Durch einen Schlag nahe bei A rufen wir eine Ausbiegung nach oben hervor. Sie läuft mit gleichförmiger Geschwindigkeit den Draht entlang, wird bei O zurückgeworfen und kehrt als Ausbiegung nach unten mit derselben Geschwindigkeit nach A zurück. Nun tritt Reflexion an A ein, und eine Ausbiegung nach oben schreitet wiederum nach O fort usw. Die Teilchen des Drahtes führen also eine Bewegung aus, die sich wiederholen muß, sobald die Ausbiegung die doppelte Drahtlänge zurückgelegt hat. Wegen der Steifigkeit des Drahtes und des Luftwiderstandes nimmt die Intensität der beschriebenen Erscheinung ziemlich rasch ab. Wir können aber den Draht dauernd in periodisch wiederkehrende Bewegungen versetzen, wenn wir ihm in bestimmten Zeitabschnitten von neuem einen Schlag erteilen. Hat die erste Ausbiegung den Draht von A bis O und zurück bis A in t Sek.

Fig. 143.



durchlaufen, und trifft ihn in diesem Augenblick, wo also die Reflexion an A erfolgt, ein zweiter Schlag, nach abermals t Sek. ein dritter usw., so vergrößert sich die von A herkommende Ausbiegung und deshalb auch die von O zurückgeworfene Einbiegung immer mehr, bis endlich der ganze Draht zwischen den Punkten A und O auf- und abschwingt, und zwar regelmäßig nach t Sek. einmal (Fig. 143). Alle Teilchen führen dabei bis auf die festen Punkte A und O senkrecht zur Ruhelage gerichtete Schwingungen aus. Sie erreichen gleichzeitig ihre relativ größte Ausweichung nach oben und unten und gehen auch zur selben Zeit durch die Gleichgewichtslage, sie befinden sich demnach stets in demselben Schwingungszustande.

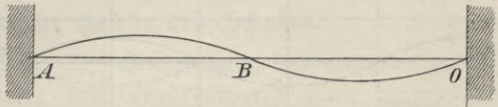
Man nennt eine derartige Bewegung eine stehende Welle und die festen Punkte Knotenpunkte.

In der Zeit t , in der jedes Teilchen eine Schwingung vollendet hat, würde eine einzelne Ausbiegung die doppelte Drahtlänge durchlaufen. Diese Strecke stellt nach § 95 eine Wellenlänge dar. Die Entfernung der beiden Knotenpunkte A und O ist somit gleich einer halben Wellenlänge.

Erteilen wir dem Draht jedesmal dann einen Stoß, wenn eine Ausbiegung von A nach O gelangt, einen neuen Stoß, wenn die darauffolgende Einbiegung von O nach A gekommen ist, so vergrößern sich wiederum rasch die anfangs kleinen Aus- und Einbiegungen, doch nur so lange, bis jede gleich der halben Drahtlänge geworden ist und dieser in zwei Abteilungen mit einem Knoten in der Mitte schwingt. Denn hat in einem bestimmten

Augenblick eine von A ausgegangene Ausbiegung die Lage AB (Fig. 144), so hat gleichzeitig die ihr vorangegangene und bei O reflektierte Ausbiegung die Lage der Einbiegung OB. Jene sucht B nach oben, diese mit gleicher Kraft in entgegengesetzter Richtung nach unten zu treiben. Die Folge davon ist, daß B in Ruhe bleibt. Daran wird auch nichts geändert, wenn in den nächsten Augenblicken beide Impulse, der eine nach rechts, der andere nach links fortschreiten, da die Aus- und Einbiegungen stets symmetrisch zu B liegen. Es muß sich also dauernd in B ein Knotenpunkt bilden. Wir können den Vorgang so ansehen, als ob zwei Drähte AB und BO vorhanden wären, von denen jeder selbständig als Ganzes, und zwar stets nach entgegengesetzten Seiten schwingt. In der Zeit, in der jede Draht-
hälfte, also auch ein Draht-
teilchen, eine Schwingung vollendet, pflanzt sich ein Stoß um die Strecke AO fort. Demnach sind die Wellenlänge und die Schwingungsdauer halb so groß wie im ersten Falle, wo nur in A und O Knotenpunkte vorhanden waren.

Fig. 144.



Durch entsprechende Versuche überzeugt man sich von folgenden Tatsachen:

Ein Draht, der als Ganzes schwingt, wenn die Anstöße nach t Sek. erfolgen, zerlegt sich in p Abteilungen, die durch $p-1$ Knoten getrennt sind, sobald man ihn jedesmal nach $\frac{t}{p}$ Sek. antreibt. Eine Ausbiegung hat dann das $\frac{2}{p}$ -fache der Drahtlänge zurückgelegt. Der Abstand zweier benachbarten Knoten ist stets gleich einer halben Wellenlänge, und die Schwingungszahlen verhalten sich wie $1:2:3:\dots:p$.

Nach § 98a pflanzt sich eine Drahtwelle mit der Geschwindigkeit $c = \sqrt{\frac{e}{d}}$ fort. Für einen Draht von l cm Länge, der in t Sek. als

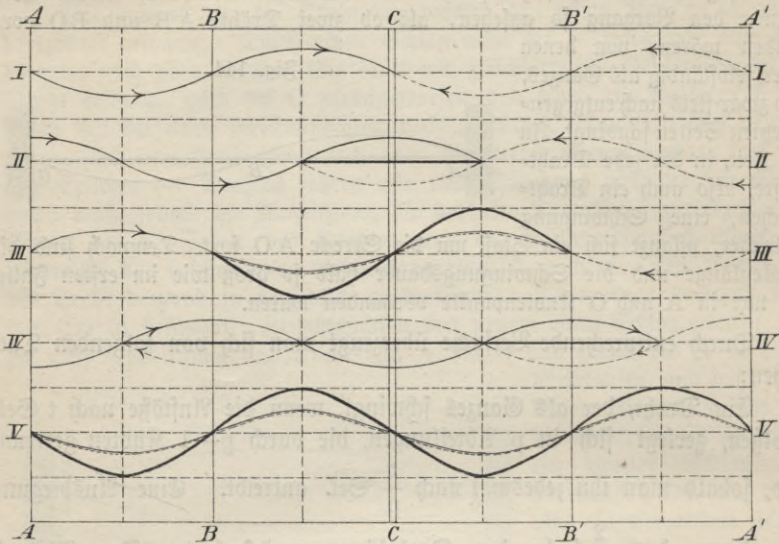
Ganzes einmal auf- und abschwingt, ist $c = \frac{2l}{t} = \sqrt{\frac{e}{d}}$, also $\frac{1}{t} = n =$

$\frac{1}{2l} \sqrt{\frac{e}{d}}$. In dieser Formel ist die Spannung e in Dyn, die Masse d eines 1 cm langen Drahtstückes in Gramm gemessen. Hat man die spannende Kraft im praktischen Maßsystem = K Gramm, den Radius des Drahtquerschnittes = r cm und das spez. Gewicht des Drahtes = s bestimmt, so findet man $n = \frac{1}{2lr} \sqrt{\frac{g \cdot K}{\pi s}}$ oder, da das Gewicht des

Drahtes $Q = lr^2\pi s$ Gramm ist, $n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g \cdot K}{Q \cdot l}}$ (Merjenne 1636, Taylor 1716, Lagrange 1759).

Anstatt die Schwingungen durch Schläge mit dem Finger zu unterhalten, ist es bequemer, eine besondere Antriebsvorrichtung zu benutzen. Nach Melde verwendet man hierzu eine kräftige Stimmgabel. Zur bloßen Demonstration stehender Seilwellen genügt der Wagner'sche Hammer einer gewöhnlichen elektrischen Klingel, an deren Klöppel man das eine Ende einer weißen Seidenschmür, am besten einer seidenen Violin-E-Saite von etwa 1 m Länge bindet.

Fig. 145.



Die durch Versuche erkannten Eigenschaften stehender Wellen lassen sich auf Grund des Prinzips der Übereinanderlagerung kleiner Schwingungen (§ 99) voraussagen. Am einfachsten gelangen wir dazu auf graphischem Wege.

In Fig. 145 sind die von rechts nach links fortschreitenden Wellen schwach ausgezogen, die entgegenlaufenden Wellen von gleicher Länge und Amplitude sind punktiert gezeichnet. Beim ersten Zusammentreffen sollen die Wellen die in Zeile I gezeichnete Lage haben. Nach $\frac{t}{4}, 2\frac{t}{4}, 3\frac{t}{4}$,

$4\frac{t}{4}$ Sek. ist jede um $\frac{\lambda}{4}, 2\frac{\lambda}{4}, 3\frac{\lambda}{4}, 4\frac{\lambda}{4}$ in ihrer Richtung fortgerückt, wie das die Zeilen II—V zeigen. Die resultierende Welle ist jedesmal stark ausgezogen. Man sieht, daß bei dieser Welle die Punkte, die auf den Geraden AA, BB, CC, B'B, A'A' liegen, stets in Ruhe bleiben, also Knotenpunkte sind, und daß der Abstand zweier benachbarten Knotenpunkte eine halbe Wellenlänge beträgt. Nehmen wir an, die Befestigungspunkte eines Seils lägen auf den Geraden AA und CC, so stellt die linke Hälfte der Figur die Bildung einer stehenden Seilwelle dar mit einem Knoten in der Mitte.

Zweiter Abschnitt: Der Schall.

A. Allgemeine Gesetze des Schalles.

§ 103. **Schall und Ton.** Die Empfindung des Schalles entsteht § 103. durch irgend welche Reizung des Gehörnerven. Ton nennt man einen Schall, der nach Höhe und Tiefe sich bestimmen läßt. Was ein hoher oder tiefer Ton sei, ist ebensowenig zu erklären, als was bitter, salzig, was grün, gelb u. dgl. ist. Sinnesindrücke lassen sich nicht definieren.

§ 104. **Entstehung des Schalles.** Wenn feste Körper, z. B. § 104. eine Stimmgabel oder eine Saite, hinreichend schnell schwingen, so erzeugen sie einen Schall. Da nun unser Gehörnerv einen Eindruck erhält, ohne daß er von dem den Schall hervorbringenden Körper berührt wird, so schließen wir, daß der schwingende und darum tönende Körper die Luftschichten um sich abwechselnd verdichtet und verdünnt und daß die Verdichtungen und Verdünnungen sich bis an das Trommelfell fortpflanzen. Dies wird durch folgende Versuche und Erscheinungen bestätigt:

1. Man hört keinen Schall, wenn die durch die Luft vermittelte Verbindung zwischen dem schwingenden Körper und unserem Ohre aufgehoben wird, wenn z. B. der Körper im luftleeren Raume schwingt.

Stellt man unter den Rezipienten der Luftpumpe auf eine Filzunterlage ein selbsttätiges Schlagwerk, so beobachtet man mit zunehmender Luftverdünnung ein allmähliches Schwächerwerden des Schalles und beim Wiedereinströmen der Luft ein plötzliches Anwachsen der Tonstärke.

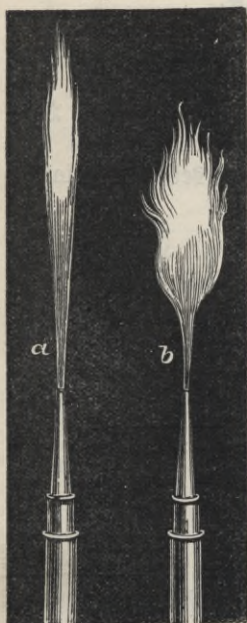
2. Auch in den Fällen, wo ein Schall auf andere Weise als durch Schwingungen eines festen Körpers entsteht, z. B. durch Abschließen eines Gewehres, durch einen Peitschenschlag, durch den Blitz, durch Blasinstrumente, kann man das Entstehen solcher Verdichtungen und Verdünnungen beweisen.

Diese lassen sich vergleichen mit den Wasserbergen und Wassertälern, die man auf einer im übrigen ruhigen Wasserfläche beobachtet, wenn an irgend einer Stelle das Wasser z. B. durch einen fallenden Stein verdrängt wird. Der Stein drängt das Wasser nach allen Seiten hin, und da dieses sich nicht merklich zusammendrücken läßt, so entsteht

rings um den Stein eine Erhöhung usw. (S. § 95.) Ein ähnlicher Vorgang muß nun in der Luft eintreten, wenn ein Teil plötzlich aus seiner Stelle gedrängt wird. Da aber die Luft zusammendrückbar ist, so entstehen in ihr Verdichtungen und Verdünnungen, und diese breiten sich, nicht in Kreisen, sondern in Kugeln aus.

Die sich kugelförmig ausbreitenden Verdichtungen und Verdünnungen heißen Schallwellen; die Dicke einer verdichteten und einer verdünnten Luftschicht zusammengenommen nennt man Länge einer Schallwelle.

Fig. 146.



Es ist zu beachten, daß das von einem Steine verdrängte Wasser nicht, wie die Wellen, sich bis zum Ufer hin bewegt, sondern nur die nächstliegenden Wasserteile in Bewegung setzt und dann wieder zurückfließt. Nicht das Wasser, sondern die Wellenbewegung schreitet bis zum Ufer fort (§ 95).

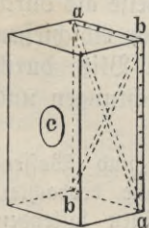
Die entsprechende Erscheinung in der Luft läßt sich durch folgende Versuche sichtbar machen.

Die fast 50 cm hohe Flamme eines Gasbrenners mit runder, etwa 2 mm großer Öffnung (Fig. 146a) zuckt bei jedem in der Nähe erregten, scharfen Tone (Pfeifen, Glockenschlag u. dgl.) (Fig. 146b). Die durch die Flamme gehenden Schallwellen stören das Aufsteigen derselben. — Fig. 147 stellt einen Holzkasten vor, dessen Boden man entfernt hat. a und b sind zwei diagonal befestigte Gummischläuche, über die ein Wachsstück gespannt ist. Der Deckel ist mit einer runden, etwa 5 cm großen Öffnung o versehen. Bläst man Rauch in den Kasten und erteilt der elastischen Rückwand einen Schlag mit der Hand, so dringen Rauchringe aus o, die noch auf 6 m ein Licht auslöschen. Richtet man die Rauchringe nach der Flamme a (Fig. 146), so zuckt sie zweimal, das erste Mal, wenn die Schallwellen des Schlages sie treffen, das zweite

Mal, wenn der Rauchring hindurchgeht.

§ 105.

Fig. 147.



§ 105. Aus der im vorigen Paragraphen erörterten Art der Entstehung und Verbreitung des Schalles lassen sich folgende Gesetze folgern, deren Richtigkeit durch die Erfahrung bestätigt wird:

1. Ein fester Körper ist desto geeigneter, einen Schall zu erzeugen, je elastischer er ist.

Zur Verfertigung von Saiten, Glocken, Stimmgabeln u. dgl. können nur elastische Körper gebraucht werden.

2. Die Fortpflanzung des Schalles erfordert eine gewisse Zeit, d. h. es vergeht eine gewisse Zeit, ehe der Schall von seinem Entstehungsorte bis zu unserem Ohr gelangt.

Wird in der Ferne ein Gewehr abgeschossen, so folgt der Knall erst längere Zeit nach dem Blitze. Die Art des Holzhauers sieht man früher auffallen, als man den Schlag hört. Soldaten, die in einem langen Zuge nach der Musik marschieren, haben nicht gleichen Tritt; die letzten treten später auf als die ersten, wie man aus der verschiedenen Bewegung ihrer Helme sieht.

3. Die Stärke des Schalles nimmt ab, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt. (Beweis siehe § 154.)

4. Wenn die Schallwellen einen Körper treffen, so werden sie von ihm reflektiert. (Echo.)

Es soll nun die Fortpflanzung, die Stärke und die Reflexion des Schalles noch näher betrachtet werden.

§ 106. Fortpflanzung des Schalles. 1. Der Schall wird nicht § 106. nur durch luftförmige, sondern auch durch feste und flüssige Körper fortgepflanzt, und zwar durch diese im allgemeinen besser als durch jene, d. h. wir hören ihn, wenn das Ohr mit dem tönenden Körper durch einen festen oder flüssigen Körper in Verbindung steht, unter sonst gleichen Umständen bis auf größere Entfernungen, und wie wir nachher sehen werden, auch früher, als wenn er durch die Luft zum Ohre gelangt.

Den Kanonendonner, den Hufschlag der Pferde, das Marschieren der Soldaten hört man in größerer Entfernung, wenn man das Ohr auf die Erde legt. Einen ankommenden Eisenbahnzug hört man in weit größerer Entfernung, wenn man das Ohr auf die Schienen legt. Das Ticken einer Taschenuhr hört man deutlicher und auf größere Entfernung, wenn man sie auf das eine Ende eines langen Stabes legt und das Ohr an das andere Ende hält. Derselbe Versuch läßt sich mit einer Stimmgabel anstellen.

Daß das Wasser den Schall fortleitet, erkennt man daraus, daß man das Zusammen schlagen zweier Steine unter dem Wasser auch in der Luft hört.

2. Die Fortpflanzung des Schalles geschieht mit gleichförmiger Geschwindigkeit, und zwar beträgt sie in der Luft ungefähr 340 m sec^{-1} (s. § 98b).

Die Fortleitung durch feste Körper haben Biot und Gay-Lussac mittelst der fast 1000 m langen eisernen Wasserleitungsröhren von Paris beobachtet. Ein an dem einen Ende der Leitung erzeugter Schall wurde an dem anderen zweimal gehört, indem er sich durch das Eisen und durch die in der Röhre enthaltene Luft mit verschiedenen Geschwindigkeiten fortpflanzte.

Versuche über die Schallausbreitung im Wasser haben Sturm und Colladon 1827 auf dem Genfer See angestellt.

3. Körper verschiedener Art leiten den Schall mit verschiedenen Geschwindigkeiten.

Ehladni hat z. B. gefunden: die Geschwindigkeit des Schalles ist in Eisen und Glas $16\frac{2}{3}$, in Tannenholz 18 mal so groß als in der Luft; im Wasser ist sie 1435, im Quecksilber 1484 m sec^{-1} (bei 10° C).

In ein und demselben Gase ist die Geschwindigkeit desto größer, je höher die Temperatur ist. In der atmosphärischen Luft ist die Schallgeschwindigkeit bei $0^{\circ} \text{ C} = 333$, bei $15^{\circ} \text{ C} = 340 \text{ m sec}^{-1}$.

4. Die Geschwindigkeit ist unabhängig von der Art und der Höhe oder Tiefe des Schalles.

Wenn verschiedene Töne sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen, so müßte ein Konzert, in größerer Entfernung gehört, ganz harmonioslos klingen. Auch der Knall eines Gewehres pflanzt sich scheinbar mit derselben Geschwindigkeit fort als der Ton der menschlichen Stimme. Bei äußerst heftigen Lusterschütterungen fand Mach sehr nahe an der Schallquelle Geschwindigkeiten bis 750 m sec^{-1} .

§ 107. § 107. **Stärke des Schalles.** Die Stärke des Schalles und also auch die Entfernung, bis zu der sich der Schall fortpflanzt, läßt sich nur schwer messen. Durch das Gehör können wir die Schallstärke nur schätzen. Sie ist um so größer:

1. Je größer die schwingende Masse ist.

Große Glocken geben einen stärkeren Schall als kleine, die Baßgeige einen stärkeren als die Violine.

2. Je weiter die Schwingungen des tönenden Körpers sind.

Je stärker man eine Saite oder Glocke u. dgl. anschlägt, einen desto stärkeren Ton gibt sie.

3. Je größer die Leitungsfähigkeit des fortpflanzenden Mittels ist.

Bei nebligem Wetter hört man den Knall der Jagdgewehre schwächer und auf kürzere Entfernung als bei heiterem.

§ 108. § 108. **Zurückwerfung des Schalles.** Schallwellen, die einen Körper treffen, werden wieder zurückgeworfen. Hiernach scheint es, als müsse man so oft ein Echo hören, als der Schall z. B. die Wand in einem Zimmer trifft. Unser Ohr (wie jedes andere Sinnesorgan) kann aber nur solche Eindrücke unterscheiden, die in nicht zu geringen Pausen aufeinander folgen. Diese müssen für das Gehör mindestens $\frac{1}{9}$ Sekunde betragen. Kommt also das Echo früher zurück als in $\frac{1}{9}$ Sekunde, so fällt es für unser Ohr mit dem ursprünglichen Schalle zusammen.

Dreht man ein Rad sehr schnell um seine Achse, so kann man die einzelnen Speichen nicht sehen. Fährt man sehr schnell mit dem Finger über ein Brett, auf dem sehr nahe aneinander Vertiefungen eingeschnitten sind, so fühlt man die einzelnen Vertiefungen nicht, und fährt man mit einem Stäbchen darüber hin, so hört man nur einen zusammenhängenden Ton.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich nun:

1. Ein Echo kann nur gehört werden, wenn die reflektierende Ebene wenigstens 19 m oder in runder Zahl 20 m von dem Entstehungsorte des Schalles entfernt ist; jede nähere Ebene verstärkt nur den Schall.

2. Ein mehrsilbiges Echo, d. i. ein solches, das ein mehrsilbiges Wort wiedergibt, kann nur entstehen, wenn der reflektierende Gegenstand mehr als 20 m weit entfernt ist.

3. Ein mehrfaches Echo, d. h. ein solches, welches dasselbe Wort mehrmals wiederholt, entsteht, wenn mehrere reflektierende Ebenen vorhanden sind, deren Entfernungen vom Entstehungsorte des Schalles wenigstens um je 20 m verschieden sind.

4. Ein Echo, das nicht an dem Entstehungsorte des Schalles, sondern an einem anderen Orte gehört wird, entsteht dadurch, daß die Schallwellen eine reflektierende Ebene in schiefer Richtung treffen, und die Strecke vom Entstehungsorte des Schalles bis zur reflektierenden Ebene und von da bis zum Beobachtungsorte wenigstens 2. 20, d. i. 40 m größer ist als der Abstand zwischen diesem und dem Entstehungsorte.

5. Das vollkommenste Echo müßte man in dem Mittelpunkt einer Hohlkugel von einem daselbst erzeugten Schalle oder in dem Brennpunkte eines Ellipsoides von einem aus dem anderen Brennpunkte ausgehenden Schalle hören.

Es gibt Kirchen, in denen zwei an gewissen Punkten stehende Personen sich leise miteinander unterhalten können, während die dazwischen stehenden nichts vernehmen. (Flüstergewölbe.)

Aber nicht bloß Ebenen und nach bestimmten Gesetzen gekrümmte Flächen, sondern auch Gegenstände von ganz unregelmäßiger Gestalt, wie Bäume, Felsen u. dgl., sogar Wolken können ein Echo geben.

Auf Chausseen wird der Peitschenknall von den Bäumen oft vielfach reflektiert, ebenso in Kiefernwäldern. Ein vielfaches mehrsilbiges Echo ist in Adersbach in Böhmen, auf der Heuschauer in der Grafschaft Glas. In großen Sälen, in Kirchen hört man oft zwar kein reines Echo, aber einen sogenannten Nachhall, wodurch das Verstehen gesprochener Worte sehr erschwert wird. Selbst in Stuben ist bisweilen eine Art Echo bemerkbar, was sich nur aus mehrmaliger Reflexion des Schalles erklären läßt. Mitten auf dem Meere hört man öfter ein Echo, wenn der Himmel bewölkt ist. Warum erzeugt ein sehr starker Schall, ein Pistolen-, noch mehr ein Kanonenschuß an Orten, wo sonst wohl gar kein Echo gehört wird, oft ein sehr vielfaches Echo?

§ 109. Mitschwingen fester Körper. Da man einen Schall auch § 109. durch feste Körper hindurch, d. i. auch dann hört, wenn die den tönenden Körper umgebende Luftmasse von der des Beobachtungsortes durch feste Scheidewände getrennt ist, so läßt sich vermuten, daß die

festen Körper durch die Schallwellen der Luft selbst in Schwingungen versetzt werden und diese der auf der anderen Seite befindlichen Luft mittheilen.

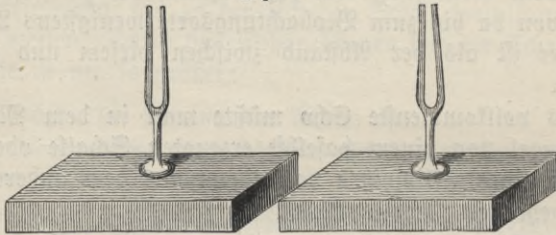
Flügelspiel, Gesang, Gespräche u. dgl. hört man durch Wände, durch Decken der Zimmer hindurch. Ein Uhrwerk unter dem Rezipienten der Luftpumpe hört man, solange die Luft noch nicht verdünnt ist, schlagen.

Diese Vermutung wird bestätigt:

1. Dadurch, daß diese trennenden Körper den Schall desto stärker fortpflanzen, je dünner und elastischer sie sind.

2. Dadurch, daß viele Körper, namentlich sehr dünne, leichte und dabei elastische, z. B. Fensterscheiben, die Saiten eines Instruments, dessen Resonanzboden u. dgl., durch einen starken Schall in fühlbare und selbst hörbare Schwingungen versetzt werden.

Fig. 148.



Am auffallendsten zeigt sich die Erscheinung an dem sogenannten Diapason von Marloye. Dieses besteht aus zwei starken gleichgestimmten Stimmgabeln, die auf hohle, von dünnem Holze gefertigte und auf einer Seite offene Kästen geschraubt sind (Fig. 148). Wird die eine angeschlagen, so klingt die andere mit, selbst wenn sie in einer Entfernung von 3 bis 4 m oder noch weiter von der ersten steht, und tönt selbständig fort, wenn man den Ton der angeschlagenen durch Festhalten ihrer Zinken unterbricht.

Der Ton der Stimmgabel wird auffallend stärker, wenn man sie auf irgend einen festen Körper, z. B. auf eine Tischplatte, aufsetzt. Dieselbe Wirkung bringt der Resonanzboden der Saiteninstrumente auf die Töne der Saiten hervor; ja er ist sogar der eigentlich tönende Körper, denn ohne einen solchen hört man den Ton der Saiten kaum.

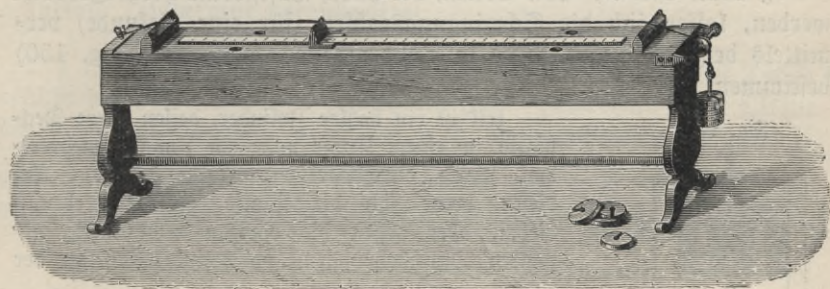
Mittönende Körper geben also den sie erregenden Ton wieder. Und da nun verschiedene Töne durch einen und denselben Körper (z. B. den Resonanzboden) verstärkt werden, so muß ein und derselbe Körper verschiedene Töne hervorzubringen imstande sein.

B. Die musikalischen Töne und die Schwingungen der sie erzeugenden Körper.

§ 110. **Monochord.** Der Erfahrung gemäß tönen schwingende § 110. Saiten nur dann, wenn sie in einer gegebenen Zeit, etwa in einer Sekunde, weder zu viele noch zu wenige Schwingungen ausführen. Der Ton ist um so höher, je größer die Zahl der sekundlichen Schwingungen ist.

Die hierher gehörigen Versuche lassen sich mittelst des von Savart angegebenen Monochords (Fig. 149) anstellen. Es besteht aus einem hohlen Kasten, auf dem eine Saite befestigt ist, die über einen festen und einen beweglichen Steg geht und durch ein Gewicht gespannt wird.

Fig. 149.



Die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde ist um so größer, je stärker die Saite gespannt, je kürzer, je dünner sie ist, und je kleiner ihr spezifisches Gewicht ist. Die Anzahl der Schwingungen, die eine Saite in einer Sekunde macht, ist für ihren tiefsten Ton (§ 102)

$$n = \frac{1}{2lr} \sqrt{\frac{g \cdot k}{\pi \cdot s}},$$

wo k das spannende Gewicht, g die Beschleunigung der Schwerkraft, l die Länge des schwingenden Theiles der Saite, r den Radius des Querschnittes und s das spezifische Gewicht bezeichnet (k in Grammen, die Längen l , r , g in Zentimetern ausgedrückt). Eine Saite A

macht also in 1 Sekunde $\frac{\sqrt{k}}{l \cdot r \cdot \sqrt{s}}$ mal soviel Schwingungen als eine

andere Saite B, wenn bei A die genannten Größen k , l , r und s mal so groß sind als die entsprechenden Größen bei B.

Da man nun für gewisse Werte von k , l , s und r die Schwingungen zählen kann, z. B. wenn man einen sehr langen Draht schwingen läßt, so können vermittlest jener Formel auch für alle anderen Werte dieser

Größen die zugehörigen Schwingungszahlen irgend einer beobachteten Tonhöhe gefunden werden.

Ein Stahldraht von 0,93 mm Dicke und 58,1 m Länge macht bei einer Spannung von 5 kg in einer Minute 50 Schwingungen (§ 98). Die Saite eines Monochords, die aus derselben Drahtsorte besteht, gibt bei einer Spannung von 20 kg und einer Länge von 37,1 cm, die man mit Hilfe des beweglichen Steges abgrenzt, einen Ton, der in der Musik mit c bezeichnet wird. Nach obiger Formel findet man für die Zahl der

Schwingungen in einer Sekunde den Wert $n = \frac{\sqrt{4 \cdot 50}}{60} \cdot \frac{37,1}{5810} = 261$.

Um den Ton a zu erhalten, muß man den Steg so weit verschieben, daß ein Drahtstück von fast genau 22,3 cm $= \frac{2}{3} \cdot 37,1$ cm abgegrenzt wird. Die Saite macht dann $261 : \frac{2}{3} = 435$ Schwingungen in einer Sekunde.

§ 111.

§ 111. **Sirene.** Von Tönen, die durch Luftströme hervorgebracht werden, lassen sich die Schwingungszahlen (für eine Sekunde) vermittle der von Cagniard de la Tour erfundenen Sirene (Fig. 150) bestimmen.

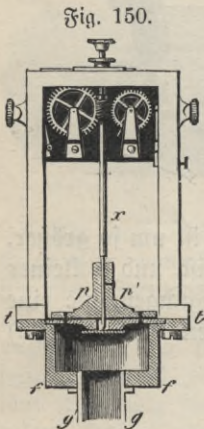


Fig. 150.

tttt ist ein hohler Zylinder, dessen obere Deckplatte in einem Kreise nahe am Umfang mehreremal schräg durchbohrt ist. (Fig. 150 a.) Auf dieser dreht sich die Platte pp' mit ebensoviele, aber gegen die vorigen rechtwinklig gestellten Durchbohrungen. pp' befindet sich an der

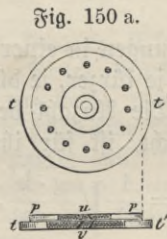
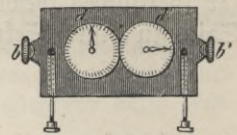


Fig. 150 a.

Fig. 150 b.



Achse x , die oben eine Schraube ohne Ende trägt. Diese Schraube greift in 2 gezähnte Räder, von denen jedes einen Zeiger dd' trägt. (Fig. 150 b.) Die Platte pp' wird durch einen aus gg kommenden Luftstrom gedreht. Die Schwingungszahl des von der Sirene erzeugten Tones ist gleich der Anzahl der Löcher in der Platte pp' , multipliziert mit der Zahl der Umdrehungen in einer Sekunde.

Aus allen diesen Versuchen und Berechnungen hat sich nun das Gesetz ergeben:

Töne von gleicher Höhe haben dieselbe Schwingungszahl und erzeugen in der Sekunde gleichviel Schallwellen, mag die Schallquelle fein, welche sie wolle.

Da alle Töne, hohe und tiefe, sich in der Luft mit ein und derselben Geschwindigkeit (340 m sec^{-1}) verbreiten, so läßt sich aus der Zahl der Schallwellen in einer Sekunde auch deren Länge berechnen.

Die Wellenlänge eines Tones nämlich, der durch n Schwingungen in 1 Sekunde erzeugt wird, ist in der Luft $= \frac{340}{n}$ Meter.

Ein Beobachter, der vom Entstehungsort des Tones 340 m entfernt ist, wird von der ersten Schallwelle 1 Sekunde nach der Entstehung des Tones erreicht. Hat nun der Ton z. B. die Schwingungszahl 170, so entstehen in 1 Sekunde 170 Wellen, jede hat also die Länge $\frac{340}{170} = 2 \text{ m}$.

Hiernach kann man das obige Gesetz auch so aussprechen:

Töne gleicher Höhe haben in der Luft gleiche Wellenlängen (ungeänderte Temperatur vorausgesetzt).

§ 112. **Tonleitern, Intervalle.** Von den unendlich vielen Tönen § 112. benutzt die Musik nur eine beschränkte Zahl. Innerhalb einer Oktave bezeichnet man sie mit c, d, e, f, g, a, h , die nächst tiefere Oktave mit großen Buchstaben (C), die nächst höheren mit \bar{c}, \bar{c} usw. Den mit großen Buchstaben bezeichneten gehen Kontratöne ($\underline{C}, \underline{C}$ usw.) voran.

Zum Stimmen neuer oder verstimmteter Instrumente bedient man sich der Stimmgabel, weil diese ihren Ton nicht ändert.

Zur Vergleichung der Schwingungszahlen verschiedener Tonhöhen kann die Sirene von Savart (Fig. 151) dienen.

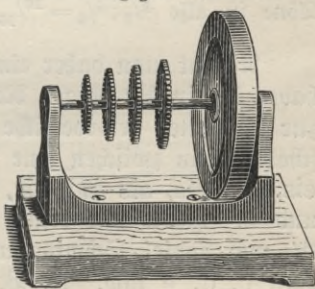
Diese trägt an derselben Achse eine Bleischeibe und vier Räder mit 40, 50, 60, 80 Zähnen. Bei schneller Drehung entstehen, wenn man die Zähne an die Kante eines Kartenblattes schlagen läßt, Töne, die in der Musik als Prime, große Terz, Quinte und Oktave be-

zeichnet werden (c, e, g, \bar{c} oder f, a, \bar{c}, f oder g, h, \bar{d}, g). Bezeichnen die Buchstaben die zugehörigen Schwingungszahlen, so ist also

$$c : e : g : \bar{c} = f : a : \bar{c} : f = g : h : \bar{d} : g = 4 : 5 : 6 : 8.$$

Das Verhältnis der sekundlichen Schwingungszahlen zweier Töne heißt ihr Intervall. (Z. B. das Intervall der Oktave ist $= 1 : 2$.) Aus den obigen Proportionen läßt sich jedes Intervall der Töne $c d e f g a h$ berechnen.

Fig. 151.



Man setze $c:e:g:c=24:30:36:48$

$f:a:c=32:40:24$ und $g:h:d=36:45:27$,

also $c:d:e:f:g:a:h:c = 24:27:30:32:36:40:45:48$, oder für $c=1$:

c	d	e	f	g	a	h	c
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

D. h.: In derselben Zeit, in der ein den Ton c erzeugender Körper eine Schwingung macht, macht ein anderer, der den Ton d gibt, $\frac{9}{8}$, e $\frac{5}{4}$ Schwingungen usw.

Wenn daher eine Saite in ihrer ganzen Länge den Ton c angibt, so erhält man die folgenden sieben Töne, wenn man

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

ihrer Länge schwingen läßt (Pythagoras).

Jede Gruppe von 8 Tönen, die die oben angegebenen Intervalle haben, nennt man diatonische Durtonleiter, den ersten davon die Prime, den zweiten die Sekunde, den dritten die große Terz usw. bis zur Oktave.

Die Intervalle von je zwei aufeinander folgenden Tönen dieser Tonleiter sind nicht gleich, nämlich:

I. II. III. IV. V. VI. VII. VIII.

$$\frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{16}{15}$$

Z. B. zur Quarte gehören in derselben Zeit $\frac{4}{3}$ Schwingungen, in der zur Terz $\frac{5}{4}$ gehören. Die Zahl für das Intervall der beiden Töne ist also $\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$.

Nimmt man daher einen anderen Ton als c zum Grundtone, so haben die in der obigen Reihe aufeinander folgenden Töne nicht das zur Tonleiter erforderliche Höhenverhältnis. Um dies zu erreichen, schaltet man zwischen jene 7 Töne noch andere ein, nämlich cis , dis , eis , fis , gis , ais und his , und die Töne ces , des , es , fes , ges , as und b . Jeder der ersten wird durch $\frac{25}{24}$, jeder der letzten durch $\frac{24}{25}$ mal soviel Schwingungen hervorgebracht als der entsprechende Ton c , d , e usw. Z. B. dis erfordert $\frac{25}{24}$ mal soviel als d , des $\frac{24}{25}$ mal soviel als d .

Zwar gibt die Einschaltung dieser Töne noch nicht für jeden Grundton genau dieselbe Tonleiter wie für c , zumal da man gewöhnlich für cis und des , für dis und es usw. nur je einen Ton gebraucht; aber die Abweichung ist so gering, daß sie keinen unangenehmen Eindruck macht und auch nur von einem sehr geübten Ohre wahrgenommen wird.

Auf der Violine ist man imstande, für jeden Grundton die Tonleiter genau richtig zu spielen, auf dem Flügel nicht.

Das Wort Ton wird auch als Maß für die Intervalle gebraucht; man nennt nämlich das Intervall $\frac{9}{8}$ einen großen ganzen Ton, $\frac{10}{9}$ einen kleinen ganzen, $\frac{16}{15}$ einen großen halben und $\frac{25}{24}$ einen kleinen halben Ton.

Erläuterung: Die Intervalle der Tonleiter, welche c zum Grundton hat, sind, wie wir gesehen haben:

c	d	e	f	g	a	h	c̄
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	

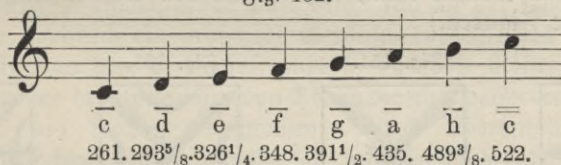
Nimmt man g als Grundton an, und wollte man die Tonleiter in folgender Weise bilden: g, a, h, c, d, e, f, g, so würde die VII. von der VI. nur um einen großen halben Ton und die VIII. von der VII. um einen großen ganzen Ton verschieden sein, während es doch umgekehrt sein muß. Um nun ungefähr die richtigen Intervalle zu erhalten, nimmt man anstatt f fis, und hat dann:

g	a	h	c̄	d̄	ē	fis	ḡ
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{27}{25}$	

Töne, die, zusammen angegeben, einen angenehmen Eindruck auf das Ohr machen, nennt man harmonisch oder konsonierend, die anderen dissonierend. Die harmonischen Töne zu einem gegebenen Grundton sind die, deren Wellenlängen $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{5}{6}$ von der des Grundtones sind. Z. B. für den Grundton C sind konsonierende Töne c, G, E, F, Es.

Die Schwingungszahlen (für eine Sekunde) für die Tonleiter von c bis c̄ sind:

Fig. 152.



Die gebräuchlichen Stimmgabeln geben den Ton a (Kammerton a = 435. Wien 1885). Die musikalisch gut brauchbaren Töne mit deutlich wahrnehmbarer Tonhöhe liegen zwischen 40 und 4000 Schwingungen im Bereiche von 7 Oktaven, die überhaupt wahrnehmbaren zwischen etwa 20 und 40000 im Bereiche von etwa 11 Oktaven (Helmholtz, Tonempfindungen 1877).

§ 113. **Schwingungen der Saiten.** Wird eine Saite am Ende § 113. ihres ersten Drittels oder Viertels oder Fünftels usw. unterstützt und der so getrennte aliquote Teil mit dem Violinbogen in Schwingungen versetzt, so gerät das andere Stück der Saite ebenfalls in Schwingungen,

und zwar so, daß zwischen je zwei entsprechenden aliquoten Theilen ein Ruhepunkt (Schwingungsknoten) bleibt (s. § 102).

Denn setzt man an verschiedenen Punkten gebogene Papierstreifen als Reiter auf die Saite und streicht den getrennten aliquoten Teil mit dem Violinbogen, so fallen alle Papierstreifen herunter, außer denen, die auf den Schwingungsknoten sitzen.

Man kann aber auch dadurch eine Saite in aliquoten Theilen schwingen lassen, daß man sie am Ende des ersten Drittels oder Viertels u. dgl. ganz leise mit dem Finger berührt und das übrige Stück der Saite streicht; nur darf man den Bogen nicht da ansetzen, wo die Schwingungsknoten entstehen, sonst erhält man gar keinen Ton. Der entstehende Ton ist der, den ein solcher aliquoter Teil gibt, wenn er allein schwingt. (Flageolett-Töne.)

Legt man z. B. den Finger ganz leise an das Ende des ersten Viertels, so erhält man den Ton, der durch ein Viertel der ganzen Saite hervorgebracht wird, d. i. die zweite Oktave von dem Tone der ganzen Saite.

§ 114. § 114. **Schwingungen elastischer Scheiben.** Auch elastische Scheiben lassen sich durch Streichen mit dem Violinbogen in tönende Schwingungen versetzen und verhalten sich dabei ganz ähnlich wie schwingende Saiten, nämlich:

1. Durch eine und dieselbe Scheibe kann man sehr viele Töne hervorbringen, indem man sie an verschiedenen Stellen (b) langsamer oder schneller streicht und sie an verschiedenen Stellen (a) festhält u. dgl.

2. Gewisse Linien (Knotenlinien), die man durch aufgestreuten Sand sichtbar machen kann, nehmen an der Schwingung nicht teil. (Chladnische Figuren.)

Fig. 153.

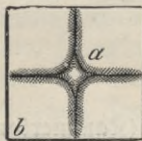


Fig. 154.

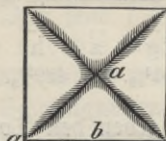
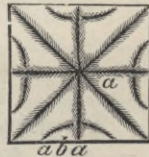


Fig. 155.



Fig. 156.



Figur 153 bis 156 stellen einige dieser Chladnischen Figuren dar.

3. Der Ton ist um so höher, in je kleineren Theilen die Scheibe schwingt.

Man bedient sich zu diesen Versuchen am besten einer starken Messingscheibe, die in der Mitte auf einen Fuß aufgeschraubt ist, und streicht sie mit dem Violin- oder Bassbogen.

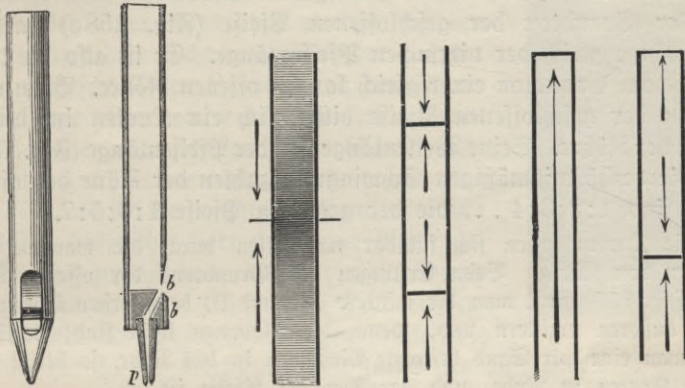
§ 115. § 115. **Schwingungen von Luftsäulen, die in Röhren eingeschlossen sind.** Die Töne der Blasinstrumente entstehen durch

Schwingungen der in ihnen befindlichen Luftsäule. Hervorgebracht werden die Schwingungen durch Anblasen vermittelt eines sogenannten Mundstücks.

Daß nicht die feste Wand der Blasinstrumente den Ton hervorbringt, geht daraus hervor, daß sie aus ziemlich unelastischen Körpern (Holz, Zinn) gefertigt sein können und doch einen guten Ton geben, und daß der Ton unverändert bleibt, wenn man das Instrument in der Hand festhält.

Die Orgelpfeife ist das einfachste Blasinstrument. Man unterscheidet Lippen- und Zungenpfeifen. An der Lippenpfeife unterscheidet man den Fuß (Fig. 158) p, den Mund bb und die Röhre, die die schwingende Luftsäule enthält.

Fig. 157. Fig. 158. Fig. 158a. Fig. 158b. Fig. 158c. Fig. 158d.



Die durch p eindringende Luft bricht sich an der scharfen oberen Mundkante, wodurch ein rauschendes Geräusch entsteht, das man hören kann, wenn man den Pfeifenfuß anbläst, ohne die Röhre aufzusetzen. Diese wählt aus dem Geschwirr von Tönen die aus, deren Schwingungen der Länge des Rohres entsprechen. Durch Übereinanderlagerung der direkten Schwingungen mit den am anderen Rohrende reflektierten bilden sich stehende Luftwellen. Die Knotenpunkte liegen da, wo die vorwärts und rückwärts schreitenden Schwingungszustände gleichzeitig entgegengesetzt sind. Die Entfernung zweier benachbarten Knotenpunkte beträgt eine halbe Wellenlänge. (S. § 102.)

Je zwei Punkte, die zu beiden Seiten eines Knotens, von diesem gleichweit entfernt sind, haben gleichzeitig entgegengesetzte Schwingungszustände (Fig. 158a). An den Knoten wird also die Luft abwechselnd verdichtet und verdünnt.

Punkte, die vom Knoten eine Viertel Wellenlänge entfernt sind, schwingen am stärksten, denn die reflektierte Welle trifft in diesen Punkten immer ihren eigenen Schwingungszustand an, weil der

Begunterschied beider Wellen eine halbe Wellenlänge größer ist als an den Knoten. Die Stellen der stärksten Schwingung heißen Schwingungsbäuche.

Knoten und Bäuche wechseln sich ab in Entfernungen von je einem Viertel einer Wellenlänge. Je größer die Wellenlänge ist, desto tiefer ist der Ton. Gibt also die Pfeife ihren Grundton, so hat sie nur einen Knoten — in der Mitte, wenn sie offen ist (Fig. 158a), am Ende, wenn sie geschlossen ist (Fig. 158c).

Gibt die offene Pfeife ihren Grundton (Fig. 158a), so hat sie an ihren beiden Enden Schwingungsbäuche, und die Wellenlänge ist doppelt so groß wie die Pfeife. Durch verstärktes Anblasen erhält man Obertöne, die um so höher sind, je mehr (2, 3, 4 . .) Knoten sich bilden. Beim ersten Oberton (Fig. 158b) sind zwei Knoten vorhanden, seine Wellenlänge ist gleich der Länge der Pfeife.

Der Grundton der geschlossenen Pfeife (Fig. 158c) hat eine Wellenlänge gleich der vierfachen Pfeifenlänge. Er ist also die tiefere Oktave vom Grundton einer gleich langen offenen Röhre. Beim ersten Oberton der geschlossenen Pfeife bildet sich ein Knoten im unteren Drittel der Röhre. Seine Wellenlänge ist $\frac{4}{3}$ der Pfeifenlänge (Fig. 158d).

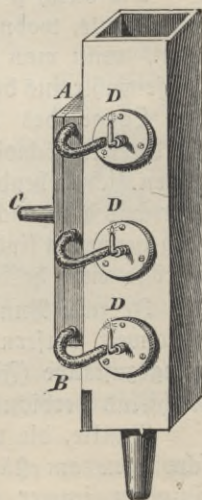
Die verhältnismäßigen Schwingungszahlen der Töne der offenen Pfeife sind 1:2:3:4 . ., die der gedeckten Pfeife 1:3:5:7.

Die Knoten lassen sich sichtbar nachweisen durch die manometrischen Flammen von König. Beim Erklängen des Grundtons der offenen Orgelpfeife (Fig. 159) sieht man die mittlere Flamme D, beim ersten Oberton die beiden äußeren erzittern und, wenn die Flammen klein sind, verlöschen. Senkt man eine mit Sand bestreute Membran in das Rohr, so bleibt dieser an den Knoten in Ruhe, und der Ton der Pfeife ist rein. An den Schwingungsbäuchen wird der Sand weggeschleudert. — Versetzt man nach Kundt eine Glasröhre, die etwas in ein weiteres, am anderen Ende geschlossenes Glasrohr hineinragt, durch Reiben in longitudinale Schwingungen, so gerät die Luftsäule in dem weiteren Rohr in entsprechende Schwingungen, deren zahlreiche Knoten und Bäuche durch trockenes Korkpulver sich nachweisen lassen.

In Zungenpfeifen wird durch einen Luftstrom ein Metallplättchen und durch dieses die Luftsäule in Schwingungen versetzt. Die Tonhöhe hängt sowohl vom Metallplättchen als auch von der Pfeifenlänge ab.

Bei anderen Blasinstrumenten werden die verschiedenen Töne teils durch die verschiedene Art des Anblasens, wie z. B. bei der Trompete, dem Horne, teils durch Verkürzung und Verlängerung der schwingenden Luftlänge mittelst Löcher und

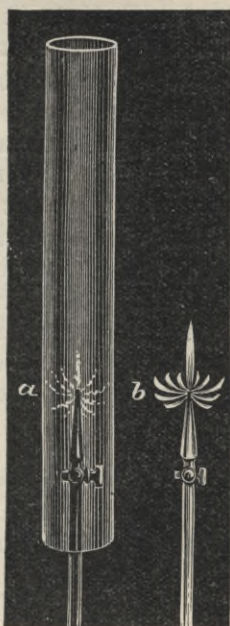
Fig. 159.



Klappen hervorgebracht, z. B. bei der Flöte, der Klarinette u. dgl. Beim Fagott, der Hoboe und der Klarinette ist das Mundstück ein Zungenwerk.

(Fig. 160.) Hält man über einen Gasbrenner, an dessen Peripherie ein Kranz Flämmchen ausstrahlt (b), und der an der Spitze noch ein solches trägt, eine Papp- oder Glasröhre (a), deren Durchmesser etwa 8 cm und deren Länge 1,2 m beträgt, und senkt sie so herab, daß der Brenner mit seiner Flamme immer tiefer in die Röhre tritt, so erhält man an einem bestimmten Punkte einen starken Orgelton. Ist das Rohr nicht zu weit und zu lang, so genügt eine einzige Brenneröffnung an der Spitze. Bei einer Glasröhre werden die den Ton erzeugenden Schwingungen der in der Röhre eingeschlossenen Luftsäule an den Flammen sichtbar. Im rotierenden Spiegel erscheint das Flammenbild, solange die Luftsäule nicht tönt, als ein zusammenhängendes, leuchtendes Band. Sobald bei der richtigen Brennerstellung die Röhre anspricht, sieht man eine Reihe getrennter Flammenbilder, die nur unten durch einen schmalen, wenig leuchtenden Streifen verbunden sind. Die Luftverdichtungen drücken die Flamme herab, die Verdünnungen lassen sie auflackern.

Fig. 160.

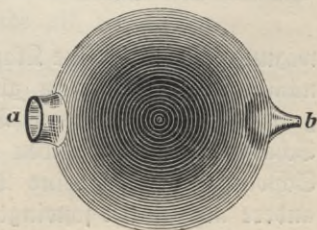


§ 116. **Obertöne.** Wird durch ein musikalisches Instrument ein § 116. Klang angegeben, so hört ein geübtes Ohr nicht bloß den Grundton dieses Klanges, sondern zu gleicher Zeit auch einige der Töne, deren Schwingungszahlen gleich 2, 3, 4, 5, 6 usw. sind, wenn man die des Grundtones mit 1 bezeichnet. Diese Töne nennt man harmonische Obertöne. Demnach sind z. B. die harmonischen Obertöne für den Grundton c:

c, g, c, e, g, b, c, d usw.

Diese Töne werden auch dem weniger geübten Ohre durch die sogenannten Resonanzkugeln hörbar. Das sind Kugeln von der Form Fig. 161, die bei a und b eine Öffnung haben. Steckt man das Ende b in das eine Ohr und hält das andere Ohr zu, so hört man, wenn irgend ein Klang angegeben wird, oder auch schon, wenn Luft bei der Öffnung a

Fig. 161.



vorbeiströmt, einen bestimmten Ton, dessen Höhe von der Größe der Kugel abhängt und der von den Schwingungen der darin eingeschlossenen Luft herrührt. Wird aber derselbe Ton, den die Kugel gibt, durch ein anderes Instrument angegeben, so tönt die Kugel bedeutend stärker. Dasselbe ist der Fall, wenn auch nur einer der Obertöne mit dem der Kugel übereinstimmt.

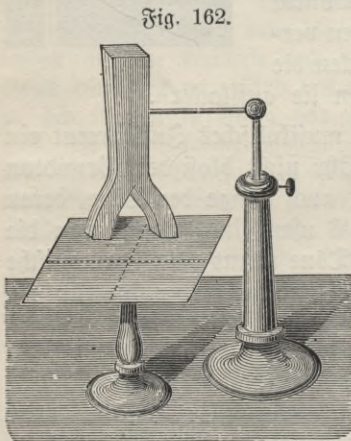
Es lassen sich demnach vermittelt solcher Resonatoren die Klänge in ihre Grund- und Obertöne zerlegen. Helmholtz hat gefunden, daß bei verschiedenen musikalischen Instrumenten verschiedene Obertöne besonders stark hervortreten, und daß darin der Grund zu suchen ist, warum ein und derselbe Ton, von verschiedenen Instrumenten angegeben, einen verschiedenen Klang hat. Z. B. die Streichinstrumente und die Zungenpfeifen haben deshalb einen so scharfen Klang, weil bei ihnen die obersten (und unter sich dissonierenden) Obertöne besonders stark mitklingen; dagegen wird der weiche Klang der Flöte und der einfachen Orgelpfeife dadurch bedingt, daß nur die tiefsten (unter sich konsonierenden) Obertöne hörbar sind.

C. Interferenz des Schalles.

§ 117. Treffen Schallwellen, die von derselben Schallquelle ausgehen, an einem Punkte zusammen, und haben sie dort in demselben

Augenblicke gleiche Schwingungszustände, so verstärken sie sich; sind diese aber entgegengesetzt, so heben sie sich auf. (S. §§ 99, 102, 115.)

a) Stellt man über die in § 114 beschriebene Klangscheibe, während sich die Chladnischen Figuren bilden, eine Röhre (Fig. 162), die sich unten in zwei Arme teilt und deren obere Öffnung mit einer Membran überspannt ist, so auf, daß die beiden unteren Öffnungen dicht über zwei schwingenden Teilen der Scheibe stehen, so kommt je nach der Wahl der beiden Teile der auf die Membran gestreute Sand entweder in Be-

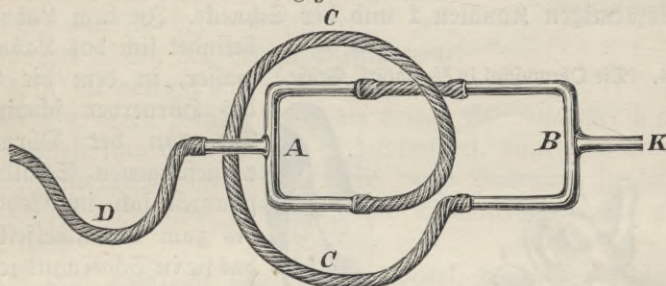


wegung und bildet eine Klangfigur, oder er bleibt in Ruhe. Schwingen nämlich beide Teile zu gleicher Zeit nach oben, so treffen in dem gemeinschaftlichen oberen Teile der Röhre die verdichteten Teile der Schallwellen aus beiden Armen zusammen und verstärken sich. Schwingt aber der eine Teil der Scheibe nach oben, während der andere nach unten schwingt, so trifft immer eine verdichtete Luftschicht

aus dem einen Arme mit einer verdünnten aus dem anderen zusammen; die Schallwellen heben sich also auf. Die Interferenz des Schalles läßt sich auch durch den in Fig. 163 dargestellten Apparat erzeugen. Verbindet man die beiden Glas- oder Metallröhren A und B durch Gummischläuche, von denen der eine (C) um eine halbe Wellenlänge des von einer Stimmgabel erzeugten Tones länger ist als der andere, und hält letztere, angeschlagen, an die Öffnung K, während man die Öffnung von D ins Ohr steckt, so hört man keinen Ton. Man hört ihn aber, sobald man den einen Schlauch zusammendrückt.

b) Ein besonderer Fall von Interferenz wird beobachtet, wenn zwei Töne von wenig verschiedener Tonhöhe gleichzeitig erklingen. Bestimmt man z. B. eine der beiden Stimmgabeln des Diapasons (Fig. 148) durch ein kleines Laufgewicht, so hört man beim Anstreichen beider

Fig. 163.



Gabeln ein wiederholtes Anschwellen und Nachlassen des Tones. Es mache die eine Gabel in einer Sekunde 100 Schwingungen, die andere 101. In einem bestimmten Augenblick wird durch beide Tonquellen gleichzeitig die Luft im Gehörgang des Beobachters verdichtet oder verdünnt werden. Eine halbe Stunde später hat die erste Gabel 50, die zweite $50\frac{1}{2}$ Schwingungen nach dem Ohr gesandt, es trifft also jetzt Verdichtung und Verdünnung zusammen. Dieser Vorgang wiederholt sich regelmäßig, insolgedessen hört man in jeder Sekunde den Ton einmal an- und abschwellen, was man als Schwebung bezeichnet. Zählt man in einer Sekunde n Schwebungen, so macht die eine Stimmgabel n Schwingungen mehr in der Sekunde als die andere.

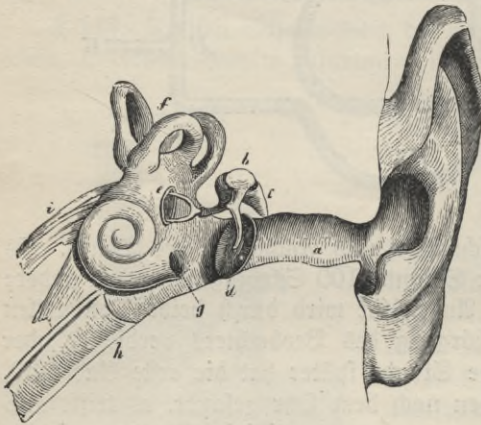
c) Eine Folge der Interferenz von starken Tönen sind die 1740 von Sorge entdeckten Kombinationstöne. Sie entstehen, wenn zwei einfache Töne von verschiedener Höhe gleichzeitig kräftig erklingen. So hört man z. B., wenn ein Ton zugleich mit seiner Quinte klingt, die tiefere Oktave des Tones als Kombinationston. Die Schwingungszahl dieses Tones ist also gleich der Differenz der

Schwingungszahlen der beiden ersten Töne. Außer diesen Tönen, die Helmholtz als Differenztöne bezeichnet hat, gibt es noch eine andere Art von Kombinationstönen, deren Schwingungszahlen der Summe der Schwingungszahlen der beiden ersten Töne gleich ist (daher Summationstöne nach Helmholtz), doch sind diese Töne viel schwerer wahrzunehmen als die Differenztöne.

D. Das Ohr und das Stimmorgan.

§ 118. § 118. Das Ohr. Von dem äußeren Ohre, der Ohrmuschel (Fig. 164), führt der Gehörgang a nach der Paukenhöhle, die durch das Trommelfell d geschlossen ist. An dieses ist der Hammer b angewachsen, an dem sich hintereinander der Amboß c und der Steigbügel anschließen. Diese Knöchelchen sind beweglich miteinander verbunden. Der Fuß des Steigbügels verschließt das ovale Fensterchen e, das nach dem Labyrinth führt. Dieses besteht aus dem Vorhofe mit drei halbkreisförmigen Kanälen f und der Schnecke. In dem Labyrinth

Fig. 164. (Die Ohrmuschel in $\frac{3}{4}$ natürl. Größe.)



befindet sich das Labyrinthwasser, in dem die Enden des Hörnerven schwimmen. Die von der Ohrmuschel aufgefangenen Schallwellen pflanzen sich im Gehörgang bis zum Trommelfell fort, das sie in Schwingungen versetzen. Von hier übertragen die hebelartig wirkenden Gehörknöchelchen die Bewegung mit größerer Kraft, aber kleinerer Amplitude durch das ovale Fensterchen e auf das Labyrinthwasser und so auf die Enden der Gehörnervenfasern.

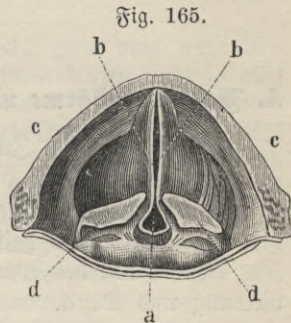
Die Paukenhöhle steht noch durch das runde Fensterchen g, das durch ein dünnes Häutchen verschlossen ist, mit dem Labyrinth und durch die Eustachische Röhre h mit der Mundhöhle in Verbindung. Durch diese wird die Luft in der Paukenhöhle erneuert und mit der äußeren Luft in gleicher Spannung erhalten.

Ein zu heftiger Knall wird dem Ohre weniger gefährlich, wenn man den Mund öffnet. Bei offenem Munde hört man besser als bei geschlossenem.

Bewunderungswürdig sind die Leistungen des Ohres; denn es unterscheidet nicht nur genau die Höhe und Tiefe der Töne und ihren

Klang, sondern es vermag auch, wenn viele Töne zugleich das Trommelfell treffen, z. B. in Konzerten, oder wenn mehrere Personen zugleich sprechen, die einzelnen Töne und Worte voneinander zu unterscheiden. Ebenso erkennt man die Richtung, in der ein Schall zu uns kommt, sowie die Entfernung der Schallquelle, wiewohl das Ohr hierbei leicht Täuschungen ausgesetzt ist.

Das **Stimmorgan** besteht aus der Luftröhre mit dem Kehlkopfe und den beiden Lungenflügeln. Die Luftröhre ist aus nicht vollständig geschlossenen Knorpelringen zusammengesetzt, so daß längs der ganzen Luftröhre ein Spalt bleibt, der durch ein Muskelband geschlossen ist. Unten teilt sie sich in zwei Hauptäste, deren Zweige sich wie die Wurzeln eines Baumes verbreiten und nach den Zellen der beiden Lungenflügel führen. Oben endet die Luftröhre in den Kehlkopf (Fig. 165), der aus vier Knorpeln zusammengesetzt ist, nämlich dem Ringknorpel, dem Schildknorpel c und den beiden Gießkannenknorpeln d. Er verengt sich nach oben in die Stimmriße a, deren Ränder durch die beiden Stimmbänder b gebildet werden. Diese sind vorn an dem Schildknorpel, hinten an den beiden Gießkannenknorpeln angewachsen, durch deren Bewegung sie sich mehr oder weniger anspannen lassen und die Stimmriße verengt oder erweitert wird.



Auf dem Kehlkopfe liegt der Kehldeckel, der die Luftröhre vor dem Eindringen der Speisen und überhaupt fremder Körper schützt.

Durch das Stimmorgan werden die Töne wie durch eine Zungenpfeife erzeugt: die Lungen geben den Wind, die Luftröhre enthält die schwingende Luftsäule, die Stimmbänder vertreten das schwingende Metallplättchen.

Bei Kindern und Frauen ist die Stimme höher als bei Männern; warum? In welcher Fertigkeit besteht das Treffen der Töne beim Singen?

Dritter Abschnitt: Die Wärme.

A. Von der Wärme und ihren Hauptwirkungen im allgemeinen.

§ 119. § 119. Gewisse Zustände der Körper vermögen wir unmittelbar nur durch den unserer Haut innewohnenden Gefühlsinn zu beurteilen: je nach der Empfindung, die sie in uns hervorrufen, bezeichnen wir die Gegenstände als heiß, warm, lau oder kalt.

Mittel, um den Wärmeszustand eines Körpers zu ändern, sind z. B. Reibung und Druck.

Im Winter reibt man die Hände, um sie zu erwärmen. Durch Reiben zweier Hölzer zünden die Wilden Feuer an, ebenso wie wir Streichhölzer durch Reibung zur Entzündung bringen. Die Wagenachsen entzünden sich, wenn sie nicht geschmiert sind. Mühlsteine, die ohne Getreide umlaufen, entzünden das sie umgebende Holzwerk. Eisene Werkzeuge, wie Bohrer, Hämmer, Sägen, Feilen usw., werden im Gebrauche warm. Draht erwärmt sich durch öfteres Hin- und Herbiegen. Durch Hämmern wird der Amboss warm. — Wasser wird warm, wenn man es durch enge Röhren treibt. Zwei Eisstücke, aneinander gerieben, schmelzen. Im pneumatischen Feuerzeuge wird durch Zusammendrücken der Luft Schwamm entzündet. — Wärme wird ferner bei jedem chemischen Prozeß erzeugt, in dem eine Verbindung mehrerer Grundstoffe stattfindet, z. B. bei der Oxydation oder Verbrennung unserer Brennstoffe.

Das Hautgefühl zeigt den Wärmeszustand eines Körpers jedoch nur sehr unvollkommen an.

Die Luft einer ungeheizten Stube erscheint uns kalt, wenn wir aus einer geheizten, warm, wenn wir aus der Winterkälte kommen. Derselbe Keller erscheint uns im Sommer kühl, im Winter warm. Bringen wir die rechte Hand in heißes Wasser, die linke in kaltes und hierauf beide Hände in Wasser von mittlerem Wärmeszustand, so empfindet die rechte Hand dieses Wasser als kalt, die linke als warm. Ein Stück Marmor und ein gleiches Stück Metall, die längere Zeit im selben Raume gelegen haben, rufen beim Anfassen verschiedene Wärmeempfindungen hervor.

Diese Beispiele zeigen, daß unsere Wärmeempfindung nicht nur von dem Wärmeszustande des betreffenden Körpers, sondern auch von dem Zustande unserer Empfindungsorgane und der Eigenart (Leitungsfähigkeit) des betreffenden Körpers abhängt. Unsere Wärmeempfindung

allein kann also nie ein Maß für den Wärmezustand eines Körpers abgeben. Zu seiner Messung sind daher andere Wirkungen der Wärme zu benutzen. Als besonders geeignet haben sich die Ausdehnung der Körper und die Änderung ihres Aggregatzustandes erwiesen.

§ 120. Mannigfaltige Erfahrungen des alltäglichen Lebens bestätigen die Wahrheit des Satzes: **Die Wärme vergrößert den Rauminhalt der Körper.**

Am klarsten tritt diese erste Hauptwirkung der Wärme bei den festen Körpern zutage.

Eine Kugel, die genau durch einen Ring geht, geht nicht mehr hindurch, wenn sie erwärmt wird. Die Eisenbahnschienen dürfen nicht so dicht aneinander gelegt werden, daß ihre Enden sich berühren. Bei Zinkbedachungen muß den einzelnen Platten ebenfalls Spielraum gelassen werden. Ein Glas springt, wenn man plötzlich heißes Wasser hineingießt; dasselbe geschieht, wenn das Glas warm und das Wasser kalt ist, oder wenn man ein Glas auf den Ofen setzt. Es springt um so leichter, je dicker der Boden ist. Durch allmähliches Erwärmen oder Erkalten kann man das Zerspringen verhüten. Steinplatten, die durch eiserne Klammern miteinander verbunden sind, bekommen im Winter an der Stelle, wo die Klammer eingelassen ist, oft Risse. — Daß manche Körper, wie feuchtes Holz, feuchter Ton, Früchte u. dgl. bei Erwärmung an Rauminhalt verlieren, rührt daher, daß die in ihnen befindliche Flüssigkeit verdunstet.

Auch die Flüssigkeiten, sowohl tropfbare als auch gasförmige, nehmen bei der Erwärmung an Volumen zu. Doch ist hier zu beachten, daß auch das die Flüssigkeit enthaltende Gefäß sich ausdehnt.

Füllt man eine enge Röhre mit Wasser oder irgend einer anderen Flüssigkeit und erwärmt sie, so läuft diese über. Eine mit Wasser gefüllte Wärmflasche springt, wenn man sie zugeschraubt in den Ofen stellt. Eine schlaff zugebundene Blase bläht sich auf, wenn sie erwärmt wird. Füllt man eine gläserne Retorte so weit mit Wasser, daß, wenn sie mit dem offenen Ende aufrecht in Wasser gestellt wird, nur ihr Hals zum Teil mit Wasser gefüllt bleibt, so wird dies heruntergedrückt, wenn man die Luft in der Retorte erwärmt.

Eine zweite allgemein bekannte Wirkung der Wärme ist die **Änderung des Aggregatzustandes.**

Durch Zufuhr von Wärme wird Eis geschmolzen, ebenso Metalle und Zette. Durch dasselbe Mittel wird Wasser verdampft, ebenso andere Flüssigkeiten.

Hinreichende Steigerung des Wärmezustandes eines Körpers bewirkt also, falls nicht stoffliche Veränderungen, z. B. Spaltung von Quecksilberoxyd in Quecksilber und Sauerstoff, eintreten, Steigerung des Aggregatzustandes.

Beide Hauptwirkungen der Wärme stimmen darin überein, daß die Massenteilchen der Körper das Bestreben erhalten, sich voneinander zu entfernen.

B. Ausdehnung durch die Wärme.

§ 121. § 121. **Thermoskope** sind Apparate, die dazu dienen, den Wärmezustand eines Körpers anzuzeigen. Die meisten beruhen auf der Ausdehnung durch die Wärme sowie auf der Tatsache, daß Körper verschiedenen Wärmezustandes, die lange genug in Berührung stehen, so lange ihre Wärme austauschen, bis sie gleichen Wärmezustand erlangt haben. Als thermoskopische Substanz eignet sich jeder Körper, dessen Volumenänderungen sich leicht erkennen lassen.

Ein einfaches und sehr empfindliches Thermoskop stellt man sich her, indem man durch den gut schließenden Stopfen eines dünnwandigen Kochfläschchens ein enges, einmal rechtwinklig umgebogenes Glasrohr steckt, in dessen horizontalen Teil man einen kurzen Flüssigkeitsfaden gebracht hat (Fig. 166). Berührt der zu untersuchende Körper die Wandung des Fläschchens, so bewegt sich der Faden nach der einen oder anderen Seite, je nachdem sich die Luft im Gefäß durch Zu- oder Wegführung von Wärme ausdehnt oder zusammenzieht. — Wie dieses Thermoskop, so ist auch das Loosersche Doppelthermoskop (Fig. 167) ein Luftthermoskop, nur daß hier zwei getrennte Thermoskope vorhanden sind und die Flüssigkeitsfäden nicht in horizontalen, sondern in U-förmigen vertikalen Röhren, Manometern, verschoben werden. — Weit weniger empfindlich als Luftthermoskope sind Flüssigkeitsthermoskope; wegen seiner starken Ausdehnung ist Petroleum als thermoskopische Substanz geeignet.

Zwei Körper haben denselben Wärmezustand, wenn sie an einem Thermoskop nacheinander die gleiche Wirkung hervorrufen.

§ 122. § 122. **Thermometer** sind Thermoskope, die mit einer Skala zum Messen der Temperatur versehen sind. Am bekanntesten ist das Quecksilberthermometer.

Eine ganz enge Glasröhre (Haarröhrchen), die überall gleichweit und an dem einen Ende mit einer Kugel versehen ist, wird zum Teil mit Quecksilber gefüllt, die darüber befindliche Luft durch Kochen des Quecksilbers vertrieben, und die Röhre oben zugeschmolzen. Hierauf wird der Punkt bestimmt, bis zu dem das Quecksilber reicht, wenn Kugel und Röhre in den Dampf des unter Normaldruck siedenden Wassers gebracht werden (Siedepunkt); ebenso erfolgt die Bestimmung des Eispunktes, bis zu dem das Quecksilber sinkt, wenn man die Röhre in reinen schmelzenden Schnee oder feingestößenes reines Eis

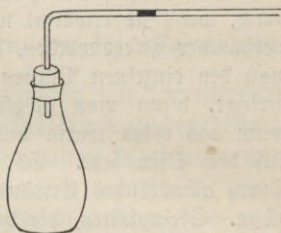


Fig. 166.

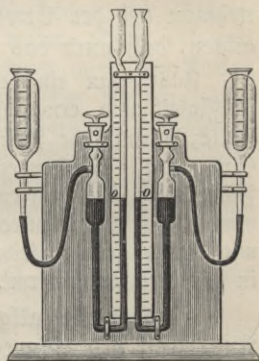


Fig. 167.

hält. Beide Punkte heißen mit gemeinsamem Namen Fundamentalpunkte, ihr Abstand Fundamentalabstand. Diesen Abstand teilt man nach Celsius (1736) in 100 gleiche und den Raum jenseits der Fundamentalpunkte in ebenso große Teile (Grade). An den Eispunkt setzt man die Zahl Null und zählt von da die Grade auf- und abwärts; jene bezeichnet man als positiv, diese als negativ. Den in Graden gemessenen Wärmezustand eines Körpers nennt man seine Temperatur oder seinen Wärmegrad.

Außer der Celsius'schen Skala sind noch zwei andere in Gebrauch. Bei der Réaumur'schen ist der Fundamentalabstand in 80 statt in 100 Grade geteilt, bei der Fahrenheit'schen in 180 Grade, doch ist hier der Eispunkt nicht mit 0, sondern mit $+32$, der Siedepunkt also mit $+212$ bezeichnet. Für die Umrechnung ist zu merken $C = \frac{5}{9}R$, $C + R + 32 = F$.

Wie untersucht man, ob eine Röhre überall gleichweit, also zum Thermometer tauglich ist? Warum muß die Röhre überall gleichweit sein? Was heißt das: Ein Thermometer ist empfindlich? Warum nimmt man so enge Röhren? Warum muß die Kugel möglichst klein sein? Warum schmilzt man die Röhre zu? Warum darf sich über dem Quecksilber keine Luft befinden?

Durch das Thermometer läßt sich bestimmen, um wieviel sich die Temperatur eines Körpers von einer anderen bekannten Temperatur, z. B. beim Réaumur'schen und Celsius'schen von der des schmelzenden Eises, unterscheidet. Dieses hat nämlich immer eine und dieselbe Temperatur, wie daraus hervorgeht, daß das Quecksilber des Thermometers, so oft man dieses in schmelzendes Eis steckt, sich auf denselben Punkt stellt. Dasselbe gilt für das siedende Wasser, wenigstens bei einem und demselben Barometerstande. Der Temperaturunterschied zwischen schmelzendem Eise und siedendem Wasser ist das Maß, vermittlest dessen man andere Temperaturunterschiede mißt.

An Thermometern mit gleichartiger Skala und derselben thermometrischen Substanz, z. B. Quecksilber, kann die Länge eines Grades verschieden groß sein; in welchem Falle? Aber dennoch geben sie, wenn sie sonst richtig gearbeitet sind, zwischen Eis- und Siedepunkt gleiche Resultate. Bei höheren Temperaturen zeigen sich allerdings Unterschiede, die ihre Ursache in der verschiedenen Ausdehnung der Gläser haben. Die Übereinstimmung der Angaben zwischen 0° und 100° besteht nicht mehr bei Thermometern verschiedener thermometrischer Substanzen, z. B. Quecksilber und Weingeist. Dagegen zeigen Gasthermometer (§ 125), einerlei, welches Gas zur Füllung benutzt wird, fast vollständige Übereinstimmung. Deshalb betrachtet man die Ausdehnung der Gase durch die Wärme als gleichförmig. Ein Quecksilber- und Luftthermometer weichen zwischen den Fundamentalpunkten nur unmerklich in ihren Angaben voneinander ab, und die hieraus folgende Gleichförmigkeit

der Ausdehnung des Quecksilbers ist ein Hauptgrund für die Verwendung dieses Metalls als thermometrische Substanz.

Da Quecksilber bei Abkühlung auf -39° erstarrt und vorher sich schon unregelmäßig zusammenzieht, so sind für Messung tiefer Temperaturen Thermometer mit Flüssigkeiten in Gebrauch, die erst bei tiefen Temperaturen erstarren, Alkohol, Toluol, Petroläther. Diese Instrumente werden nach Normalthermometern (Gasthermometer) geeicht. — Quecksilber siedet bei 357° . Zur Messung hoher Temperaturen ist also das Quecksilberthermometer in der beschriebenen Form nicht brauchbar. Man verwendet bis gegen 600° Quecksilberthermometer aus Jenaer Hartglas, wo der Raum über dem Quecksilber mit verdichtetem Kohlenäuregas oder Stickstoff gefüllt ist, oder man verfährt nach anderen Methoden (§ 125).

Von Thermometern, die zu besonderen Zwecken dienen, seien das **Maximum- und Minimumthermometer**, sowie das **Fieberthermometer** erwähnt.

Jenes zeigt die höchste und tiefste Temperatur an, die während der Beobachtungsperiode geherrscht hat. Am bekanntesten ist das Sixthermometer (Fig. 168), ein Weingeistthermometer, in dessen Röhre durch einen verschiebbaren Quecksilberfaden zwei Stahlstäbchen verschoben werden, die an der Stelle höchsten bzw. niedrigsten Wärmegrades durch ihre Trägheit liegen bleiben; bei manchen Thermometern sind die Stahlstäbchen mit federnden Glasfäden versehen, die gegen die Innenwand des Thermometerrohres reiben. Vor dem Gebrauch bringt man die Stäbchen durch einen Magneten mit dem Quecksilber zur Berührung. — Das Fieberthermometer ist ein Maximumthermometer, das nur die Temperaturen in der Nähe von 37° (Bluttemperatur des gesunden Menschen) anzeigt. Das obere Ende des Quecksilberfadens ist durch eine Luftblase abgetrennt und bleibt deshalb an der höchsten Stelle liegen. Durch Schwingen wird nach erfolgter Ableseung der Faden wieder nach unten gebracht.

Fig. 168.



Geschichtliches. Galilei soll bereits 1593 bei seinen Vorlesungen in Padua ein Luftthermoskop benutzt haben.

In die erste Hälfte des 17. Jahrhunderts fällt die Einführung der Flüssigkeitsthermometer, und zwar zuerst der Wasser- und Weingeistthermometer. Fundamentalpunkte waren die Bluttemperatur, die Temperatur der Kältemischung von Schnee und Kochsalz und andere. Den Eispunkt führte Hooke 1664 ein, den Siedepunkt Huygens 1665. Huygens wies auch auf die Vorzüge des Quecksilbers als thermometrische Substanz hin. Die ersten genauen Quecksilberthermometer wurden von Fahrenheit um 1714 hergestellt. Die Réaumur'sche Skala ist 1730, die von Celsius 1736 aufgestellt, doch wurde in dieser der Eispunkt mit 100, der Siedepunkt mit 0 bezeichnet. Linné kehrte bald darauf die Bezeichnung um. Das erste Luftthermometer wurde 1703 von Amontons angewendet.

§ 123. **Ausdehnung fester Körper.** Daß die Ausdehnung der § 123. festen Körper bei gleicher Temperaturerhöhung für die verschiedenen Körper verschieden ist, zeigt sich bei der Erwärmung zweier zusammen-genieteter, gleich langer Stäbe verschiedener Metalle; sie krümmen sich, und zwar so, daß der sich weniger stark ausdehnende Stab die konkave Seite bildet. Zahlenmäßig wird die verschieden starke Ausdehnung durch den Ausdehnungskoeffizienten (Auk.) des betreffenden Körpers ausgedrückt.

Wir sehen zunächst von der Dickenausdehnung eines stabförmigen festen Körpers ab und berücksichtigen nur seine Längenausdehnung. Linearer Auk. eines festen Körpers ist das Verhältnis der Längenausdehnung bei der Erwärmung von 0° auf 100° zu der bei 0° gemessenen Länge. Ist α der lineare Auk., l_0 die Länge des Stabes bei 0° , l_{100} die bei 100° , so ist also $l_{100} = l_0 (1 + \alpha)$.

Versuche haben ergeben, daß fast alle festen Körper sich innerhalb der Grenzen von 0° bis 100° ziemlich regelmäßig, d. h. proportional dem Temperaturzuwachs, ausdehnen. Hieraus folgt für die Länge l_t des Stabes bei t° der Wert $l_t = l_0 (1 + \frac{\alpha}{100} t)$. Für höhere Temperaturen gilt diese Formel aber nicht mehr, vielmehr ist dann die Ausdehnung größer, als dieser Formel entspricht.

Wie lang ist ein Stab (Auk. α) bei t_2° , der bei t_1° die Länge l_1 hat? Welche Messungen reichen hin, um α zu berechnen? — Lavoisier und Laplace haben zuerst (1778) die Auk. fester Körper bestimmt.

Lineare Ausdehnungskoeffizienten einiger festen Körper bei einer Temperaturerhöhung von 0° — 100° C.

Blei	0,0028	Gold	0,0015	Zink	0,0029
Eisen	0,0012	Kupfer	0,0017	Zinn	0,0022
Jenaer Por-		Silber, Messing .	0,0019	Platin	0,0009
malglas	0,0008				

Jeder feste Körper zeigt bei der Erwärmung nicht nur Längen-, sondern auch Dickenausdehnung. Seine räumliche Ausdehnung wird durch seinen kubischen Auk. gemessen, d. h. durch das Verhältnis der Volumenausdehnung bei der Erwärmung von 0° auf 100° zu dem bei 0° gemessenen Volumen.

Ein Würfel aus einem isotropen festen Körper, d. h. einem Körper, der hinsichtlich seiner physikalischen Eigenschaften nach allen Richtungen gleich beschaffen ist, von der Kantenlänge l_0 bei 0° hat bei 100° das Volumen $v_{100} = l_0^3 (1 + \alpha)^3 = l_0^3 (1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3)$. Da α eine kleine Zahl ist, so können ohne großen Fehler die zweiten und dritten Potenzen von α vernachlässigt werden; es folgt also $v_{100} = v_0 (1 + 3\alpha)$,

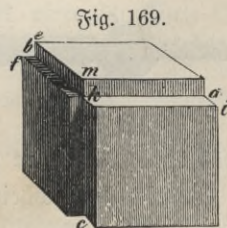


Fig. 169.

d. h. bei isotropen festen Körpern ist der kubische Adf. das Dreifache des linearen. — Fig. 169 veranschaulicht geometrisch, daß die drei Prismen $a^2l_0^3$ und der Würfel $a^3l_0^3$ wegen ihrer Kleinheit vernachlässigt werden können.

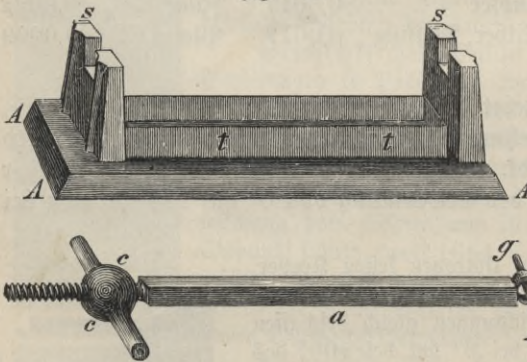
Der Hohlraum eines Gefäßes vergrößert sich bei Erwärmung gerade so, als wenn er mit der Substanz des Gefäßes gefüllt wäre. Man überzeugt sich hiervon durch Vergleich der Ausdehnung eines massiven Würfels mit derjenigen eines gleich großen Hohlwürfels gleicher Substanz.

Anisotrope feste Körper dehnen sich nach verschiedenen Richtungen verschieden aus, manche ziehen sich sogar in bestimmten Richtungen bei Erwärmung zusammen. Kalkspat zeigt Ausdehnung in der Richtung der Hauptachse, Zusammenziehung in den dazu senkrechten Richtungen. Eine gespannte Guttaperchafaschnur zieht sich bei Erwärmung zusammen, ebenso ein Kautschukschlauch. Jodsilberkristalle zeigen in der Richtung der Hauptachse bei Erwärmung Kontraktion, senkrecht dazu eine viel schwächere Ausdehnung, so daß die kubische Ausdehnung negativ ist.

Die Ausdehnung durch die Wärme und die bei Abkühlung erfolgende Zusammenziehung findet Anwendung bei Überwindung großer Widerstände, z. B. um auseinander gewichene Mauern zu nähern, um den Reifen auf ein Rad zu pressen. Bei der Ausdehnung durch Wärme vermag ein Körper denselben Widerstand zu überwinden, den er einer gleich großen Raumverminderung entgegensetzt. Dasselbe gilt für die durch Erkaltung bewirkte Zusammenziehung.

Man kann hieraus auf die bedeutende Größe der Ausdehnungs- und Zusammenziehungskraft bei Metallen schließen. Muß z. B., um einen Eisenstab 1 mm zu verlängern, ein Gewicht von 3000 kg darangehängt werden, so beträgt der Widerstand, den er zu überwinden vermag, wenn er sich durch Erkaltung um 1 mm zusammenzieht, 3000 kg.

Fig. 170.



Daß ein bei Erkaltung sich zusammenziehender Körper einen großen Widerstand zu überwinden vermag, läßt sich durch den in Fig. 170 dargestellten Apparat nachweisen. Wird der Stab *a* in die Stege *s* gelegt und erwärmt, und wird die Schraubenmutter *c* fest angezogen, so wird beim nachfolgenden Abkühlen des Stabes durch seine Zusammenziehung

das etwa 1 cm dicke gußeiserne Stäbchen *g* zerbrochen.

Die Ungleichheit der Ausdehnung verschiedener fester Körper findet bei den Kompensationspendeln und Metallthermometern Anwendung.

Zweck der Kompensationspendel ist, die Pendellänge konstant zu erhalten. Das Graham'sche Kostpendel (Fig. 171) ist aus Stäben zweier verschiedenen Metalle a und b hergestellt. Die Stäbe a aus Metall von kleinem Adf. dehnen sich abwärts, die kürzeren Stäbe b aus Metall von stärkerer Ausdehnung dehnen sich aufwärts aus, so daß bei jeder Temperatur die Gesamtlänge dieselbe ist. — In welchem Verhältnis muß die Gesamtlänge der sich nach unten ausdehnenden Stäbchen a, die symmetrisch liegenden einfach gerechnet, zur Gesamtlänge der nach oben sich ausdehnenden b stehen? Wieviel Stäbe sind mindestens zur Herstellung eines Kostpendels nötig, wenn Messing- und Stahlstäbe genommen werden? — Bei den Taschenuhren wird das Pendel durch die Unruhe ersetzt, ein kleines Schwungrad (Fig. 172), das durch eine sich auf- und abwickelnde Spiralfeder in pendelartige Schwingungen um seine Achse versetzt wird. Bei steigender Temperatur wächst das Trägheitsmoment des Rades, also auch seine Schwingungsdauer. Die Konstanz des Trägheitsmoments wird dadurch erreicht, daß der Radkranz aus zwei zusammengelöteten Metallringen hergestellt wird, von denen der innere aus Stahl, der äußere aus Messing besteht, und dadurch, daß er an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen durchbrochen und hier mit kleinen Gewichten beschwert ist. — Breguet's Metallthermometer (1817) besteht aus aufeinander gelöteten Streifen von Platin, Gold und Silber, die eine Metallbandspirale bilden, deren oberes Ende in einem Bügel hängt; der am unteren Ende befestigte Zeiger gibt an einer Skala die Temperatur an.

Fig. 171.

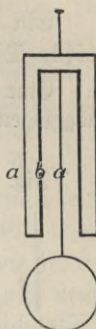
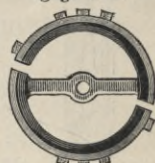


Fig. 172.



§ 124. Ausdehnung der tropfbaren Flüssigkeiten. Eine Flüssigkeit dehnt sich, wie jeder andere Körper, bei der Erwärmung nach allen Richtungen aus. Wegen der leichten Verschiebbarkeit ihrer Teile aber kommt ihre Querausdehnung bei der in einer Röhre eingeschlossenen Flüssigkeit auch als Verlängerung der Flüssigkeitssäule zum Vorschein. Die Ausdehnung einer Flüssigkeit ist daher identisch mit der kubischen Ausdehnung fester Körper. Aus der scheinbaren Ausdehnung einer in einer Röhre eingeschlossenen und erwärmten Flüssigkeit geht hervor, daß der Adf. der Flüssigkeiten größer ist als der kubische Adf. der festen Körper. Die wahre Ausdehnung einer Flüssigkeit ist gleich der Summe aus der beobachteten scheinbaren und der des Gefäßes.

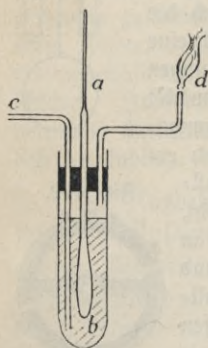
Hiernach läßt sich, wenn auch ungenau, der Adf. einer Flüssigkeit aus dem Anfangsvolumen, dem Temperaturzuwachs, der beobachteten scheinbaren Ausdehnung und dem kubischen Adf. des Gefäßes berechnen. Quecksilber dehnt sich ziemlich regelmäßig, d. h. proportional dem Temperaturzuwachs, aus; sein Adf. beträgt für $1^{\circ} \frac{1}{5550} = 0,00018$. Ist also B_0 der Barometerstand bei 0° , so ist bei demselben Luftdrucke, aber t° Temperatur $B_t = B_0 (1 + 0,00018 t)$. Die meisten anderen Flüssigkeiten dehnen sich

unregelmäßig aus, und zwar stärker mit steigender Temperatur. Vergleiche die Skalen eines Quecksilber- und Weingeistthermometers. — Ein Liter Wasser von 0° hat bei 100° ein Volumen von etwa 1,043 l. Ein Liter Alkohol von 0° hat bei 78° ein Volumen von etwa 1,1 l.

Ein sehr abweichendes Verhalten zeigt Wasser, insofern es seine größte Dichtigkeit bei etwa 4° C hat.

Eine Glasröhre a (Fig. 173) ist an einem Ende in ein Kapillarrohr ausgezogen, am anderen ist an sie ein birnenförmiges Gefäß angeblasen.

Fig. 173.



Gefäß und Rohr sind so weit mit destilliertem Wasser gefüllt, daß dieses bei Zimmertemperatur die Kapillare fast ausfüllt. Kühlt man das Gefäß ab, was bequem durch Verdunstenlassen des Äthers b zu erreichen ist (bei c strömt Leuchtgas ein, bei d wird es verbrannt), so sinkt das Wasser in der Kapillare, fängt bei 4° aber plötzlich wieder an zu steigen.

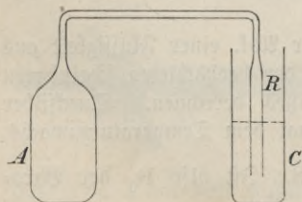
Diese Anomalie des Wassers ist in Verbindung mit einer zweiten, daß nämlich Wasser beim Gefrieren sich ausdehnt, von Bedeutung für den Haushalt der Natur. Abkühlung der stehenden Gewässer von oben her hat Sinken der kalten Wasserschichten nur so lange zur Folge, bis die ganze Wassermasse auf 4° abgekühlt ist; bei weiterer Abkühlung bleiben die kalten Schichten und beim Gefrieren auch die Eisschicht oben. Wasser leitet die Wärme schlecht. Die kalte

Eis- und Wasserschicht schützen also die tieferen Schichten vor Abkühlung und bilden ein schützendes Dach für die lebenden Wesen der Tiefe. — Bei Abkühlung dehnt sich zwar das Wasser von 4° auf 0° wieder aus, ebenso beim Gefrieren; aber bei weiterer Abkühlung zieht sich das Eis wieder zusammen.

§ 125.

§ 125. **Ausdehnung der Gase.** Die Gase werden, wie schon die thermoskopischen Versuche zeigten, durch die Wärme am stärksten ausgedehnt. Auch bei ihnen kann ebenso wie bei den tropfbareren Flüssigkeiten nur von einer kubischen Ausdehnung die Rede sein. Wie Gay-Lussac (1802) gefunden hat, beträgt die Volumenzunahme aller Gase bei einer Temperatursteigerung von 0° bis 100° C etwa $\frac{1}{3}$ ihres Volumens, wenn der Druck unverändert erhalten wird. Der genauere Wert für Luft ist $0,3671 \sim \frac{1}{2,73}$.

Fig. 174.



innerhalb und außerhalb des Rohres die Niveauhöhe dieselbe ist. Es läßt

sich dann für jede Temperaturzunahme um 1° eine Volumenvergrößerung um 1 ccm nachweisen¹⁾.

Wird ein Gas in einem geschlossenen Gefäße erwärmt, so wächst der Druck auf die Gefäßwandung, und zwar beträgt die Zunahme für Luft bei einer Temperaturerhöhung von 0° bis 100° C 0,3668 der Spannung bei 0° . Demnach ist der Koeffizient der Ausdehnung sehr nahe gleich dem der Spannungsvermehrung. Dieses Gesetz gilt für alle Gase, wie bereits Gay-Lussac erkannt hat und durch spätere Versuche besonders von Regnault und Magnus bestätigt worden ist.

Würde das Gesetz von Boyle-Mariotte (§ 88) absolut genau sein, so würde der Spannungskoeffizient eines Gases mit seinem Abk. übereinstimmen. Unter der Annahme dieser Übereinstimmung, wie sie bei vielen Gasen (H, N, O, CO₂ und deren Mischungen, also auch Luft) gerechtfertigt ist, solange sie ihrem Kondensationspunkte nicht nahe sind, gilt folgende Überlegung.

Bezeichnet v_0 das Volumen eines Gases bei 0° und dem Druck p_0 , so wächst durch eine Erwärmung um t° das Volumen auf

$$v' = v_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right), \quad d = \frac{1}{273}$$

wenn der Druck derselbe bleibt. Setzt man nun das Gas dem Drucke p aus, indem man gleichzeitig die Temperatur auf t° erhält, so nimmt es das Volumen v an, und es muß nach dem Boyleschen Gesetze $vp = v'p_0$, demnach $vp = v_0 p_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right)$ sein. Diese Gleichung heißt das Boyle-Gay-Lussacsche Gesetz.

Zählt man die Grade T nicht vom Eispunkte, sondern von der Temperatur -273° (absoluter Nullpunkt) ab, so läßt sich dieses Gesetz in der rechnerisch einfacheren Form $vp = \frac{v_0 p_0}{273} T$ darstellen. Man nennt die so gemessene Temperatur T absolute Temperatur.

Ein Liter Luft wiegt bei 0° und 76 cm Druck 1,293 g. Wieviel wiegen 10 l Luft, die bei 15° eine Spannung von 100 Atm. besitzen? — Reduktion eines Gasvolumens auf den Normalzustand, d. h. Berechnung des Volumens bei 0° Temperatur und 76 cm Druck.

Die Gasthermometer haben den Vorzug einer großen Empfindlichkeit sowie der Verwendbarkeit bei sowohl sehr hohen als auch sehr tiefen Temperaturen. Doch können sie nicht als gewöhnliches Meßinstrument verwendet werden, da die Anbringung einer festen Skala ausgeschlossen ist. Als Normalthermometer wird seit 1900 das Wasserstoff-Spannungsthermometer angesehen.

¹⁾ R. Fuchs, Postleiche Zeitschrift. Jahrg. VIII, S. 368.

Technische Verwendung findet die Ausdehnung der Gase bei den Pyrometern, d. h. Instrumenten, die in Schmelzöfen, Kalköfen u. dgl. zum Messen hoher Temperaturen verwendet werden. Zur Erläuterung diene folgendes Beispiel. Ein leeres Platingefäß, das in eine sehr enge Röhre ausläuft, von 150 cem Inhalt wird der zu messenden Temperatur ausgesetzt und nachher in Wasser von 0° geworfen. Die Luft in dem Gefäß zieht sich zusammen, und es mögen 120 cem Wasser von 0° eindringen. Dann haben sich 30 cem Luft von 0° bei der zu messenden Hitze auf einen Raum von 150 cem ausgedehnt. Wie berechnet man hieraus und aus dem Wkt. der Luft die Temperatur des Glühofens?

C. Kalorimetrie. Spezifische Wärme.

§ 126. § 126. **Kalorie. Richmannsche Regel.** Die Temperaturzunahme eines Körpers hängt nicht nur von der Menge der zugeführten Wärme, sondern auch von der Beschaffenheit des erwärmten Körpers ab.

Die gleiche Menge Kohle, die ein Zimmer behaglich heizt, erwärmt die Luft eines Saales nur um wenige Grade. Dieselbe Flamme, die 1 kg Wasser in einer gewissen Zeit um 10° erwärmt, erwärmt in derselben Zeit 1 kg Alkohol weit mehr. In beiden Fällen hat die gleiche Wärmemenge verschiedene Temperatursteigerungen bewirkt.

Zur Messung von Wärmemengen ist also das Thermometer allein nicht geeignet. Um ein Maß für Messung von Wärmemengen zu gewinnen, ist die Wärmemenge anzugeben, die eine bestimmte Masse eines bestimmten Körpers um eine gewisse Anzahl Grade erwärmt, und zwar legt man, da das Volumen eines Körpers mit der Temperatur sich ändert, Gewichtsmengen zugrunde. **Einheit der Wärmemenge oder Kalorie (Kal)** ist die Wärmemenge, die 1 kg Wasser um 1° erwärmt.

Erwärmt man 1 kg Wasser von 0° auf 100°, so ist zu jeder Temperatursteigerung um 1° nicht genau die gleiche Wärmemenge nötig; anfangs sind diese Wärmemengen durchschnittlich kleiner als zum Schluß, doch sind die Abweichungen gering. Als Einheit der Wärmemenge sieht man daher zweckmäßig die mittlere Kalorie an, d. h. den hundertsten Teil der Wärmemenge, die 1 kg Wasser von 0° auf 100° erwärmt. Mit ihr stimmt die Wärmemenge überein, die 1 kg Wasser von 15° auf 16° erwärmt, und diese gilt daher als Einheit. In der Praxis kann man sich mit der Annäherung begnügen, daß der Temperaturzuwachs der zugeführten Wärmemenge proportional ist, und diesem Umstande ist bei vorstehender Definition der Kalorie Rechnung getragen. — Zuweilen wird als Einheit die kleine Kalorie oder Grammkalorie (kal) benutzt, d. i. die Wärmemenge, die 1 g Wasser um 1° erwärmt. Es ist 1 Kal = 1000 kal.

Mischt man in einem mit schlechten Wärmeleitern umgebenen Gefäß, das also nach außen möglichst wenig Wärme abgibt oder von dort aufnimmt, 1 kg Wasser von 100° und 3 kg Wasser von 20°, so beträgt die Mischungstemperatur 40°. Das wärmere Wasser hat

sich also um 60° abgekühlt, das kältere um 20° erwärmt. Da nach der Definition der Kalorie zur Erwärmung von 3 kg Wasser um 20° 60 Kal erforderlich sind, so hat das wärmere Wasser 60 Kal abgegeben. 1 kg Wasser gibt also bei der Abkühlung um 60° ebensoviel Wärme ab, als zu seiner Erwärmung um 60° erforderlich ist. Dieses Gesetz gilt allgemein. Jeder Körper gibt bei seiner Abkühlung um eine gewisse Anzahl Grade ebensoviele Kalorien ab, als zu seiner Erwärmung um die gleiche Anzahl Grade nötig ist.

Hiernach läßt sich die Mischungstemperatur T^0 zweier Wassermassen von den Gewichten m_1 und m_2 kg und den Anfangstemperaturen t_1^0 und t_2^0 berechnen. Das kältere Wasser m_1 hat sich um $(T - t_1)^0$ erwärmt, also $m_1(T - t_1)$ Kal aufgenommen; das warme Wasser m_2 hat $m_2(t_2 - T)$ Kal abgegeben. Da die Anzahl der aufgenommenen Kalorien gleich der abgegebenen ist, so ist

$$m_1(T - t_1) = m_2(t_2 - T)$$

$$T = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}$$

Diese Formel heißt die Richmannsche Mischungsregel (1750). Ihre Gültigkeit ist durch zahlreiche Versuche bestätigt.

§ 127. **Spezifische Wärme. Wärmekapazität.** Die Richmannsche § 127. Regel in vorstehender Formel gilt nicht mehr, sobald zwei Körper gemischt werden, die nicht nur verschiedene Temperatur besitzen, sondern auch aus verschiedenen Stoffen bestehen. Bei Mischung von 1 kg Wasser von 100° und 1 kg Quecksilber von 69° entsteht eine Mischungstemperatur von 99° , bei Mischung von 1 kg Quecksilber von 100° und 1 kg Wasser von 69° dagegen eine Mischungstemperatur von 70° . Die Ursache dieser Erscheinung liegt offenbar darin, daß zu derselben Erwärmung gleicher Massen verschiedener Stoffe verschiedene Wärmemengen nötig sind oder daß gleiche Massen verschiedener Stoffe bei gleicher Abkühlung verschiedene Wärmemengen abgeben.

Daß dies der Fall ist, zeigen folgende Versuche. Werden nach Tyndall gleich schwere und gleich große Hohlkugeln verschiedener Metalle von 100° Temperatur auf einen Paraffintuchen gelegt, so sinken sie bei Abkühlung auf Zimmertemperatur verschieden tief ein, z. B. Kupfer tiefer als Blei. — Werden nach Vooser zwei gleich schwere Blei- und Kupferzylinder von 100° , die gleich große Oberflächen haben, in gleiche Mengen Wasser gebracht, so wird das Wasser durch Kupfer ungefähr dreimal so stark erwärmt als durch Blei. — Werden zwei gleiche Kupferzylinder von 100° in gleiche Mengen Wasser und Alkohol gebracht, so steigt die Temperatur des Alkohols höher als die des Wassers.

Spezifische Wärme eines Stoffes heißt diejenige Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg dieses Stoffes um 1° zu erwärmen.

Die spez. Wärme des Wassers ist also 1. — Ähnlich wie bei Wasser hat sich bei allen anderen Stoffen gezeigt, daß die spez. Wärme von der

Temperatur abhängt, und zwar im allgemeinen mit steigender Temperatur wächst (Ausnahme Quecksilber). Doch sind auch hier die Abweichungen gering, so daß praktisch von ihnen abgesehen werden kann.

Werden m_1 kg eines Stoffes von der Temperatur t_1^0 und der spez. Wärme c_1 mit m_2 kg eines anderen Stoffes von der Temperatur t_2^0 und der spez. Wärme c_2 gemischt und beträgt die Mischungstemperatur T^0 , so nimmt der erste, kältere Stoff $m_1 c_1 (T - t_1)$ Kal auf; der zweite, wärmere gibt $m_2 c_2 (t_2 - T)$ Kal ab. Da die Zahl der abgegebenen Kalorien gleich der aufgenommenen sein muß, so ist

$$m_1 c_1 (T - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - T)$$

$$T = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

d. i. die erweiterte Richmannsche Regel. Ist $c_1 = c_2$, so folgt die Regel des § 126.

Bei der Mischung zweier Stoffe lassen sich die Gewichtsmengen, die Anfangstemperaturen und die Mischungstemperatur direkt beobachten. Kennt man von dem einen Stoff noch die spez. Wärme, so ist die spez. Wärme des zweiten Stoffes

$$c_2 = \frac{m_1 c_1 (T - t_1)}{m_2 (t_2 - T)}$$

Da die spez. Wärme des Wassers $c_1 = 1$ bekannt ist, so lassen sich nach dieser Mischungsmethode (Black 1760) die spez. Wärmen von Stoffen bestimmen, indem man die Stoffe mit Wasser von anderer Temperatur mischt.

Das zur Wärmemessung benutzte Gefäß heißt Kalorimeter. Es muß während des Versuchs möglichst vor Verlust oder Zufuhr von Wärme geschützt sein. Dies wird ziemlich vollkommen erreicht bei einem doppelwandigen Kalorimeter aus blanken Metallblechen, die durch eine isolierende Luftschicht und Kork getrennt sind. So wird der Wärmeaustausch nach außen, der durch Leitung oder Strahlung erfolgen könnte, möglichst vermieden. — Wie groß ergibt sich die spez. Wärme des Messings, wenn $\frac{1}{2}$ kg Messing von der Temperatur des unter Normaldruck siedenden Wassers 1,018 kg Wasser von der Temperatur 16,6° auf 20,1° erwärmt? Wie ändert sich das Ergebnis, wenn das Wasser, in dessen Dämpfen das Messinggewicht erwärmt wurde, bei 728 mm Druck siedete? (§ 132.)

Um die spez. Wärme von Stoffen zu bestimmen, die in Wasser löslich sind, nimmt man statt des Wassers eine andere Flüssigkeit von bekannter spez. Wärme und verfährt nach obiger Regel. Quecksilberkalorimeter. Soll die Mischungsmethode genaue Werte ergeben, so muß die Flüssigkeit vor und nach der Mischung um ungefähr gleichviel kälter bzw. wärmer sein als die Umgebung, die Mischung muß schnell beendet und die Erwärmung des Gefäßes mit berechnet werden.

Auch das Kalorimeter wird beim Versuch erwärmt, und zwar genau so wie das Wasser. Man trägt diesem Umstand Rechnung, indem man die

wirklich vorhandene Wassermenge um eine gedachte vergrößert, die sich ebenso erwärmt wie das Kalorimeter. Wiegt das Kalorimeter m kg und ist c seine spez. Wärme, so sind mc Kal zu seiner Erwärmung um 1° nötig. Ebensoviele Kalorien brauchen aber auch mc kg Wasser zu ihrer Erwärmung um 1° . Also kann das Kalorimeter in bezug auf seine Erwärmung durch mc kg Wasser ersetzt werden. Man nennt diese Größe den Wasserwert oder die Wärmekapazität des Kalorimeters. — Wie ändert sich das Ergebnis der obigen Rechnung, wenn das Messingkalorimeter 0,14 kg wog?

Nicht nur beim Kalorimeter, sondern bei jedem Körper heißt das Produkt mc die **Wärmekapazität** des Körpers. Sie ist die Wärmemenge, die nötig ist, um ihn um 1° zu erwärmen. Die spez. Wärme kann also als Wärmekapazität der Masseneinheit angesehen werden. Erwärmen Q Kal einen Körper von der Kapazität C um T° , so ist $Q = C \cdot T$, also $C = \frac{Q}{T}$.

Außer der Mischungsmethode zur Bestimmung der spez. Wärme sei noch die ebenfalls von Black angegebene Eisschmelzungsmethode erwähnt. Der zu untersuchende erwärmte Körper wird in die Höhlung eines Eisblocks gebracht; aus der Menge des Schmelzwassers läßt sich die spez. Wärme berechnen. Nach dieser Methode haben namentlich Lavoisier und Laplace Messungen vorgenommen. Sehr genaue Ergebnisse liefert das Eiskalorimeter von Bunsen (1870), bei dem aus der Volumenverminderung, die Eis von 0° beim Schmelzen erfährt, auf die Menge des geschmolzenen Eises und damit auf die Wärmekapazität des zu prüfenden Körpers geschlossen wird.

Spezifische Wärme einiger Stoffe.

Eisen	0,114	Zinn	0,056	Jenaer Normalglas	0,198
Zink	0,095	Platin	0,032	Terpentinöl	0,440
Kupfer	0,093	Gold	0,032	Alkohol	0,602
Silber	0,057	Quecksilber	0,033	Schwefelkohlenstoff	0,218
Blei	0,031	Messing	0,093	Wasser	1,000

Die große spez. Wärme des Wassers ist ein Hauptgrund des Unterschiedes von Land- und Seeklima; die spez. Wärme des Erdbodens beträgt durchschnittlich nur 0,2. — Die Kenntnis der spez. Wärme von schwer schmelzbaren Körpern (Eisen, Platin) ermöglicht die Messung hoher Temperaturen. Welche Temperatur besaß eine im Glühofen erwärmte p kg schwere Eisenkugel, die, in w kg Wasser von t_0° geworfen, dieses auf t_1° erwärmte?

Dulong und Petit haben (1818) folgendes merkwürdige Gesetz gefunden: Bei allen einfachen festen Stoffen ist das Produkt aus der spez. Wärme und dem Atomgewichte ein und dieselbe Zahl, nämlich 6,4. Die spez. Wärmen zweier einfachen Stoffe verhalten sich also umgekehrt wie die Atomgewichte. Das Produkt aus der spez. Wärme und dem Atomgewicht heißt Atomwärme und drückt die Menge Wärme aus, die ein Atom gebraucht, damit es um 1° wärmer werde; folglich braucht ein Atom einer einfachen, festen Substanz dazu dieselbe Wärmemenge.

Die spez. Wärmen von Kohlenstoff, Bor und Silizium sind bei gewöhnlichen Temperaturen kleiner, als sie das Dulong-Petit'sche Gesetz verlangt, aber bei steigender Temperatur nehmen sie erheblich zu, so daß sie bei 600° (Silizium bei 200°) den theoretischen Wert erreichen und von da sich nur wenig ändern. Auch die spez. Wärme dieser drei Stoffe befolgen also das allgemeine Gesetz, daß sie mit steigender Temperatur wachsen, allerdings stärker als bei anderen Stoffen. — Beim Schmelzen nimmt die spez. Wärme bedeutend zu (für Eis ist $c = 0,5$), beim Verdampfen dagegen ab.

Die spez. Wärme der Gase ist von ihrer Temperatur unabhängig, dagegen ist sie größer, wenn die Gase bei konstantem Drucke als wenn sie bei konstantem Volumen erwärmt werden.

Die spez. Wärme c_p bei konstantem Drucke kann nach einem Verfahren bestimmt werden, das der Mischungsmethode entspricht. Eine bestimmte Gasmenge, die auf eine bestimmte Anfangstemperatur erwärmt ist, wird in einem Spiralrohr durch ein Wasserkalorimeter geleitet; aus der Erwärmung des Wassers im Kalorimeter läßt sich c_p berechnen. Es ergeben sich für

Luft	0,2375	Stickstoff	0,2438	Kohlensäure	0,2169
Sauerstoff	0,2175	Wasserstoff	3,4090	Wasserdampf	0,4805.

Auch die einfachen Gase haben, untereinander verglichen, fast gleiche Atomwärme; diese ist aber kleiner als die Atomwärme der festen Körper, nämlich nur etwa 3,4. — Über die spez. Wärme c_v bei konstantem Volumen vgl. § 137₄.

D. Veränderung des Aggregatzustandes.

§ 128. § 128. **Allgemeine Übersicht.** Das Wasser ist ein Beispiel dafür, daß ein und dieselbe Substanz in drei verschiedenen Aggregatzuständen vorkommen kann und daß es möglich ist, eine Substanz aus einem Aggregatzustande in den anderen überzuführen. Zwischen den drei Aggregatzuständen sind sechs Übergänge denkbar, nämlich der Übergang vom festen in den flüssigen: Schmelzen, vom flüssigen in den gasförmigen: Verdampfen, vom festen in den gasförmigen: Verflüchtigen, vom flüssigen in den festen: Erstarren, Gefrieren, vom gasförmigen in den flüssigen: Kondensieren, vom gasförmigen in den festen: Sublimieren.

Sämtliche sechs Übergänge sind nicht nur denkbar, sondern auch ausführbar.

Schmelzungen fester Körper, z. B. von Eis, Wachs, Butter, Metallen, sind aus dem alltäglichen Leben bekannt, ebenso Verdampfungen von Flüssigkeiten, z. B. von Wasser, Äther, Alkohol. Beide Zustandsänderungen werden durch Zufuhr von Wärme bewirkt. — Verflüchtigung: Eis, Kampfer, Jod, Naphthalin werden gasförmig, ohne vorher flüssig geworden zu sein. Der Geruch mancher Metalle (Zinn) wird durch Verflüchtigung erklärt. — Erstarrung: Wasser, Quecksilber, geschmolzene Fette oder Metalle, genügend abgekühlt, werden fest. — Kondensation: Wasserdampf, hinreichend abgekühlt, verdichtet sich zu Wasser (Schwitzen der Fensterscheiben, Ausatmung von Menschen und Tieren bei Winterkälte, Herstellung

destillierten Wassers). Ebenso werden manche Gase (Schwefeldioxyd) durch Abkühlung allein, andere (Kohlenstoffdioxyd) bei gleichzeitiger Anwendung hohen Druckes verflüchtigt. — Sublimation: Schwefeldampf, plötzlich abgekühlt, geht in Schwefelblume über.

Diese Erfahrungen bestätigen die Gültigkeit der Regel (§ 120): Hinreichende Steigerung der Temperatur eines Körpers bewirkt im allgemeinen, falls nicht stoffliche Veränderungen eintreten, Steigerung des Aggregatzustandes; hinreichende Temperaturerniedrigung bedingt im allgemeinen ein Sinken des Aggregatzustandes.

§ 129. **Schmelzen und Erstarren.** 1. Wird ein fester Körper § 129. erwärmt, und tritt beim Erwärmen keine stoffliche Zersetzung ein, so steigt seine Temperatur so lange, bis er anfängt zu schmelzen (Schmelzpunkt). Wird er noch weiter erwärmt, so dient die zugeführte Wärme nicht zu seiner Temperaturerhöhung, sondern zu seiner Überführung aus dem festen in den flüssigen Zustand, sie wird an die Substanz gebunden oder sie wird latent, d. h. sie bleibt dem Thermometer verborgen (Schmelzwärme). Erst wenn die gesamte Substanz geschmolzen ist, steigt die Temperatur der Flüssigkeit. — Wird umgekehrt eine Flüssigkeit abgekühlt, so tritt bei genügender Abkühlung Erstarren oder Gefrieren ein (Erstarrungspunkt), bei weiterer Wärmeentziehung aber bleibt die Temperatur der immer mehr erstarrenden Flüssigkeit so lange dieselbe, bis die ganze Flüssigkeit erstarrt ist. Beim Erstarren wird also die beim Schmelzen latent gewordene Schmelzwärme wieder frei. Erst nach erfolgter Erstarrung tritt bei weiterer Wärmeentziehung eine Temperaturerniedrigung der erstarrten Substanz ein. — In der Regel, z. B. bei Eis, Wachs, stimmen Schmelzpunkt einer festen Substanz und Erstarrungspunkt der entsprechenden Flüssigkeit überein.

Ein Gemisch von Schnee oder gestoßenem Eis und Wasser zeigt die Temperatur von 0°; diese ändert sich nicht, wenn dem Gemisch durch eine Flamme Wärme zugeführt oder durch eine Kältemischung Wärme entzogen wird, solange nicht alles Eis geschmolzen oder alles Wasser gefroren ist. — Nicht bei allen festen Substanzen tritt die Schmelzung plötzlich ein; häufig besteht sie in einem allmählichen Übergange aus dem festen in den flüssigen Zustand durch alle Grade der Erweichung hindurch. Erste Art der Schmelzung findet sich bei kristallisierten Substanzen (Eis), letzte bei amorphen und gemischten (Wachs, Pech, technisch verwendetes Eisen). — Allotrope Körper (Schwefel) können verschiedene Schmelzpunkte haben.

Schmelzpunkte einiger Körper.

Schmiedeeisen	1600°	Zink	418°	Wachs	68°
Stahl	1300—1400°	Blei	328°	Ballrat	48°
Guß Eisen	1100—1200°	Wismut	269°	Butter	32°
Gold	1072°	Zinn	232°	Quecksilber	— 39°
Silber	968°	Schwefel (α)	115°	Kohlensäure	— 58°
		Schwefel (β)	120°		

Kohle hat sich auch bei den höchsten bisher erreichten Temperaturen (gegen 4000°) unerschmelzbar gezeigt. — Manche Metallgemische haben einen tieferen Schmelzpunkt als jeder ihrer Bestandteile. Rosess Gemisch (Bi, Pb, Sn) schmilzt bei 95°, Woods Gemisch (Cd, Bi, Sn, Pb) bei 60°—70°. Auch beruhen auf den genannten Gesetzen das Schnellot der Klempner (Sn, Pb) und der Zuschlag oder Fluß, den man in Hochofen zur schnelleren Schmelzung der Erze anwendet und der aus Flußpat, Borax, Quarz u. dgl. besteht.

2. Nicht immer stimmen Erstarrungspunkt einer Flüssigkeit und Schmelzpunkt der erstarrten Substanz überein. Bei Beobachtung gewisser Vorsichtsmaßregeln (vollständige Ruhe und Vermeidung der Berührung mit der äußeren Luft) gelingt es, manche Flüssigkeiten unter den Schmelzpunkt abzukühlen. Diese Erscheinung heißt Unterkühlung. Wird die unterkühlte Flüssigkeit durch Stoß erschüttert, oder wird ein Stück kristallisierter Substanz hineingeworfen, so findet plötzliches Erstarrten statt, und die Temperatur steigt auf den Schmelzpunkt. Es wird also beim Erstarrten der Flüssigkeit die beim Schmelzen verbrauchte Wärme wieder frei.

Wasser gefriert unter gewöhnlichen Umständen bei 0°, läßt sich jedoch nach Fahrenheit bis auf —10°, nach neueren Versuchen noch mehr unterkühlen. Die Entstehung des Glatteises wird dadurch erklärt, daß unterkühlte Wassertropfen beim Aufprallen auf den Erdboden gefrieren. Auch die Bildung der Hagelkörner wird auf Unterkühlung zurückgeführt.

Füllt man einen kleinen Glaskolben mit unterschwefligsaurem Natron und erhitzt dies, so schmilzt es bei 48° in seinem Kristallwasser. Taucht man dann ein Thermometer hinein, stellt den Kolben auf einen schlechten Wärmeleiter, damit die Flüssigkeit langsam erkaltet, so sinkt die Temperatur binnen 2 bis 3 Stunden auf die der Stubenluft, ohne daß die Masse fest wird. Sobald man aber ein Stückchen Kristall hineinwirft, geht die Kristallisation sehr schnell vor sich, und die Temperatur steigt auf 48°.

Am sichersten und bequemsten führt man den Versuch der Unterkühlung mit essigsaurem Natron aus. Das wasserhaltige Salz läßt sich in einem Reagenzglaschen durch wiederholtes Eintauchen in eine Bunsenflamme rasch zu einer klaren Flüssigkeit schmelzen, wenn man ein wenig Wasser zusetzt.

Eine der Unterkühlung der Flüssigkeiten ähnliche Erscheinung ist die Übersättigung von Salzlösungen. Da im allgemeinen die Sättigungsmenge eines Salzes in Wasser mit der Temperatur steigt (Ausnahme z. B. Gips), so tritt umgekehrt beim Abkühlen einer Salzlösung beim Sättigungspunkt ein teilweises Kristallisieren des gelösten Salzes ein. Gewisse Salzlösungen lassen sich aber unter den Sättigungspunkt abkühlen, ohne daß Kristallisation erfolgt. Erst beim Hineinwerfen bereits kristallisierter Substanz erfolgt Kristallisation unter Entwicklung von Wärme. Versuch mit einer Lösung von 3 Teilen Glaubersalz in 2 Teilen Wasser, die durch eine Ölschicht vor Berührung mit der äußeren Luft geschützt ist.

3. Schmelzwärme eines festen Körpers heißt die Anzahl von Kalorien, die notwendig ist, um 1 kg des auf den Schmelzpunkt

erwärmten festen Körpers in 1 kg Flüssigkeit von derselben Temperatur zu verwandeln.

Zu ihrer Bestimmung kann die in § 127 beschriebene Mischungsmethode dienen. In einem Kalorimeter wurden 1 kg Wasser von 80° und 1 kg schmelzendes Eis gemischt; man erhielt 2 kg Wasser von 0° . Wie groß ist hiernach die Schmelzwärme des Eises? — Nach genaueren Messungen von Régnault beträgt die Schmelzwärme des Eises 79,25 Kal. Die Schmelzwärmen der meisten anderen Stoffe sind bedeutend geringer, die von Quecksilber 2,8, Phosphor 5,2, Schwefel 9,4, Silber 21, Platin 27, Kupfer 43; bei Aluminium dagegen 80 Kal. — Die überaus große Schmelzwärme des Eises mildert den Übergang von der kalten zur warmen Jahreszeit und schützt die Niederungen zur Zeit der Eisschmelze vor plötzlichen Überschwemmungen (Blak 1757).

Auch bei der durch Lösung von Salzen in Wasser erfolgenden Verflüssigung dieser Körper findet Wärmeverbrauch statt; doch ist die Lösungswärme eines Salzes nicht konstant wie die Schmelzwärme, da sie von der relativen Menge des Lösungsmittels und der Temperatur abhängt.

Mischt man 1 g salpetersaures Ammoniak mit 0,75 g Wasser, so beträgt die Lösungswärme 50 kal; sie steigt aber auf 86 kal, wenn 45 g Wasser genommen werden. — Mit Hilfe des Looser'schen Thermoskops läßt sich der Verbrauch von Lösungswärme nachweisen, indem z. B. Salmiak in Wasser gelöst wird; ebenso daß Kalisalze eine größere Lösungswärme besitzen als die entsprechenden Natriumsalze. — Nimmt man zur Lösung Schnee statt Wasser, so sinkt die Temperatur noch tiefer, weil dann zum Schmelzen des Schnees auch Wärme verbraucht wird. Hierauf beruht die Herstellung künstlicher Kältemischungen. Unter Voraussetzung von Gewichtsteilen ergeben 1 Kochsalz und 3 Schnee eine Abkühlung bis -17° , 1 Kochsalz und 1 Schnee bis -22° , 10 Chlorkalzium und 7 Schnee bis -55° , 1 verdünnte Schwefelsäure (66%) und 1 Schnee bis -37° . Feste Kohlenensäure in Schwefeläther gelöst gibt im Vakuum eine Temperatur von -110° .

4. Fast alle festen Substanzen zeigen beim Schmelzen Änderungen des Volumens, und zwar vergrößern die meisten ihr Volumen, während bei einer Minderheit (Eis, Gußeisen, Bismut, Antimon) eine Volumenverkleinerung eintritt.

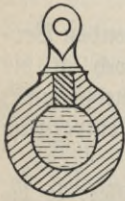
Eis schwimmt auf Wasser, sogar auf kochendem, ebenso Gußeisen auf dem geschmolzenen Metall. Die Volumenverminderung des Eises beim Schmelzen beträgt ungefähr $\frac{1}{11}$.

Diese Volumenänderung beim Schmelzen läßt auf die Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom äußeren Druck schließen. In der Tat bewirkt Steigerung des äußeren Druckes bei den Substanzen, die sich beim Schmelzen ausdehnen, eine Erhöhung des Schmelzpunktes, bei den übrigen eine Erniedrigung.

Der Schmelzpunkt des Eises erniedrigt sich bei einer Drucksteigerung von 1 Atm. um $0,0075^{\circ}$ (von James Thomson theoretisch gefunden und von

William Thomson durch Versuche nachgewiesen). Mousson ist es gelungen, Eis durch bloße Anwendung sehr hohen Druckes, den er auf 13000 Atm. schätzte, bei tiefer Temperatur (-18°) zu schmelzen. Dagegen erhöht sich nach Hopkinson für Wachs der Schmelzpunkt auf 80° bei Anwendung eines Druckes von 792 Atm. — Wasser, das bei 4° ein rings umschlossenes Gefäß mit festen Wänden genau ausfüllt, bleibt bei einer Abkühlung unter 0° flüssig, übt aber einen ungeheuren Druck (430—590 Atm.) auf die Gefäßwände aus.

Die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren (Kristallisieren) wird durch die Annahme erklärt, daß die Wassermolekeln sich zu regelmäßigen Gruppen anordnen (wie das bei jeder Kristallisation geschieht), und daß sie bei dieser Anordnung einen größeren Raum einnehmen als im flüssigen Zustande des Wassers.



Um zu zeigen, mit welcher Gewalt gefrierendes Wasser sich ausdehnt, füllt man eine kleine eisernen Bombe (Fig. 175) von etwa 15 mm Wanddicke vollständig mit luftfreiem Wasser, verschraubt sie so fest wie möglich mit einem eingefetteten Stöpsel und setzt sie in eine Kältemischung. Sobald das Wasser gefriert, zerplatzt die Bombe.

Legt man über die Mitte eines Eisblocks, der an den Enden unterstützt ist, eine Schlinge aus dünnem Stahldraht und hängt ein Gewichtstück von 4—25 kg an den Draht, so wird der Eisblock binnen kurzer Zeit durchschnitten, das Gewicht fällt herab, die beiden Teile des Blockes aber bilden ein ebenso festes Ganze wie vorher. Die Schnittfläche macht sich nur durch Lichtreflexion bemerkbar. Es muß also das Eis auf der unteren Seite des Drahtes durch den Druck schmelzen und oberhalb desselben wieder gefrieren. Dieser Vorgang gibt die Erklärung zu der Erscheinung, daß die Gletscher von festem, kristallinischem Eise nicht nur in steter Bewegung bergabwärts begriffen sind, sondern sich auch durch enge Schluchten hindurchdrängen und nachher sich wieder ausbreiten, wie es eine teigartige Substanz tun würde. Das Eis wird an seiner Grundfläche durch den Druck seiner großen Masse flüssig, das entstandene Wasser gefriert aber beim Hervorquellen wieder (Regelation des Eises).

§ 130. § 130. **Verdampfung und Kondensation.** Die Verdampfung einer Flüssigkeit geht entweder unter Blasenbildung vor sich oder ohne solche, im letzten Falle nur an der Oberfläche. Die erste Art der Verdampfung heißt Sieden, die letzte Verdunsten.

1. Wir verfolgen das Sieden an dem bekanntesten Beispiel, dem Kochen des Wassers. Wird kaltes Wasser in einem Glase durch eine Gasflamme erwärmt, so treten bei fortwährender Temperatursteigerung nacheinander folgende Erscheinungen auf. Das Gefäß beschlägt von außen, im Wasser zeigen sich Strömungen, die durch beigemengte Sägespäne sichtbar gemacht werden können, an den inneren Wandungen des Gefäßes setzen sich Luftblasen ab, die nach einiger Zeit aufsteigen,

am Boden beginnt die Entwicklung von Dampfblasen, die anfangs beim Aufsteigen wieder verschwinden (Singen des Teekessels), schließlich aber die Oberfläche erreichen und plazen. Die ganze Flüssigkeit gerät in wallende Bewegung, sie siedet. Das Thermometer zeigt auch bei weiterer Wärmezufuhr stets dieselbe Temperatur, den Siedepunkt, an, und zwar 100° bei Normalluftdruck.

Bei einem Luftdruck von 76 cm ist der Siedepunkt von

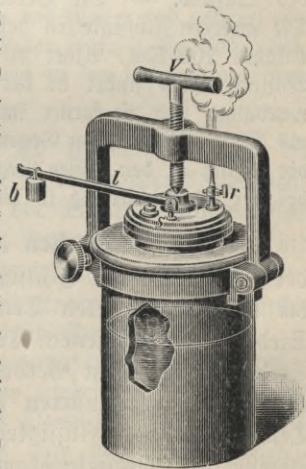
☞ Kohlendioxyd	— 78°	Salpetersäure	86°
Chlor	— 34°	Meerwasser	104°
Cyngas	— 25°	Terpentinöl	160°
☞ Schwefeldioxyd	— 10°	Leinöl	316°
Schwefeläther	35°	Schwefelsäure, konz.	338°
☞ Alkohol	78°	Quecksilber	357°

Bereits ausgekochtes, also luftfreies Wasser, in glattwandigen Gefäßen von neuem erhitzt, läßt sich über den Siedepunkt hinaus erhitzen. Dann aber tritt plötzliche Dampfbildung ein, und die Temperatur sinkt auf den normalen Siedepunkt. Dieser Siedeverzug ist vielleicht die Ursache mancher Kessel-Explosionen.

2. Der Siedepunkt einer Flüssigkeit sinkt und steigt, je nachdem der auf der Flüssigkeit lastende Druck sinkt oder steigt. (Vgl. § 132.)

Bringt man Wasser von 70° unter die Glocke der Luftpumpe, so fängt es nach einigen Kolbenzügen an zu kochen. Dabei steigen die Dampfblasen meist aus der Mitte auf, nicht vom Boden. Warum? — Bringt man in einer Kochflasche Wasser zum Kochen, verstopft dann die Öffnung mit einem Kork, kehrt die Flasche um und kühlt sie vorsichtig mit einem nassen Schwamme ab, so fängt das Wasser von neuem an zu kochen. — Beim Puls- oder Wasserhammer, einem luftleeren Glasgefäß, das zum Teil mit Wasser gefüllt ist, setzt bereits die Wärme der Hand das Wasser in eine wallende, dem Sieden ähnliche Bewegung. — Auf hohen Bergen kocht das Wasser unter 100° , auf dem Montblanc z. B. bei 85° . Ungefähr entspricht einer Luftdruckabnahme von 1 mm eine Siedepunktserniedrigung von $\frac{1}{27}^{\circ}$. Mit Hilfe eines hypsometrischen Thermometers, d. h. eines Thermometers, das innerhalb der Grenzen von etwa 80° bis 100° sehr genaue Ablesungen gestattet, ist es also möglich, durch Bestimmungen des Siedepunktes Höhenmessungen vorzunehmen. — Im Papinschen Topf (Fig. 176), d. i. ein eiserner Topf mit aufgeschraubtem Deckel und Sicherheitsventil, läßt sich die Temperatur des Wassers beliebig erhöhen, weil die zunehmende Spannkraft der über dem Wasser sich sammelnden Dämpfe das Kochen verhindert.

Fig. 176.



3. Aufgelöste Salze erhöhen den Siedepunkt des Wassers, mechanische Beimengungen (Sand, Sägespäne) haben jedoch keinen Einfluß auf die Höhe des Siedepunktes.

Gesättigte Kochsalzlösung siedet bei 108° . Der Dampf, der sich aus einer siedenden Salzlösung bildet, ist, abgesehen von mechanisch mitgerissenen Teilchen, ebenso rein, als ob er sich aus reinem Wasser gebildet hätte und besitzt nach Rudberg die Temperatur des unter gleichen Verhältnissen siedenden reinen Wassers. Warum bringt man zur Bestimmung des Siedepunktes das Thermometer in den Dampf der siedenden Flüssigkeit, nicht in die Flüssigkeit selbst?

4. Verdampfungswärme einer Flüssigkeit heißt die Anzahl von Kalorien, die nötig ist, um 1 kg der auf den Siedepunkt erwärmten Flüssigkeit in 1 kg Dampf von gleicher Temperatur zu verwandeln.

Zur rohen Bestimmung der Verdampfungswärme des Wassers wurden 200 g Wasser durch eine Flamme von 50° auf 100° in 5 Minuten erwärmt; dieselbe Flamme verdampfte dann die Hälfte des Wassers in 27 Minuten. Wie groß ergibt sich hieraus die Verdampfungswärme des Wassers?

Wird der Dampf einer Flüssigkeit abgekühlt, so wird er kondensiert, und die bei der Verdampfung aufgenommene Verdampfungswärme wird jetzt wieder frei als Kondensationswärme.

Wird Wasserdampf in einem Schlangenrohr durch Kühlwasser geleitet, so tritt Kondensation des Wasserdampfes (Destillation) unter gleichzeitiger Erwärmung des Kühlwassers ein. w g Kühlwasser von t_0° wurden durch p g Wasserdampf von 100° auf t_1° erwärmt; gesucht die Verdampfungswärme des Wassers. — Die Verdampfungswärme des Wassers beträgt 536 Kal. Die anderen Flüssigkeiten haben bedeutend kleinere Verdampfungswärmen, so Alkohol 208 Kal, Äther 90 Kal. — Die große Kondensationswärme des Wasserdampfes findet in der Dampfheizung und Dampfbocheinrichtung Anwendung. Sie ist ferner im Haushalte der Natur insofern von Bedeutung, als sie die klimatischen Gegensätze mildert: die erwärmten feuchten Luftmassen, die täglich in den heißen Gegenden aufsteigen, geben die Kondensationswärme bei der Wolkenbildung in höheren Breiten wieder ab.

§ 131.

§ 131. **Verdunsten** ist ein langsames Verdampfen, das nur an der Oberfläche der Flüssigkeit, nicht auch im Innern, und nicht erst bei einer bestimmten Temperatur, sondern bei jeder unterhalb des Siedepunktes gelegenen Temperatur stattfindet. Im Gegensatz zum Sieden findet beim Verdunsten keine Dampfblasenbildung statt. Die Menge der verdunsteten Flüssigkeit ist um so größer, je höher die Temperatur der Flüssigkeit ist, je größer ihre Oberfläche ist und je schneller der Flüssigkeitsdampf über der Flüssigkeit entfernt wird.

Feuchte Wäsche trocknet im Sonnenschein leichter als im Schatten. Bei Schwefelsäure ist die Verdunstung bei gewöhnlicher Temperatur unmerklich, ebenso bei Quecksilber unter -6° . — Wäsche wird zum Trocknen ausgebreitet aufgehängt. — Bei Wind trocknet Wäsche besser als bei ruhiger Luft.

Jeder Raum vermag nur eine gewisse Menge Dampf aufzunehmen (die Verdunstung hört auf, wenn der Raum über der Flüssigkeit mit Dampf gesättigt ist), aber eine um so größere Menge, je wärmer der Dampf ist. Hierbei ist es gleichgültig, ob der Raum luftleer oder mit Luft erfüllt. (Dalton 1801, vgl. § 92.)

Diese Gesetze ergeben sich aus § 132.

Auch bei der Verdunstung findet, wie bei jeder Verdampfung, Wärmeverbrauch statt. Da aber bei der Verdunstung keine künstliche Zufuhr von Wärme erfolgt, so wird die Wärme der Flüssigkeit und ihrer Umgebung entzogen, es tritt Verdunstungskälte auf.

Nach einem Gewitterregen tritt angenehme Abkühlung ein, ebenso, nachdem die Straßen mit Wasser besprengt sind. Trinkwasser kann dadurch kühl erhalten werden, daß der Wasserkrug mit feuchten Leinentüchern umwickelt wird, oder daß es in porösen, nicht glasierten Tongefäßen (Mkrazzas) aufbewahrt wird. — Die Verdunstungskälte ist um so größer, je flüchtiger die verdunstende Flüssigkeit ist. Äther und Schwefelkohlenstoff eignen sich daher zur Herstellung großer Verdunstungskälte. Durch Verdunstung des Äthers kann Wasser zum Gefrieren gebracht werden (vgl. Fig. 173). Daß auch durch die Verdunstungskälte des Wassers selbst Wasser zum Gefrieren gebracht werden kann, zeigt Wollastons Kryophor (Fig. 177). An ein U-förmiges Glasrohr ist an einem Ende eine Kugel a, am anderen ein zylindrisches Gefäß b angeschmolzen. Die Kugel ist fast zur Hälfte mit destilliertem Wasser gefüllt, der übrige Raum ist luftleer. Bringt man b in eine Kältemischung, so werden in b Wasserdämpfe kondensiert; infolgedessen verdunstet in a das Wasser und gefriert nach einiger Zeit. — Die Verdunstungskälte verflüchtigter Gase, z. B. NH_3 , SO_2 , CO_2 , wird technisch zur Gewinnung von Kunsteis in den Eismaschinen ausgenutzt. (S. § 134.)

Fig. 177



§ 132. **Eigenschaften der Dämpfe.** Es ist bekannt, daß die § 132. Wasserdämpfe bei hohen Temperaturen einen großen Druck ausüben; man benutzt diese Eigenschaft zum Treiben der Dampfmaschinen, und die zuweilen eintretenden Explosionen von Dampfkesseln zeigen, bis zu welcher gefährlichen Höhe die Dampfspannung anwachsen kann. Aber auch Dämpfe, deren Temperatur weit unter dem Siedepunkte liegt, suchen sich auszudehnen und üben einen Druck aus.

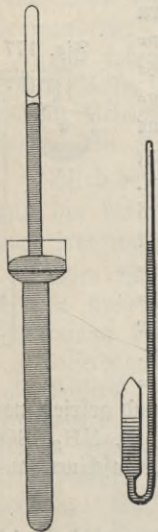
1. Man fülle eine etwa 80 cm lange Barometerröhre mit Quecksilber, verschließe sie mit dem Finger und tauche sie umgekehrt in ein Gefäß mit Quecksilber. Das in der Röhre enthaltene Quecksilber sinkt dann bis zur Höhe des Barometerstandes (§ 86). Läßt man nun einige Tropfen Wasser in die Torricellische Leere steigen, so verwandelt sich ein Teil des Wassers in Dampf, und dieser drückt das Quecksilber um ein merkliches Stück herab (bei 15°C fast um 13 mm). Hat man statt des Wassers Äther (etwa 1 cm) aufsteigen lassen, dann sinkt die Quecksilbersäule bei 15°C sogar um 354 mm. Eine geringe Erwärmung des Dampfraumes

mit der Hand genügt, um das Quecksilber noch weiter herabzudrücken. Die Dampfspannung wächst also mit steigender Temperatur.

2. Um das Verhalten eines Dampfes bei gleichbleibender Temperatur, aber sich änderndem Volumen zu untersuchen, taucht man die Barometer-
röhre in ein weiteres mit Quecksilber gefülltes Rohr (Fig. 178) und bringt
nur sehr wenig Äther in die Torricellische Leere, so daß das Quecksilber
nur etwa um 200 mm sinkt. Wenn man nun die Barometer-
röhre tiefer
und tiefer eintaucht und dadurch den Dampf verdichtet, so wird anfangs
die Quecksilbersäule in ihr niedriger und niedriger, und man beobachtet,
daß sich die Dampfspannung zunächst wie bei einem Gase ändert, nämlich
umgekehrt proportional dem Volumen. Sobald aber das

Fig. 178. Fig. 179.

Quecksilber um 354 mm gesunken ist, läßt sich durch
tieferes Eintauchen die Spannung nicht weiter erhöhen,
da ein Teil des Dampfes sich wieder in flüssigen Äther
verwandelt, der auf dem Quecksilber schwimmt.



Das Verhalten eines Dampfes hängt demnach
sehr wesentlich davon ab, ob er noch mit der Flüssig-
keit, aus der er sich entwickelt hat, in Berührung
ist oder nicht. Im ersten Falle nennt man den
Dampf gesättigt, im letzten überhitzt. Während
sich die Spannung eines überhitzten Dampfes wie
die eines Gases nach dem Boyle'schen Gesetze (§ 88)
ändert, folgt ein gesättigter Dampf diesem Gesetze
nicht, sondern besitzt bei gleichbleibender Temperatur
eine gewisse größte Spannung, also auch größte
Dichtigkeit, die man durch Volumenänderungen
weder erhöhen noch vermindern kann.

3. Die Spannung des gesättigten Wasserdampfes
für verschiedene Temperaturen läßt sich auf folgende
Weise messen: Bringt man in ein Barometer (Fig. 179)
über das Quecksilber des Gefäßes etwas Wasser,
zieht dann das Gefäß in eine feine Spitze aus, entfernt durch Kochen
des Wassers alle Luft und schmilzt die Spitze zu, so sinkt beim Erkalten
das Quecksilber in der Röhre und steht bei gewöhnlicher Temperatur
1,5 bis 2 cm höher als in dem Gefäß. Die Differenz des Quecksilber-
standes in dem Gefäße und in der Röhre gibt die Spannkraft
des in dem Gefäße befindlichen Wasserdampfes bei der herrschenden
Temperatur, vermehrt um den Druck der kleinen Wassermenge über
dem Quecksilber. Will man die Spannkraft für alle Temperaturen
zwischen 0 und 100° erhalten, so taucht man das Gefäß in Wasser
von 0° und erwärmt nach und nach bis 100°.

Die Spannkraft der Dämpfe unter 0° kann man erhalten, wenn
man das Gefäß in eine Kältemischung bringt.

Für Temperaturen über 100° kann man einen Apparat anwenden,
der sich von dem soeben beschriebenen nur dadurch unterscheidet, daß

er eine längere Röhre hat, die oben offen ist. Das Gefäß taucht man in Öl oder eine andere Flüssigkeit, die sich über 100° erwärmen läßt.

Wie findet man hierbei die Spannkraft des Dampfes?

Für sehr hohe Temperaturen müssen andere Apparate angewendet werden, deren Beschreibung uns zu weit führen würde.

Spannkraft der gesättigten Dämpfe einiger Flüssigkeiten in mm:

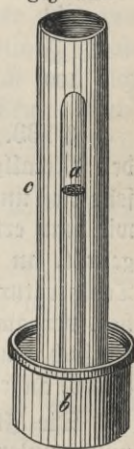
Temperatur	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°
Wasser	1,0	4,6	17,4	55,0	149,2	355,5	760,0
Mkohol	3,3	12,2	44,0	133,4	350,2	811,8	1692,3
Äther	63,0	184,9	442,4	921,2	1728,1	2991,4	4859,0

Der Vergleich einer ausführlichen derartigen Tabelle mit der Tabelle der Siedepunkte zeigt, daß eine Flüssigkeit bei derjenigen Temperatur siedet, bei der die Spannkraft ihres gesättigten Dampfes gleich dem auf der Flüssigkeit lastenden Druck ist. Hieraus erklärt sich die Abhängigkeit des Siedepunktes vom Luftdruck.

4. Die Dichtigkeit des Wasserdampfes bestimmte Gay-Lussac auf folgende Weise:

Er füllte ein Glaskügelchen mit sehr dünnen Wänden, das in eine feine Spitze ausgezogen und dessen Gewicht vorher bestimmt worden war, zum Teil mit Wasser, trieb durch Erhitzung die Luft aus und schmolz die Spitze zu. Durch abermaliges Wägen bestimmte er das Gewicht des darin befindlichen Wassers. Hierauf füllte er eine etwa 30 cm lange graduierte Glasröhre a (Fig. 180) mit Quecksilber und tauchte sie umgekehrt in ein eisernes, ebenfalls mit Quecksilber gefülltes Gefäß b; dabei blieb die ganze Röhre mit Quecksilber gefüllt. Darauf ließ er in dieser Röhre das Glaskügelchen emporsteigen, umgab die Röhre mit einem weiteren, oben und unten offenen Glaszylinder c, indem er ihn ebenfalls in das Gefäß b tauchte, füllte ihn mit Öl und stellte nun den ganzen Apparat auf einen Ofen. Durch die Erwärmung platzte das Glaskügelchen, das Wasser verwandelte sich nach und nach vollständig in Dampf, und die Quecksilbersäule in a wurde herabgedrückt. Um sicher zu sein, daß alles Wasser in Dampf verwandelt war, erhitzte er denselben weit über den Sättigungspunkt und erhielt dann die Temperatur eine Zeitlang konstant. Nun konnte er an einem in das Öl der Zylinders c eingetauchten Thermometer die Temperatur und an der Einteilung der Röhre a den Rauminhalt des entstandenen Dampfes ablesen. Da er das Gewicht des Dampfes kannte, so ließ sich leicht dessen Dichtigkeit für die beobachtete Temperatur berechnen. Der Unterschied zwischen der Höhe der Quecksilbersäule in a und dem Barometerstande gab die Spannkraft des

Fig. 180.



Dampfes. Er untersuchte auf diese Weise die Dichtigkeit des Dampfes für verschiedene Temperaturen und fand das Gesetz, daß die Dichtigkeit des Wasserdampfes, wenn er nicht seinem Sättigungspunkte zu nahe ist, stets $\frac{5}{8}$ der Dichtigkeit der Luft ist, die mit ihm gleiche Spannkraft und gleiche Temperatur hat. Da man aber die Dichtigkeit der Luft für jede Temperatur und Spannkraft berechnen kann, so kann man für jede Temperatur und Spannkraft die Dichtigkeit des Wasserdampfes finden.

Nach § 125 findet man, daß 1 ccm Luft bei t° C und dem Drucke von p cm Quecksilber $\frac{0,001293 \cdot p}{(1 + 0,00367 t) \cdot 76}$ Gramm wiegt. Diese Zahl gibt auch die Dichtigkeit der Luft, d. h. die Masse von 1 ccm an, wenn man die Grammmasse als Einheit annimmt.

Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes und Gewicht von 1 cbm Dampf in Gramm.

Temperaturgrade nach Celsius	Spannung in mm	Gewicht von 1 cbm in Gramm	Temperaturgrade nach Celsius	Spannung in Atm.	Gewicht von 1 cbm in Gramm
-20	1,0	1,0	100,0	1	605,9
-10	2,2	2,2	111,7	1,5	887,4
0	4,6	4,8	120,6	2	1162,9
5	6,5	6,7	127,8	2,5	1434,3
10	9,2	9,2	133,9	3	1702,1
15	12,7	12,6	139,2	3,5	1967,6
20	17,4	17,0	144,0	4	2230,3
25	23,5	22,8	148,3	4,5	2491,1
30	31,6	30,1	152,2	5	2750,0
35	41,9	39,3	159,2	6	3263,2
40	55,0	50,9	165,3	7	3771,1
60	149,2	130,6	170,8	8	4274,5
80	355,5	295,8	175,8	9	4774,1
100	760,0	605,9	180,3	10	5270,4

§ 133. § 133. **Der Leidenfrostsche Tropfen.** Bringt man in ein glühendes Metallgefäß einige Tropfen einer Flüssigkeit, deren Siedepunkt sehr tief unter der Temperatur des Gefäßes liegt, so kommt sie nicht, wie man erwarten sollte, zum Kochen, sondern rotiert darin in Kugelform, an Masse nach und nach abnehmend. Sobald sich aber die Temperatur des Gefäßes bis zu einem gewissen Punkte erniedrigt hat, verdampft der Rest der Flüssigkeit mit großer Heftigkeit. Dieser Versuch wurde zuerst von Boerhaave (1732), später von Leidenfrost (1756) angestellt.

Die Flüssigkeit bleibt um so länger flüssig, je tiefer ihr Siedepunkt unter der Temperatur des Gefäßes liegt.

Daß die Temperatur der Flüssigkeit unter ihrem Siedepunkte bleibt, erkennt man daraus, daß man sie, ohne sich zu verbrennen, aus dem glühenden Gefäße in die Hand gießen kann, und hat darin seinen Grund, daß sich zwischen der Flüssigkeit und dem Gefäße eine

Dampfschicht bildet, wodurch erstens Wärme verbraucht und zweitens eine Berührung der Flüssigkeit mit dem Gefäße verhindert wird.

Gießt man in einen kleinen Platinlöffel ein paar Tropfen Wasser, so breiten sie sich so aus, daß der Löffel nur beneht erscheint, wenn man ihn aber vorher rotglühend gemacht hat, tritt die oben beschriebene Erscheinung ein. Noch länger bleibt Äther flüßig. Wassertropfen auf flüßiges Blei gegossen rollen als kleine Kugeln darüber hin. Von flüßigem Schwefeldioryd, das bei -10° siedet, kann man eine ziemlich große Menge in einen rotglühenden eisernen Schmelztiegel gießen, ohne daß es verdampft. Gießt man dann Wasser hinzu, so verwandelt es sich plötzlich in Dampf, und das Wasser gefriert. In einem glühenden Platin- oder Kupfertiegel kann man Quecksilber gefrieren lassen, wenn man in den Tiegel ein Gemisch von fester Kohlenäure und Äther bringt und in dieses Gemisch einen kleineren Tiegel (eisernen Fingerhut) einbettet, der das Quecksilber enthält.

Aus dem angeführten Gesetze lassen sich manche Explosionen von Dampfesseln erklären, wenn sie nicht hinreichend mit Wasser gespeist waren. In flüßiges Blei und Eisen kann man den Finger tauchen, ohne sich zu verbrennen, besonders wenn man ihn mit Wasser oder, noch besser, mit Äther befeuchtet, während man ihn in kochendes Wasser nicht ungestraft tauchen darf. Über soeben gegossenes, noch weißglühendes Eisen soll man mit bloßen Füßen gehen können, ohne sich zu verbrennen. — Eine glühende Kupferkugel, in heißes Wasser gehalten, umgibt sich mit einer Dampfschicht, die in Folge der totalen Reflexion die Kugel silberglänzend erscheinen läßt.

§ 134. **Verflüssigung von Dämpfen und Gasen.** In § 132 ist § 134. nachgewiesen, daß der Wasserdampf, wenn er einen gewissen Grad von Dichtigkeit erreicht hat (gesättigt ist), der weiteren Verdichtung sich entzieht, indem er wieder tropfbarflüßig wird. Ferner geht aus der Tabelle desselben Paragraphen hervor, daß dieser Dichtigkeitsgrad um so kleiner ist, je niedriger die Temperatur ist; folglich muß sich der Wasserdampf auch ohne Zusammendrückung durch Temperaturerniedrigung auf sein Dichtigkeitsmaximum bringen und durch weitere Temperaturerniedrigung tropfbarflüßig machen lassen.

Dasselbe gilt von den Dämpfen aller Flüssigkeiten. Dies Gesetz läßt sich kurz so aussprechen:

Die Dämpfe werden tropfbarflüßig, wenn sie über ihren Sättigungspunkt hinaus zusammengedrückt oder erkaltet werden.

Bei dem Übergang aus dem luftförmigen in den tropfbarflüßigen Zustand verliert der Wasserdampf seine Durchsichtigkeit, er wird zu Nebel, und dieser besteht aus sehr kleinen Flüssigkeitsteilchen; daß er, wie man früher annahm, aus Wasserbläschen besteht, hat sich als unrichtig herausgestellt; daß der Nebel oft lange Zeit in der Luft schwebt, ohne zur Erde zu fallen, rechtfertigt die Annahme von Wasserbläschen nicht; denn auch Staub, der spezifisch schwerer ist als die Luft, hält sich oft sehr lange in ihr schwebend.

Aus Töpfen mit heißem Wasser steigen Dampfwolken auf, die um so dichter erscheinen, je heißer das Wasser und je kälter die Luft ist. In Kochhöfen, in denen Wasser kocht, sieht man in der Regel keinen Wasserdampf, wohl aber sieht man ihn, wenn er in die kältere Luft der Küche strömt. Aus den Fenstern der Waschkücher, der Pferdebeställe u. dgl. steigen im Winter Dampfwolken auf. Ebenso sieht man bei kaltem Wetter den Hauch der Menschen. Er bildet dann am Bart und an der Kleidung Wassertropfen oder Reif. Im Winter beschlagen die Fenster der warmen Stuben. Kalte Gegenstände, in die geheizte Stube gebracht, bedecken sich mit Wassertropfen. Über Wasserflächen und feuchten Wiesen bildet sich des Abends, wenn sich die Luft abkühlt, Nebel.

Gase und Dämpfe sind begrifflich nicht verschieden. Überhitzte Dämpfe befolgen genau so das Boyle'sche Gesetz wie die gewöhnlich als Gase bezeichneten Körper: Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff usw. Je mehr ein Dampf sich dem Kondensationspunkte nähert, um so stärker weicht er von jenem Gesetz ab. Das gilt aber auch für alle Gase. Es hat sich herausgestellt, daß auch die Gase durch Druck sich verflüssigen lassen, wenn man sie unter eine gewisse Temperatur abkühlt. Diese Grenze nennt man die kritische Temperatur, oberhalb derselben ist eine Verflüssigung unmöglich. Andrews (1869) hat für Kohlensäure die kritische Temperatur $+31^{\circ}$ C, Dszewski (1882) für Sauerstoff -119° und für Stickstoff -146° , Wroblewski für Wasserstoff -240° gefunden. Für Wasserdampf beträgt sie 365° .

Die Verflüssigung eines Gases gelang zuerst Faraday (1823). Als er Chlorhydrat in einer dickwandigen, zugeschmolzenen Glasröhre erhitzte, wurde das sich entwickelnde Chlorgas durch eigenen Druck so stark verdichtet, daß es nach erfolgter Abkühlung eine ölige Flüssigkeit bildete. Auch Kohlensäure wurde zuerst von Faraday zu einer wasserhellen Flüssigkeit verflüssigt, doch gelang es erst Thilorier 1835, größere Mengen dieser Flüssigkeit durch Anwendung von Druck und Kälte herzustellen. Seit den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wird flüssige Kohlensäure fabrikmäßig hergestellt und findet gegenwärtig eine ausgedehnte Anwendung bei der Fabrikation künstlicher Mineralwässer, beim Bierauschank, zur Erzeugung künstlicher Kälte usw. In den Handel kommt sie in geschlossenen, nahtlosen Stahlflaschen, die trotz der geringen Wandstärke von nur 5—7 mm doch einen Druck von 400 Atm. aushalten, auf diesen Druck aber nie beansprucht werden, da die Spannkraft der Kohlensäure bei -79° 1 Atm., bei 0° 35 Atm., bei 10° 46 Atm., bei 20° 59 Atm., bei 30° 74 Atm. beträgt. — Läßt man aus der nach unten gefehrten Öffnung einer Kohlensäureflasche den Inhalt ausströmen, so verdunstet die austretende Kohlensäure, und infolge der Verdunstungskälte erstarrt ein Teil der Masse. Den so entstandenen Kohlensäureschnee kann man in einem Leinenbeutel auffangen. Er besitzt eine Temperatur von -79° , gibt aber mit Äther eine Kältemischung bis -110° (Faraday). — 1895 ist es Linde gelungen, in dem Gegenstromapparat Luft durch wiederholte Expansion so stark abzukühlen, daß sie flüssig wird. Flüssige Luft kann nicht in geschlossenen Stahlflaschen versandt werden, da ihre kritische Temperatur -141°

beträgt; sie wird in offenen doppelwandigen Glasflaschen aufbewahrt, deren Wandhohlraum luftleer ist und deren Glaswände versilbert sind. (Dewarsche Flaschen, § 136).

E. Verbreitung der Wärme.

§ 135. **Drei Arten der Wärmeverbreitung.** Befinden sich im § 135. selben Raume Körper verschiedener Temperatur, so lehrt die Erfahrung, daß ein Übergang der Wärme von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niederer Temperatur so lange stattfindet, bis alle Körper gleiche Temperatur besitzen. Diese Wärmeverbreitung kann auf dreierlei Weise stattfinden: durch Leitung, Strömung oder Strahlung.

Eine auf einen Dreifuß gelegte glühende Metallkugel zeigt alle drei Arten der Wärmeverbreitung. Ein Teil der Wärme wird von Teilchen zu Teilchen der umgebenden Körper fortgeleitet, die Kugel erwärmt z. B. den Dreifuß, dieser den Tisch: Wärmeleitung. — Ein anderer Teil der Wärme wird durch Strömung (Konvektion) fortgeführt; die Kugel erwärmt die benachbarten Luftschichten, diese steigen wegen ihres geringeren spezifischen Gewichtes in die Höhe, führen die Wärme mit und geben sie an kältere Luftschichten und an die Wände ab. — Ein dritter Teil der Wärme geht durch Strahlung auf die benachbarten Körper über. Man überzeugt sich hiervon durch das Gefühl oder durch ein in die Nähe gebrachtes Thermometer. Daß diese Wärmestrahlung nicht etwa auf Leitung oder Strömung der Luft zurückzuführen ist, geht daraus hervor, daß ein zwischen Kugel und Thermometer gehaltener Metallschirm die Strahlung verhindert, und daraus, daß die Strahlung auch das Vakuum durchdringt; denn ein unter dem Rezipienten der Luftpumpe befindliches empfindliche Thermometer zeigt die Strahlung an, wie ja auch die Sonnenstrahlen durch den leeren Weltenraum zu uns dringen.

§ 136. **Wärmeleitung und Wärmeströmung.** 1. Von allen § 136. Körpern leiten die festen die Wärme am besten. Aber auch bei ihnen zeigen sich große Unterschiede.

Während wir ein brennendes Streichholz ungefährdet in der Hand halten, ist dies bei einem gleich langen Stahl Nagel, der an einem Ende glüht, nicht mehr möglich. Holz ist also ein schlechter, Eisen ein guter Wärmeleiter. — Ein Stück Metall und ein gleiches Stück Marmor gleicher Temperatur erwecken beim Anfassen verschiedene Wärmeempfindungen, weil das Metall besser leitet als Marmor.

Alle Metalle sind gute Wärmeleiter, Eis, Holz, Glas, Schnee schlechte, Marmor, Quarz und viele andere Mineralien dagegen Halbleiter.

Die Leitungsfähigkeit fester Körper kann gezeigt werden, indem man gleichgeformte und mit einem Anstrich von Jodsilberquecksilber versehene Stäbe dieser Körper an einem Ende gleichzeitig in einem Ölbad erhitzt; auf einem jeden Stabe verändert sich die Farbe des Anstrichs bis zu einer bestimmten Länge, die um so größer ist, je besser der Stab leitet. — Mit

Hilfe des Doppelthermoskops läßt sich die Verschiedenheit des Leitungsvermögens zweier Metallstäbe zeigen, indem man die Stäbe an einem Ende gleich stark erwärmt; die in die Rezeptoren geführten freien Enden erwärmen diese verschieden stark.

Zahlenmäßig wird die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes durch sein **spezifisches Leitungsvermögen** ausgedrückt.

Zwei Behälter seien durch eine große, 1 cm dicke Platte getrennt und dauernd auf den Temperaturen $t_1 < t_2$ gehalten, z. B. durch schmelzenden Schnee und siedendes Wasser auf 0° und 100° . Die Wärme wird durch die Platte geleitet, und allmählich tritt ein stationärer Zustand der Platte ein, d. h. die Temperatur bleibt nicht nur in den Grenzschichten, sondern in jeder Parallelschicht der Platte konstant. Dies bedingt aber, daß durch jede Schicht in gleicher Zeit gleiche Wärmemenge geleitet wird, d. h. das Temperaturgefälle ist in jeder Schicht $\frac{t_2 - t_1}{l}$. Der Versuch zeigt nun, daß durch eine q qem große Platte in τ Sekunden

$$Q = k \cdot q \cdot \tau \cdot \frac{t_2 - t_1}{l} \text{ kal}$$

geleitet werden, wo k eine Konstante ist, die von dem Stoff der Platte abhängt und das spezifische innere Leitungsvermögen der betreffenden Substanz heißt. Dieses gibt also diejenige Anzahl von kal an, die in 1 Sek. durch 1 qem einer 1 cm dicken Platte hindurch geleitet wird, falls die Temperaturdifferenz auf beiden Seiten der Platte 1° beträgt.

Das spezifische Leitungsvermögen beträgt für

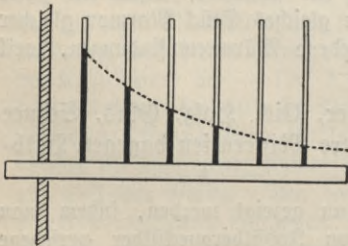
Silber	0,96	Eisen	0,16	Marmor	0,0082
Kupfer	0,94	Blei	0,08	Eis	0,0057
Zink	0,26	Neusilber	0,07	Glas	0,0015.

Diese Tabelle zeigt, daß diejenigen Metalle, die gute Elektrizitätsleiter sind, auch die Wärme gut leiten.

Nur isotrope Körper leiten die Wärme nach allen Richtungen gleich gut, anisotrope im allgemeinen nicht.

Hölzer leiten in der Richtung der Faser besser als quer zur Faser, Bergkristall in der Richtung der Hauptachse besser als senkrecht dazu (5:4).

Fig. 181.



Die obige Formel der Wärmeleitung gilt nur für den Fall, daß der leitende Körper quer zur Wärmeströmung keine Wärme abgibt, wie es in der Mitte der großen Platte zutrifft. Gibt aber ein an einem Ende erwärmter Stab an die Umgebung Wärme ab (äußere Wärmeleitung), so ist, auch wenn die Temperatur in dem Stabe stationär geworden ist, das Temperaturgefälle

nicht mehr konstant; vielmehr nimmt die Temperatur in geometrischer Reihe ab, während die Abstände von der konstanten Wärmequelle in arithmetischer

Reihe wachsen. Nach Desprez läßt sich dieses Gesetz nachweisen, indem man in gleichen Abständen auf dem leitenden Stabe Thermometer anbringt (Fig. 181). — Ist die Temperatur eines einendig erwärmten Stabes noch nicht stationär geworden, so zeigt sich, daß unter Umständen ein weniger gut leitender Stab die Temperatur schneller leitet als ein gut leitender, ein Bleistab schneller als ein Kupferstab. Wodurch ist die große Temperaturleitungsfähigkeit des Bleies bedingt?

2. Werden **Flüssigkeiten** erwärmt, so treten im allgemeinen in ihnen Strömungen auf, die bei tropfbaren Flüssigkeiten durch Beimengung von Sägespänen oder Kohlepulver, bei Gasen durch Beimengung von Rauch sichtbar gemacht werden können und durch die die Erwärmung verhältnismäßig schnell bewirkt wird. Eine in der Mitte des Bodens erwärmte, mit Wasser gefüllte Kochflasche zeigt in der Mitte eine aufsteigende, an den Wandungen eine absteigende Strömung. Werden die Strömungen beim Erwärmen jedoch verhindert, was, wenn auch unvollkommen, beim Erwärmen von oben her erreicht wird, so zeigt sich, daß die tropfbaren Flüssigkeiten schlecht leiten, Gase noch schlechter.

In einem Probierring kann man Wasser von unten her sehr schnell zum Kochen bringen; erhitzt man aber das Wasser oben, so kann es dort siedeln, während auf dem Boden ein Stück mit Draht beschwertes Eis ruht, ohne zu schmelzen. — Wasserstoff leitet besser als Luft, denn ein durch den galvanischen Strom erhitzter Platindraht glüht in Luft eher als in Wasserstoff. Elektrische Glühlampen, die mit verschiedenen Gasen gefüllt sind, leuchten um so dunkler, je besser das Gas die Wärme leitet, desto heißer wird aber die Glaswandung.

Das spezifische Leitungsvermögen beträgt für

Wasser . . .	0,0014	Alkohol . .	0,0005	Luft	0,000056
Glyzerin . .	0,0007	Wasserstoff	0,000319	Kohlensäure	0,000033.

Das geringe Leitungsvermögen der Luft hat zur Folge, daß alle Stoffe, die in Hohlräumen Luft eingeschlossen enthalten, die Wärme schlecht leiten, z. B. Baumwolle, Wolle, Federn, Stroh; ferner alle porösen und pulverisierten Stoffe (Kork, Asche).

Anwendungen: Schlechte Wärmeleiter dienen dazu, Zu- und Ableitung von Wärme zu hindern. Feuerhaken und Teekannen haben hölzerne Griffe. Heiße Töpfe werden mit Lappen angefaßt. Doppeltüren und Doppelfenster halten die Zimmer warm, Strohschichten den Eiskeller kalt. Wollhaar und Flaumfedern schützen die Tiere vor Winterkälte, ebenso wie der Schnee die Saaten, der Wollanzug den Menschen schützt. Der schlechteste Wärmeleiter ist das Vakuum; Anwendung bei Dewarschen Flaschen (§ 134). — Gute Wärmeleiter hindern die örtliche Ansammlung von Wärme. Senkt man ein Drahtnetz von oben bis zur Mitte einer Flamme, so schlägt sie nicht nach oben durch. Läßt man Leuchtgas von unten durch ein Drahtnetz strömen und zündet oben an, so schlägt die Flamme nicht nach unten durch. Bei der Davyschen Sicherheitslampe (1816) ist die Flamme von einem Drahtnetz

umgeben; in einer Grubengas enthaltenden Atmosphäre brennt die Flamme zwar dunkler und gleichzeitig höher, schlägt aber nicht durch das Netz hindurch, falls sie nicht zufällig von einem starken Luftzuge getrieben wird. — Die großartigsten Beispiele der Wärmeverbreitung durch Konvektion bietet uns die Natur in den Luft- und Meeresströmungen. Wir benutzen diese Art der Wärmeverbreitung bei sämtlichen Heizungsanlagen, sowohl der Kaminheizung als auch der Warmwasser-, Dampf- und Luftheizung.

F. Wärmequellen. Äquivalenz von Wärme und Arbeit. Natur der Wärme.

§ 137. § 137. 1. Die Wärmequellen sind entweder natürliche oder künstliche. Von den ersten kommen namentlich die Sonnenwärme und die Erdwärme (§ 143₄) in Betracht, doch ist die Sonne die bei weitem wichtigste Wärmequelle.

Die Größe der Sonnenstrahlung wird durch die Solarkonstante ausgedrückt. Man denke sich an der Grenze der Lufthülle des Erdballs einen Körper, der alle auf ihn fallenden Sonnenstrahlen restlos absorbiert. Da ein mit Ruß bedeckter Körper angenähert diese Bedingung erfüllen würde, so heißt ein solcher Körper ein vollkommen schwarzer Körper. Solarkonstante ist diejenige Anzahl von Grammkalorien, die von einem qm des vollkommen schwarzen Körpers in 1 Minute absorbiert wird, falls die Sonnenstrahlen senkrecht auf die bestrahlte Fläche auffallen. — Wenn auch diese Solarkonstante direkter Messung nicht zugänglich ist, so hat man doch aus Messungen am Erdboden und in verschiedener Höhe über ihm geschlossen, daß die Lufthülle bei Zenitstellung der Sonne etwa den dritten Teil der gesamten Strahlung absorbiert, und daß die Solarkonstante etwa 3 kal/minute beträgt. — Die Temperatur der Sonne wird auf etwa 6500° geschätzt (vgl. § 215).

2. Die praktisch wichtigsten künstlichen Wärmequellen sind die **chemischen** und der **galvanische Strom**.

Verbinden sich zwei chemische Elemente, so geschieht dies unter Entwicklung von Wärme. Seit frühester Zeit ist diese Verbindungswärme bei der Verbrennung (Oxydation) der Brennstoffe künstlich erzeugt worden. Zur Einleitung des Verbrennungsprozesses muß der Brennstoff auf eine bestimmte Temperatur (Entzündungstemperatur) gebracht werden, die für die verschiedenen brennbaren Stoffe verschieden hoch liegt; Phosphorwasserstoff z. B. entzündet sich schon bei Zimmertemperatur, sobald er mit Luft in Berührung kommt. — **Verbrennungswärme** eines Körpers ist diejenige Anzahl von Kal, die bei Verbrennung von 1 kg Substanz erzeugt wird. Die Verbrennungswärme ist unabhängig davon, ob der Körper schnell oder langsam verbrennt, oder ob die vollständige Verbrennung direkt oder durch verschiedene Oxydationsstufen hindurch stattfindet. Rumford bestimmte die Verbrennungswärme verschiedener Brennstoffe, indem er in einem Schlangenvohr die Verbrennungsgase einer abgewogenen Menge Substanz durch ein Kalorimeter streichen ließ und die Temperaturerhöhung im Kalorimeter maß. Sie beträgt für Wasserstoff 34462 Kal, für Holz- und Steinkohlen 7000—8000 Kal,

für 1 cbm Leuchtgas 5200—5600 Kal. — Wieviel kg Wasser von 0° müßte man hiernach theoretisch durch Verbrennung von 1 kg guter Steinkohle verdampfen können? Tatsächlich erreicht man in Dampfkesseln nur eine 5,5- bis 9,5fache Verdampfung.

Auch im tierischen und menschlichen Körper finden Oxydationsvorgänge statt; den hierzu nötigen Kohlenstoff und Wasserstoff liefern die Nahrungstoffe, den Sauerstoff die eingeatmete Luft. Die bei dieser langsamen Verbrennung erzeugte Verbrennungswärme tritt zum Teil als tierische Wärme auf.

Die Blutwärme eines gefunden Menschen beträgt etwa 37,5°, die der Säugetiere 38,2° bis 39,7°, die der Vögel 37,2° bis 43,3°.

3. Von sonstigen künstlichen Wärmequellen sind noch die **mechanischen** (Reibung, Stoß, Druck) von Bedeutung.

Beispiele mechanischer Wärmeerzeugung sind bereits in § 119 angeführt. — Der Ursprung der Reibungswärme wurde zuerst 1798 richtig von Rumford erkannt, indem er zeigte, daß die beim Bohren von Kanonenrohren auftretende Wärme nicht etwa dem Metall entstammte; denn es zeigte sich beim Metall keine Abnahme der Wärmekapazität; da die Wärme auch nicht der Umgebung entnommen sein konnte, so schloß er, daß sie beim Reiben erzeugt, d. h. umgewandelte mechanische Energie sei. Rumfords Reiberversuche können nach Dindalls Vorgang nachgeahmt werden, indem man einen Hohlzylinder aus Metall in lebhafte Rotation versetzt und durch Reiben an zwei Hölzern den Zylinder und die im Hohlraum befindliche Ätherflüssigkeit in kurzer Zeit so stark erhitzt, daß der Äther siedet. — Davy brachte 1799 in einem kalten Raum zwei Eisstücke durch Aneinanderreiben zum Schmelzen. Da Wasser eine größere spez. Wärme als Eis besitzt, so konnte auch hier die zum Schmelzen nötige Wärme nur durch Aufwand mechanischer Energie erzeugt sein.

Gase werden durch Kompression erwärmt (pneumatisches Feuerzeug). Wenn sich umgekehrt ein Gas arbeitsleistend ausdehnt, so tritt Abkühlung ein. Die Rezipientenglocke der Luftpumpe beschlägt bei ausreichender Verdünnung; ist die Luft unter der Glocke sehr feucht, so treten bei jeder Verdünnung Nebel auf, die beim Einströmenlassen von Luft wieder verschwinden. — Soule brachte zwei kupferne Gefäße, von denen das eine komprimierte Luft enthielt, während das andere möglichst luftleer gepumpt war, in ein gemeinsames Kalorimeter. Beide Gefäße waren durch ein Rohr mit Hahn verbunden. Nach Öffnung des Hahnes strömte Luft aus dem ersten ins zweite Gefäß, bis die Druckdifferenz ausgeglichen war. Eine Leistung äußerer Arbeit fand hierbei nicht statt, und das Kalorimeter zeigte keine merkliche Temperaturänderung an. Soule schloß hieraus, daß auch die innere Arbeit bei der Ausdehnung eines Gases Null wäre. Spätere Versuche von Soule und W. Thomson haben bewiesen, daß dieser Schluß nicht genau richtig ist. Bei Luft und den meisten Gasen findet tatsächlich eine geringe Abkühlung auch dann statt, wenn sie sich ohne äußere Arbeitsleistung ausdehnen. Linde hat in seinem Gegenstromapparat (§ 134) diese Abkühlung zur Verflüssigung der Luft benutzt.

4. Da ein sich arbeitsleistend ausdehnendes Gas Wärme verbraucht, so folgt, daß die spezifische Wärme der Gase bei konstantem Druck größer ist als bei konstantem Volumen. (Vgl. § 127.)

Wird 1 kg Gas bei konstantem Druck um t° erwärmt, so sind hierzu $c_p \cdot t$ Kal nötig. Wird jetzt das Gas auf sein Anfangsvolumen komprimiert, so tritt nach obigem eine Temperaturerhöhung von vielleicht τ° ein. $c_p \cdot t$ Kal würden also bei konstantem Volumen das Gas um $(t + \tau)^{\circ}$ erwärmt haben, d. h. es ist $c_p \cdot t = c_v \cdot (t + \tau)$, oder $\frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{\tau}{t}$. — Dieses

Verhältnis $k = \frac{c_p}{c_v}$ der spez. Wärmen ist vielfach gemessen, zuerst 1819 von Clément und Desormes. Neuere Messungen ergeben für Luft $k = 1,4025$, für Sauerstoff $k = 1,3977$, für Wasserstoff $k = 1,4080$, für Kohlendioxyd 1,2995. — Da c_p für die verschiedenen Gase direkt zu messen ist, so kann man hiernach c_v berechnen.

§ 138. § 138. **Mechanisches Wärmeäquivalent.** 1. Wie durch Aufwendung von mechanischer Arbeit Wärme erzeugt werden kann, so kann auch umgekehrt durch Aufwendung von Wärme mechanische Arbeit erzeugt werden, z. B. in den Dampfmaschinen. So oft aber mechanische Arbeit Wärme erzeugt, ist stets eine und dieselbe Arbeitsgröße nötig, um eine Wärmeeinheit hervorzubringen. Und umgekehrt: so oft durch Wärme mechanische Arbeit geleistet wird, verschwindet ein bestimmter Teil der Wärme, und zwar 1 Kal auf 427 kgm Arbeit. Die Arbeit, die 1 Kal hervorbringen kann, heißt ihr äquivalent, oder das mechanische Äquivalent, auch Arbeitsäquivalent der Wärmeeinheit. Dieses beträgt also $J = 427$ kgm. Umgekehrt liefern $A = \frac{1}{427} = 0,0024$ Kal die Arbeit von 1 kgm. Diese Zahl A heißt das kalorische oder Wärmeäquivalent der Arbeitseinheit.

Julius Robert Mayer, Arzt in Heilbronn, hat zuerst (1842) die Äquivalenz von Arbeit und Wärme erkannt und auf Grund der unten wiedergegebenen Betrachtung das Arbeitsäquivalent bestimmt, allerdings nur angenähert, da zu seiner Zeit die spez. Wärmen der Luft nicht genau bekannt waren. Die ersten genaueren Werte für J ergaben sich aus den seit 1843 angestellten Versuchen von Joule. Seit dieser Zeit sind zahlreiche Messungen nach verschiedenen Methoden angestellt, die für J gut übereinstimmende Werte ergaben, im Mittel 427, so daß an der Richtigkeit des oben ausgesprochenen Gesetzes nicht zu zweifeln ist.

2. Mayer's Überlegung war folgende:

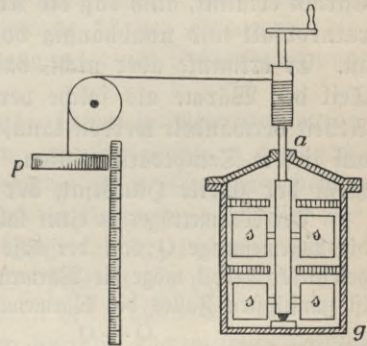
Ein cbm Luft von atmosphärischer Spannung und 0° Temperatur muß bei ungeändertem Rauminhalte bis auf 273° erwärmt werden, wenn die Spannung auf 2 Atm. steigen soll. Dazu sind, da das Gewicht der Luft 1,293 kg und $c_v = 0,1693$ ist, $273 \cdot 1,293 \cdot 0,1693 = 59,8$ Kal nötig. — Befindet sich aber die Luft in einem Zylinder, der durch einen beweglichen Kolben geschlossen ist, so daß sie sich bei der Erwärmung ausdehnen kann,

so wächst bei einer Temperaturerhöhung um 273° ihr Volumen von 1 bis auf 2 cbm. Ist nun der Querschnitt des Zylinders 1 qm, so daß der Kolben 1 m hoch gehoben ist, so hat die eingeschlossene Luft eine mechanische Arbeit verrichtet, indem sie den atmosphärischen Druck, der auf 1 qm 10333 kg beträgt, auf eine Meterlänge überwunden hat, also eine Arbeit von 10333 kgm. Hierbei sind, da $c_p = 0,2375$ ist, $273 \cdot 1,293 \cdot 0,2375 = 83,8$ Kal aufgewendet, das sind 24 Kal mehr als im ersten Falle. Wenn diese 24 Wärmeeinheiten also die mechanische Arbeit von 10333 kgm verrichtet haben, so hat eine Wärmeeinheit $\frac{10333}{24} = 430$ kgm hervorgebracht.

3. Das Verfahren Joules bestand bei sämtlichen Versuchen darin, daß er einerseits die aufgewandte Arbeit, andererseits die erzeugte Wärmemenge maß. Eine seiner Versuchsanordnungen ist folgende.

Fig. 182.

In ein zylindrisches Gefäß *g* (Fig. 182), das mit Wasser oder Quecksilber gefüllt ist, führt eine Drehachse *a*, an der Schaufeln *s* befestigt sind. Werden diese durch Fallenlassen des Gewichtes *p* in Umdrehung versetzt, so wird die Flüssigkeit durch Reibung erwärmt. Die aufgewandte Arbeit ergibt sich aus dem Produkte des Gewichts und der Fallhöhe. Die erzeugte Reibungswärme läßt sich mit Hilfe eines Thermometers messen. Bei Berücksichtigung nötiger Korrekturen fand Joule $J = 425$ kgm.



4. In § 40 wurde die Energie als die Fähigkeit, Arbeit zu leisten, definiert. Die Erkenntnis, daß Wärme in Arbeit, Arbeit in Wärme verwandelbar ist, zwingt zu der Anschauung, daß Wärme eine Form der Energie, kalorische Energie ist. Eine Wärmelehre auf Grund dieser Anschauung heißt mechanische Wärmetheorie. — Für die mechanischen Vorgänge gilt der Satz, daß sie sämtlich Übergänge einer Energieform in eine andere sind. Es lag nahe, diesen Satz auf sämtliche Energieformen zu erweitern. Diesen Schritt tat Mayer 1842, indem er das Gesetz der Erhaltung der Energie aussprach: **Alle Naturvorgänge sind Umwandlungen einer Energieform in eine andere** (besser begründet von Helmholtz 1847). Soweit kalorische Energie in Betracht kam, erbrachte er den Beweis durch Nachweis des Satzes von der **Äquivalenz von Wärme und Arbeit**; dieser Satz heißt **der erste Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie**.

Die Energien auf der Erdoberfläche sind fast ausnahmslos umgewandelte Sonnenwärme. Als bewegende Kräfte kommen namentlich Wind, Wasserkraft, Dampfkraft und die Muskelkraft von Menschen und Tieren in Betracht. Die Winde haben ihren Ursprung in der ungleichen Erwärmung der Erde

durch die Sonne. Das Wasser wird durch die absorbierte Sonnenwärme wieder verdampft, gehoben, so daß es beim Fall von neuem Arbeit leisten kann. Die durch die Verbrennung der Kohle erzeugte Kohlensäure wird durch die absorbierte Sonnenwärme beim Assimilationsprozeß der Pflanzen wieder in Kohlenstoff und Sauerstoff gespalten; der Kohlenstoff der Pflanzen kann bei der Verbrennung neue Arbeit leisten, sei es, daß Menschen und Tiere ihn als Bestandteil der Nahrung zu sich nehmen und seine Verbrennungswärme zum Teil als Körperwärme, zum Teil als Muskelarbeit zur Erscheinung kommt, sei es, daß dieser Kohlenstoff nach vieltausendjähriger Lagerung in den Kohlengruben zutage gefördert wird und nun die ehemals absorbierte Sonnenwärme zur Heizung oder zum Betriebe unserer Kraftmaschinen wieder abgibt.

5. Die Tatsache, daß Wärme nur dann Arbeit leistet, wenn sie von höherer Temperatur auf eine niedere herabsinkt, wurde 1824 von Carnot erkannt, auch daß die Arbeitsleistung proportional dem Temperaturabfall und unabhängig vom Stoff des wärmeführenden Körpers ist. Er erkannte aber nicht, daß ein der Arbeitsleistung äquivalenter Teil der Wärme als solche verschwindet. Damit aber dieser Teil in Arbeit verwandelt werden kann, muß eben der andere Teil von höherer auf tiefere Temperatur sinken. Der so richtiggestellte Carnotsche Satz heißt **der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie**.

Der Wärmeträger in einer kalorischen Maschine (s. z. B. Fig. 185) habe die Wärmemenge Q von der absoluten Temperatur T^0 aufgenommen; nach geleisteter Arbeit möge die Wärmemenge Q_1 bei T_1^0 abgegeben werden. Dann ist günstigsten Falles die Wärmemenge $(Q - Q_1)$ in Arbeit verwandelt, also der Bruchteil $\eta = \frac{Q - Q_1}{Q}$ der Gesamtwärme. Dieser Bruchteil η heißt der thermische Wirkungsgrad der Maschine. Es läßt sich erweisen, daß $\eta = \frac{T - T_1}{T}$ ist.

§ 139. § 139. **Ansichten über die Natur der Wärme.** Von jeher haben sich über die Natur der Wärme zwei Ansichten gegenübergestellt, die stoffliche Theorie und die kinetische. Nach jener sollte die Wärme ein feiner, unwägbarer Stoff sein, der zwar von Körper zu Körper übertragen, aber nicht von neuem erzeugt werden könne, nach dieser ein Zustand der Materie, und zwar ein Bewegungszustand der kleinsten Teile, der Molekeln.

Auch die kinetische Theorie hat zu allen Zeiten Anhänger gefunden, zu denen z. B. Boyle, in gewissem Sinne auch Newton zu rechnen ist. Erst im 18. Jahrhundert erlangte unter dem Einflusse der Wärmemengenmessung bei Bestimmung der spezifischen und latenten Wärme (Wille, Black) die stoffliche Theorie das Übergewicht. Sie stürzte, als es gelang nachzuweisen, daß durch Arbeit Wärme erzeugt werden könne (Rumford, Davy, § 137₃), und seit Mitte des 19. Jahrhunderts erwarb sich die kinetische Theorie, vor allem getragen durch die Entdeckungen über Wärmestrahlung und das Gesetz der Erhaltung der Energie, immer mehr Anerkennung.

Warme Körper senden Wärmestrahlen aus, die sich vollkommen wie Lichtstrahlen verhalten, also in Schwingungen des Äthers bestehen. Umgekehrt erzeugen Wärmestrahlen bei ihrer Absorption Körperwärme. Diese Tatsache und die gegenseitige Verwandbarkeit von mechanischer Energie und Wärme drängen darauf hin, die Wärme als eine Art der Bewegung, und zwar als einen Bewegungszustand der Molekeln anzusehen. Sind die Molekeln in Ruhe, so hat der Körper die absolute Temperatur Null (-273°). Seine absolute Temperatur ist der lebendigen Kraft seiner Molekeln proportional. Am vollkommensten ist diese Theorie für die Gase ausgebaut (Clausius, 1857). Vgl. § 66.

G. Wärmekraftmaschinen.

§ 140. Die Dampfmaschine. In der Dampfmaschine wird die § 140. Verbrennungswärme der Kohle in mechanische Energie umgesetzt, und zwar so, daß durch die Verbrennungswärme Wasser verdampft, die Spannkraft des Dampfes aber zur Erzeugung einer Kolbenbewegung in einem Zylinder benutzt wird.

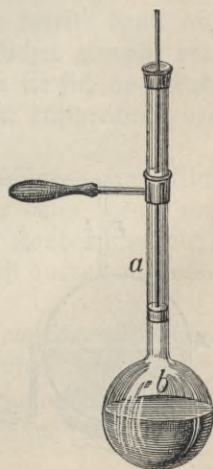
1. Die Dampfmaschine vor Watt. Schon im Altertum wurde die Spannkraft des Dampfes benutzt, um eine Bewegung zu erzeugen. So setzte bei der von Hero von Alexandrien (100 n. Chr.) erfundenen Kollipile ausströmender Wasserdampf diese in Umdrehung, ähnlich wie ausströmendes Wasser das Segnersche Wasserrad in Umdrehung versetzt. Doch erst mit Papin (1647—1712) beginnt die eigentliche Geschichte der Dampfmaschine. Er hatte zuerst den fruchtbaren Gedanken, eine Kolbenbewegung in einem hohlen Zylinder vermittelt Dampf hervorzurufen. Das Prinzip seiner Maschine läßt sich durch einen einfachen Versuch auseinandersetzen.

In dem langen Halse a eines Glasgefäßes b (Fig. 183) kann ein gut schließender Kolben auf und ab bewegt werden. Hält man das zum Teil mit Wasser gefüllte Gefäß b über eine Flamme, so treiben die sich entwickelnden Dämpfe den Kolben in die Höhe. Taucht man b hierauf in kaltes Wasser, so verdichten sich die Dämpfe, es entsteht unter dem Kolben ein luftverdünnter Raum, und der Atmosphärendruck bewegt den Kolben nach unten.

Die Papinsche Maschine wurde in vervollkommneter Gestalt von Newkomen seit 1705 zum Betrieb von Pumpen in Bergwerken verwendet.

Der im Dampfessel m erzeugte Wasserdampf (Fig. 184) trat bei Öffnung des Hahnes a unter den Kolben. Dieser stand durch Slange und Kette mit dem Balancier w in Verbindung, der auf der anderen Seite das Pumpengefänge nebst dem Gewicht f trug. Beim Eintritt des Dampfes zog f den Kolben nach oben.

Fig. 183.



durch das Rohr R_1 mit A, durch r_1 mit a verbunden; die Röhre R_2 und r_2 stellen die Verbindung von A und a mit dem unteren Zylinderraum her. Be-
 findet sich der Kolben in seiner tiefsten Stellung, so werden die Hähne H_2 und h_1
 geöffnet, H_1 und h_2 sind geschlossen. Der durch R_2 einströmende Dampf treibt
 dann den Kolben empor, während der von dem vorhergehenden Hub über dem
 Kolben befindliche Dampf durch r_1 nach a entweicht und sich dort zum Teil
 kondensiert. Sobald der Kolben seine höchste Stellung erreicht hat, werden die
 Hähne H_2 und h_1 geschlossen, H_1 und h_2 geöffnet. Der nun durch R_1 einströmende
 Dampf wirkt auf die obere Fläche des Kolbens und drückt ihn nach unten,
 der verbrauchte Dampf fließt über r_2 nach a ab usw. Die Pumpe P schafft
 das Wasser, das sich im Kondensator aus dem Abdampf bildet, in den Dampf-
 kessel zurück, so daß die konstante Wassermenge, mit der die Maschine arbeitet,
 einen Kreislauf von Veränderungen erfährt. Bezeichnet Q die bei der Ver-
 dampung im Kessel aufgenommene Wärmemenge, Q_1 die an den Kondensator
 abgegebene, so ist bei einer idealen Maschine die in mechanische Arbeit um-
 gesetzte Wärmemenge $Q - Q_1$ (§ 138₅).

3. Die neuere Dampfmaschine. Prinzipiell hat man an der
 Watt'schen Kolbenmaschine in der langen Zeit, die seit ihrer Erfindung
 verstrichen ist, nichts Wesentliches verbessern können. Dagegen hat man
 in der Art und Weise der Ausführung sehr bedeutende Fortschritte
 gemacht und besonders eine große Vereinfachung des Bewegungs-
 mechanismus erzielt. Auch in der Herstellung leistungsfähiger Dampf-
 kessel ist man wesentlich weiter gekommen als zu Watt's Zeiten, wo man
 nur Dampfspannungen von höchstens 2 Atm. benutzen konnte. Des-
 halb mußte Watt seine Maschinen mit Volldruck arbeiten lassen, d. h.
 es mußte auf dem ganzen Kolbenwege Dampf zugeführt werden. Die
 neueren Maschinen arbeiten mit Dampfspannungen im Kessel von
 5—18 Atm. Hier Volldruck anzuwenden, wäre sehr unvorteilhaft,
 da man bei der erfolgenden Kondensation des hochgespannten Dampfes
 seine noch vorhandene Arbeitsfähigkeit nicht ausnutzen würde. Des-
 halb sperrt man den Dampfzufluß zum Zylinder bereits dann ab,
 wenn der Kolben erst einen Teil, z. B. $\frac{1}{4}$, seines Weges gemacht hat.
 Die abgeschlossene Dampfmenge schiebt dann, indem sie sich ausdehnt,
 den Kolben bis ans Ende, wobei ihre Temperatur, entsprechend der
 geleisteten Arbeit, sinkt (Expansionsmaschinen).

Der Abdampf wird auch bei den neueren Maschinen, namentlich
 den großen, nach einem Kondensator geführt. Nur dann, wenn aus
 äußeren Gründen, z. B. wegen Raummangels, ein Kondensator nicht
 anwendbar ist, läßt man den Dampf in die freie Luft austreten (Loko-
 motive, Lokomobile).

In Fig. 186 ist das Schema einer neueren Dampfmaschine mit liegen-
 dem Zylinder und Drosselregulierung (§ 47b) im Aufsriß gezeichnet.

Fig. 187 zeigt im Grundriß den von Watt erfundenen Muschel-
 schieber, der noch jetzt vielfach zur richtigen Verteilung der Dampf-
 zufuhr angewendet wird.

Beträgt in einer Kondensationsmaschine der Dampfdruck durchschnittlich $4\frac{1}{2}$ Atm., der Kolbenquerschnitt 1 qdm, die Hubhöhe 0,5 m, die Umdrehungszahl 60 in der Minute, so ergibt sich bei Annahme eines Kondensatordrucks von $\frac{1}{2}$ Atm. die indizierte Leistung von 5,5 PS_i. Die effektive Leistung beträgt aber erfahrungsgemäß nur etwa 0,65 bis 0,90 der indizierten, so daß sich eine effektive Leistung von vielleicht 4 PS_e ergibt. Das Verhältnis $\eta_m = \text{PS}_e : \text{PS}_i$ heißt der mechanische Wirkungsgrad der betreffenden Maschine.

Der wirtschaftliche Wirkungsgrad η_w einer Wärmekraftmaschine ist das Verhältnis des Wärmewertes der effektiv geleisteten Arbeit zur gesamten aufgewendeten Verbrennungswärme.

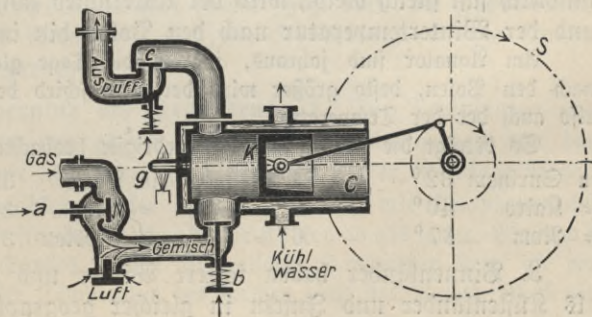
Wird die Verbrennungswärme der Kohle zu 7500 Kal angenommen, so müßten 0,084 kg Kohle hinreichen, um eine Stunde lang den Effekt einer PS hervorzubringen. Erfahrungsgemäß verbrauchen große Dampfmaschinen zu diesem Zweck 0,6 kg, kleine bis zu 5 kg Kohle. Hieraus ergeben sich für Dampfmaschinen für η_w die Werte 0,14 bis 0,017, d. h. nur etwa 2% bis 14% der Verbrennungswärme der Kohle kommen als effektive Leistung zur Ausnutzung.

Aus der Erklärung des thermischen Wirkungsgrades (§ 138₇₅) und dem Vorhergehenden folgt $\eta_w = \eta_t \cdot \eta_m$. Da η_m zwischen 0,65 und 0,90 schwankt, so ist der geringe wirtschaftliche Wirkungsgrad der Dampfmaschine auf ihren geringen thermischen zurückzuführen. — Zwar beträgt unter dem Dampfessel die Temperatur vielleicht 1200°—1500°; da aber Wasserdampf als Wärmeträger benutzt wird, so beginnt die Wärmeausnutzung bei viel tieferer Temperatur, bei 10 Atm. z. B. bei 180°, und wegen des hierdurch bedingten geringen Temperaturgefälles der geringe thermische Wirkungsgrad der Dampfmaschinen. Eine bessere Wärmeausnutzung ist neuerdings in den Verbrennungskraftmaschinen erreicht worden.

§ 141. In den **Verbrennungskraftmaschinen** wird die Kraft ver- § 141.
puffender Gasgemische, z. B. eines Gemisches von Leuchtgas und Luft, zur Bewegung des Kolbens benutzt. Vorgänger haben die Gasmotoren in Lenoir's Gasmaschine (1860) und in der atmosphärischen Gasmaschine von Otto und Langen (1867). Die heutigen Gasmotoren sind Abarten der Ottoschen Maschine aus dem Jahre 1878. Ihre Wirkungsweise ist folgende.

In einem mit Kühlmantel umgebenen Zylinder C (Fig. 189) wird durch Vorwärtsbewegung des Kolbens K und dadurch, daß die Steuerung das Gasventil a und das Gemischeinlaßventil b öffnet, ein Gemisch von brenn-

Fig. 189.



barem Gas und Luft in den Zylinder gesogen (Ansaugabschnitt). Während der Rückwärtsbewegung des Kolbens ist das Ventil b geschlossen, und das Gasgemisch wird in dem hinteren Teil des Zylinders, dem Verbrennungsraum, verdichtet (Verdichtungsabschnitt). Jetzt wird im Verbrennungsraum durch einen elektrischen Zünder oder ein Glührohr g das Gemisch zur Explosion gebracht; infolgedessen wird der Kolben nach vorwärts gestoßen (Arbeitsabschnitt). Kurz vor Beendigung des Arbeitshubes öffnet die Steuerung das Auslassventil c, und beim Rückgange des Kolbens werden die Verbrennungsgase ausgestoßen (Auspuffabschnitt). Ist der Kolben wieder in seiner inneren Totlage angelangt, so wird c geschlossen, a und b werden geöffnet, und das Spiel beginnt von neuem. — Insofern die Maschine nur bei jedem vierten Hube oder Takte Arbeit leistet, heißt sie Viertaktmaschine. Die hin und her gehende Bewegung des Kolbens wird auch hier durch den Kurbeltrieb in eine umlaufende verwandelt, doch wird eine besondere Geradföhrung dadurch entbehrlich, daß man dem Kolben die nötige Länge gibt. Der durch den Viertakt bedingte unregelmäßige Gang der Maschine wird durch Anbringung eines schweren Schwungrades S vermieden. — Als Brennstoffe kommen neben dem Leuchtgas besonders bei größeren Motoren Kraftgas (Dowfongas) und die Gichtgase der Hochoföfen zur Verwendung, überdies aber auch vergaste flüssige Brennstoffe (Benzin, Petroleum, Spiritus). — Von den beschriebenen Gasmotoren unterscheidet sich der Dieselmotor dadurch, daß hier während des Verdichtungsabschnitts nur Luft verdichtet wird, und zwar weit stärker als bei den Gasmotoren das Gasgemisch; in die verdichtete und durch die Verdichtung stark erhitzte Luft wird der Brennstoff in fein verteiltem Zustande eingesprözt; er entzündet sich dann von selbst, und der Kolben wird vorwärts gestoßen.

II. Meteorologische Erscheinungen.

§ 142.

§ 142. Wärme auf der Erdoberfläche. 1. Die Temperatur der Oberfläche der Erde nimmt im allgemeinen vom Äquator nach den Polen hin ab.

Jede Fläche am Äquator erhält mehr Sonnenstrahlen als eine gleich große in der Nähe der Pole, und außerdem haben diese am Äquator eine geringere Luftmasse zu durchdringen als an den Polen.

2. Während unter dem Äquator die Temperatur das ganze Jahr hindurch fast gleich bleibt, wird der Unterschied zwischen der Sommer- und der Wintertemperatur nach den Polen hin immer größer.

Am Äquator sind jahraus, jahrein die Tage gleich lang; je weiter nach den Polen, desto größer wird der Unterschied der Tageslängen und also auch der der Temperatur.

So beträgt die höchste und die niedrigste beobachtete Temperatur

in Surinam	32°	+ 21° C	in Paris	39°	— 22° C
= Kairo	40°	+ 9° =	= Prag	35°	— 27° =
= Rom	37°	— 6° =	= Moskau	31°	— 39° =

3. Binnenländer haben kältere Winter und wärmere Sommer als Küstenländer und Inseln in gleicher geographischer Breite.

Im Winter kühlt sich das Meer langsamer ab als das Land, weil 1) die erkalteten Schichten nach unten sinken und wärmere an ihre Stelle treten; 2) bei der Verdichtung der aufsteigenden Wasserdünste Wärme frei wird und 3) die Meere der kalten Gegenden Zufluß aus den wärmeren Meeren erhalten. Im nordöstlichen Irland gefriert im Winter selten das Wasser; daher gedeiht die Myrte dort so kräftig wie in Portugal; auf den Küsten von Devonshire überwintert die *Camellia japonica* im Freien. Im Sommer erwärmt sich das Meer langsamer als das Land, weil das Meer ein schlechter Wärmeleiter ist, und weil durch das Verdunsten des Wassers Wärme verbraucht wird; endlich erhält auch das wärmere Meer Zufluß aus dem kälteren.

4. Wälder und Gebirge machen das Klima eines Ortes rauher.

Die Bäume halten die Sonnenstrahlen vom Boden ab, und sie selbst werden nicht sehr erwärmt, weil sich ihre Blätter durch Entwicklung von Gas und Dunst kühl halten. Die Berge werfen Schatten.

5. Ein und derselbe Ort hat die größte Tageswärme einige Stunden (2—3) nach Mittag und die niedrigste kurz vor Sonnenaufgang, die größte Jahreswärme erst nach dem höchsten Sonnenstande (unsere Gegenden im Juli), die geringste erst nach dem niedrigsten Sonnenstande (im Januar).

Die Temperatur steigt, solange der Ort mehr Wärme von der Sonne erhält, als er ausstrahlt, und fällt, sobald das Umgekehrte eintritt. Obwohl die Sonne 4 Stunden vor Mittag dieselbe Höhe über dem Horizonte hat wie 4 Stunden nach Mittag, also dem Orte zu beiden Zeiten gleich viel Wärme zustrahlt, nimmt doch die Wärme zur erstgenannten Zeit zu, zur anderen ab, weil zu dieser Zeit der Ort wärmer ist und daher mehr Wärme gegen den Himmelsraum ausstrahlt als zu jener.

Zur Bestimmung des Klimas eines Ortes beobachtet man morgens, mittags und abends um 7, 2, 9^h die Lufttemperatur und nennt das arithmetische Mittel dieser 3 Thermometerstände die mittlere Tages-temperatur, das arithmetische Mittel aus den mittleren Tages-temperaturen eines Monats oder eines Jahres heißt die mittlere Monats- oder Jahrestemperatur. Daraus ergeben sich dann die Isothermen, das sind Linien auf den Landkarten, deren Punkte alle dieselbe mittlere Jahrestemperatur haben (Fig. 190), die Isothermen, die Linien gleicher Sommer-, und die Isochimenen, die Linien gleicher Wintertemperatur.

§ 143. **Temperatur des Erdbodens.** 1. Die Temperatur des § 143. Erdbodens hängt in den oberen Schichten im allgemeinen von der Temperatur der Luft ab; dabei wird aber ein kahler, steiniger Boden durch die Sonnenstrahlen stärker erwärmt als ein mit Pflanzenwuchs bedeckter; auch kühlt sich des Nachts dieser stärker ab als jener. Warum?

Die Hitze des Sandes in den afrikanischen Sandwüsten steigt oft bis auf 50—60°. — Die Temperatur des Grases sinkt des Nachts oft 6 bis 10° unter die der Luft (wegen der stärkeren Ausstrahlung und Verdunstung).

2. Die Veränderungen in der Temperatur der Luft werden in dem Boden mit zunehmender Tiefe immer unmerklicher, z. B. in Deutschland sind die täglichen Temperaturveränderungen schon in einer Tiefe von 0,6 Metern unmerklich, in einer Tiefe von 20—24 Metern verschwinden auch die jährlichen, so daß hier die Temperatur jahraus, jahrein unverändert bleibt.

Schon in unseren Kellern ist der Temperaturunterschied des Sommers und Winters geringer als auf der Oberfläche.

3. Die Tiefe, in der die Temperatur sich nicht ändert, hängt von der Leitungsfähigkeit des Bodens und von dem Temperaturunterschiede der heißesten und kältesten Jahreszeit ab.

Die Tiefe, wo die Temperatur konstant ist, wird daher vom Äquator nach den Polen zu immer größer. In dem Keller des Observatoriums zu Paris hat sich seit 1671 die Temperatur nicht verändert.

4. Von da ab, wo die Temperatur konstant ist, steigt sie mit zunehmender Tiefe, und zwar ungefähr auf je 35 Meter um 1° C.

In der 1271 m tiefen Bohrung bei Sperenberg in der Mark wurde bei 1158 m eine Temperatur von $46,9^{\circ}$ C, in dem 1748 m tiefen Bohrloch zu Schladebach bei Merseburg in 1716 m Tiefe $56,6^{\circ}$ C gemessen. Die Temperatur stieg um je 1° C in Sperenberg bei 33,7 m, in Schladebach bei 36,9 m Tiefenzunahme. Nähme die Temperatur in demselben Verhältnisse, wie in Schladebach, weiter zu, so müßte in einer Tiefe von etwa 8,5 geographischen Meilen eine Temperatur von 2000° C herrschen.

§ 144. **Temperatur der Gewässer.** 1. Die Temperatur der oberen § 144. Wasserschichten in den Landseen ist großen Veränderungen unterworfen. Während z. B. die Schweizer Seen an ihrer Oberfläche im Sommer eine Temperatur von 20 — 25° C erreichen, gefrieren sie im Winter. Nach unten zu nimmt die Temperatur im Sommer ab, in großen Tiefen beträgt sie nur 5° C.

Soll im Winter die Oberfläche gefrieren, so muß erst die ganze Wassermasse bis auf 4° C abgekühlt sein, bei welcher Temperatur das Wasser seine größte Dichtigkeit besitzt.

Sobald im Winter die obersten Schichten erkalten, sinken sie unter, und wärmere treten an ihre Stelle, bis die ganze Masse auf 4° C abgekühlt ist; dann sinken die noch kühler werdenden obersten Schichten nicht mehr unter; ihre Temperatur sinkt bis auf 0° , und nun bildet sich eine Eisdecke. — Daher frieren seichte Gewässer eher zu als tiefe. — Jedes Wasser bedeckt sich zuerst an den seichten Stellen mit Eis. — Hätte das Wasser kein Dichtigkeits-Maximum, so würden die meisten Gewässer bis auf den Grund gefrieren. Wenn bald, nachdem sich eine dünne Eisdecke gebildet hat, Schnee fällt, taut erstere bei tiefen Gewässern gewöhnlich wieder auf. Warum?

2. In den Flüssen erkaltet die ganze Wassermasse gleichmäßig bis 0° , weil sie durch ihre Bewegung immer gemengt wird; dann zeigt sich auf der Oberfläche das sogenannte Treibeis oder Grundeis, das sind Eismassen, die größtenteils aus zusammengefrorenen dünnen Eisplättchen bestehen, mit dem Strome fortzutreiben und an Menge zunehmen, bis die ganze Oberfläche des Flusses damit bedeckt ist. Nun frieren sie zusammen und bilden eine feste Eisdecke. Diese Eismassen bilden sich teils auf dem Grunde des Flußbettes, teils auf der Oberfläche des Wassers. Auf dieser entstehen nämlich, wie in ruhenden Gewässern, die ersten Eiskristalle, die aber alsbald vom Strome fortgeführt werden und sich schwimmend zu dünnen Eisplatten erweitern. Diese Eisplatten schieben sich bei der an verschiedenen Stellen ungleichen Strömungsgeschwindigkeit übereinander und zerbrechen dadurch in Stücke, die zu unregelmäßigen Massen zusammenfrieren. Diese Entstehungsweise ist namentlich dann leicht zu beobachten, wenn die Lufttemperatur eine sehr niedrige, etwa $8-10^{\circ}$ unter Null ist.

Außerdem überzieht sich auch der Grund des Flußbettes mit Eis, wie man sich an seichten Stellen leicht überzeugen kann. Wenn man einen Stein oder einen anderen Körper an einer Schnur auf den Grund versenkt, so ist er nach einiger Zeit mit einer Eisglasur überzogen, die Schnur aber mit Eiskristallen besetzt, die denen des Kandiszuckers ähnlich sind. Hat diese auf dem Grunde entstehende Eisdecke eine gewisse Dicke erreicht, so löst sie sich, weil sie spezifisch leichter ist als das Wasser, stückweise vom Boden los und steigt an die Oberfläche. Sobald sich auf der Oberfläche des Flusses durch Zusammenfrieren des Treibeises eine feste Decke gebildet hat, hört die Eisbildung auf dem Grunde auf, und das dort vorhandene Eis schmilzt wieder.

3. In den Meeren der Tropen nimmt die Temperatur nach unten hin ab, in den Polarmeeren zu. In der Tiefe der Tropenmeere hat man eine Temperatur von fast 0° C gefunden, wahrscheinlich infolge einer unteren Strömung aus den Polargegenden nach dem Äquator zu und einer umgekehrten in den oberen Schichten.

§ 145. § 145. 1. **Temperatur der Atmosphäre.** Unmittelbar über dem von der Sonne beschienenen Boden ist die Lufttemperatur am höchsten; von da nimmt sie mit zunehmender Höhe ab, ungefähr auf 220 bis 250 Meter um einen Grad, so daß unter allen Breitengraden auf den hohen Gebirgen eine so niedere Temperatur herrscht, daß dort das ganze Jahr hindurch der Schnee liegen bleibt (Schneegrenze).

Die Luft absorbiert nur wenig Wärmestrahlen; sie erhält ihre Wärme meist von dem erwärmten Boden durch Mittheilung, und wenn die erwärmte Luft aufsteigt, so dehnt sie sich aus und kühlt sich darum ab. Auf schmalen Berggrücken oder spitzen Berggipfeln ist die Temperatur niedriger als auf

gleich hohen Plateaus. — Die Schneegrenze hat in Amerika unter dem Äquator ungefähr eine Höhe von 4700 Metern, in den Pyrenäen ($42\frac{1}{2}$ — 43° n. Br.) eine Höhe von 2700, im Innern Norwegens (60 — 62° n. Br.) 1570 m.

2. Entstehung des Windes. Wird die Luftsäule über einem Orte A erwärmt, so würde, wenn sie über A bliebe, trotz der Ausdehnung der Luftdruck in A nicht geändert. Jedes Luftteilchen nähme gewissermaßen seinen Druck mit nach oben. Dadurch würde aber in der Höhe über A der Druck größer als in gleicher Höhe über den nicht erwärmten Nachbarorten B. Die erwärmte Luftsäule über A fließt also in der Höhe nach B hin ab. Dadurch entsteht in B ein Überdruck, und unten fließt die Luft von B nach A hin. Es entsteht also ein Kreislauf: Aufsteigen in A, Abfließen in der Höhe nach B, Sinken nach B und Abfluß unten von B nach A.

Wenn die Erde sich nicht drehen würde, so ginge die Luftströmung in gerader Linie von einem Orte höheren Druckes nach einem Orte niederen Druckes. Durch die Drehung der Erde aber wird jede Bewegung auf ihrer Oberfläche — nach den Gesetzen des Foucaultschen Pendels — abgelenkt. Die vom Äquator her kommende Luft hat eine größere Drehungsgeschwindigkeit nach Osten als die von ihr berührten Orte. Wenn sie also an und für sich auf der nördlichen Halbkugel nach Norden und auf der südlichen Halbkugel nach Süden gerichtet wäre, so nimmt sie infolge der Erddrehung eine Richtung nach Nordost bzw. Südost an, sie wird also auf der nördlichen Halbkugel nach rechts und auf der südlichen Halbkugel nach links abgelenkt. Eine nach dem Äquator hin gehende Strömung bleibt gegen die nach Osten gerichtete Erddrehung zurück, wird also nach Westen hin abgelenkt, d. h. wieder nach rechts auf der nördlichen und nach links auf der südlichen Halbkugel.

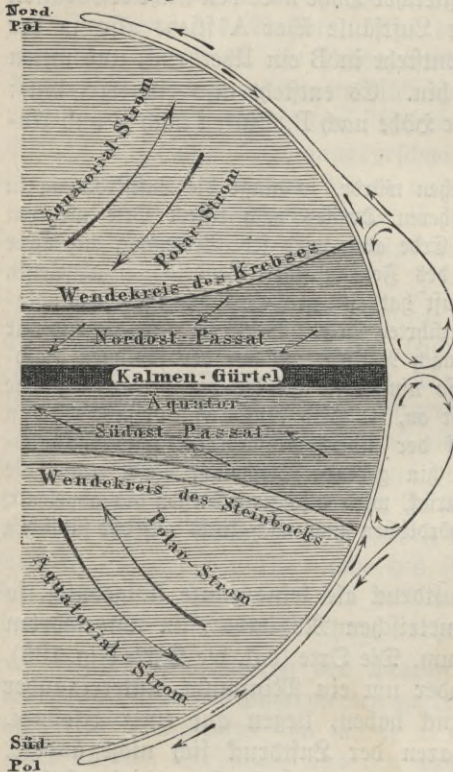
Hat ein Ort A höheren Luftdruck als seine ganze Umgebung, so befindet er sich in einem barometrischen Maximum, im umgekehrten Falle im barometrischen Minimum. Die Orte (vgl. die Karte Fig. 192), die rings um ein Maximum oder um ein Minimum, untereinander verglichen, gleich hohen Luftdruck haben, liegen auf einer Isobare. Während also längs der Isobaren der Luftdruck sich nicht ändert, ändert er sich am meisten in Richtungen, die senkrecht zu diesen stehen. Man nennt Gradienten die zu den Isobaren senkrechten Richtungen, in denen der Luftdruck abnimmt, und Größe eines Gradienten ist die Zahl der mm, um die der Luftdruck auf 15 Meilen des Gradienten abnimmt (0,2 mm Windstille, 1 mm schwacher Wind, 4 mm starker Wind, 7 mm Sturm). Ohne die Erddrehung würden die Winde in den Richtungen der Gradienten wehen, durch die Erddrehung werden sie auf der nördlichen Halbkugel aus der Richtung der Gradienten nach rechts und auf der südlichen Halbkugel nach links gedreht. Dieses Gesetz rührt her von Buys[beus]=Ballot (1857) und wird meist so ausgesprochen:

Stellt man sich mit dem Rücken gegen den Wind, so hat

man auf der nördlichen Halbkugel das Minimum links vor sich oder das Maximum rechts hinter sich (auf der südlichen Halbkugel umgekehrt). Diesem Gesetze folgen die beständigen, die periodischen und die veränderlichen Winde.

a) Passatwinde. Zwischen dem Äquator einerseits und dem

Fig. 191.



infolge der Erwärmung der Äquatorgegenden beständigen oben beschriebenen Kreislauf aus (Fig. 191). Am Äquator herrscht beständig ein barometrisches Minimum (760 mm) und in etwa 30° Breite ein Maximum (765 mm). Ohne die Erddrehung würde auf beiden Halbkugeln unten eine Strömung auf den Äquator zu und oben eine solche vom Äquator weg das ganze Jahr hindurch wehen. Statt dessen weht auf der nördlichen Halbkugel unten der Nordostpassat und in der Höhe der Südwestantipassat. Dagegen auf der südlichen Halbkugel unten der Südostpassat und in der Höhe der Nordwestantipassat.

Zwischen den beiden Passatregionen liegt die der Kalmen, wo die Luft nur eine aufsteigende, aber keine wagerechte Bewegung hat.

Dieser Gürtel liegt nördlich vom Äquator, ist etwa 6° breit und verschiebt sich nach dem Stande der Sonne in unserem Sommer nach Norden und in unserem Winter nach Süden. Ebenso verschieben sich auch die Niederfallspunkte von 30° bis zu 40° (subtropische Zone).

b) Als periodische Winde sind zu bezeichnen:

1. Die Land- und Seebrisen. Jene wehen während der Nacht vom kälteren Lande nach dem sich länger warm haltenden Meere, die Seebrisen während des Tages vom kühleren Meere nach dem schneller erwärmten Lande.

2. Die Monsune z. B. im Indischen Ozean. Diese sind im Sommer Südwest-, im Winter Nordostwinde.

c) Veränderliche Winde wehen in den höheren geographischen Breiten, je nach der wechselnden Lage der Maxima und Minima. Für unsere Gegenden sind am wichtigsten die Minima, die im Atlantischen Ozean über dem warmen Wasser des Golfstromes westlich von uns entstehen und von dort mit einiger Regelmäßigkeit nordostwärts nördlich von uns vorüberziehen, bis sie sich über dem östlichen Festlande wieder auflösen. Diese Minima würden uns zuerst Ostwinde bringen, statt dessen entstehen aber wegen der Drehung der Erde Südostwinde. Dem Zuge des Minimum folgend verwandeln sie sich aber dann für Orte, die rechts von diesem Zuge liegen, in Süd-, später Südwest-, West- und Nordwestwinde. Es ist dies die Regel für Orte mittlerer Breite. Hier dreht sich also die Windsfahne in der Uhrzeigerichtung oder mit der Sonne (Doves Winddrehungsgesetz 1837). An Orten, die links von der vorüberziehenden Depression bleiben, dreht sich die Windsfahne gegen die Sonne. Die Karte (Fig. 192) zeigt die Isobaren und die durch die Maxima hervorgebrachten Windrichtungen und Windstärken.

§ 146. Die Feuchtigkeit der Luft. Da das Wasser bei jeder Temperatur verdunstet, so muß die Atmosphäre stets Wasserdampf enthalten. Sie vermag aber nur eine gewisse Menge aufzunehmen, die sich nach ihrer Temperatur richtet (s. § 132_A). Gewöhnlich enthält die Luft nicht soviel Dampf, als zu ihrer Sättigung nötig ist. Man mißt ihre absolute Feuchtigkeit durch das Gewicht in Gramm, das in 1 cbm Luft zurzeit enthalten ist. Unter relativer Feuchtigkeit versteht man das Verhältnis der vorhandenen Dampfmenge zur Sättigungsmenge. Um Brüche zu vermeiden, gibt man die relative Feuchtigkeit in Prozenten an. Sie beträgt z. B. 50%, wenn 1 cbm Luft halb soviel Dampf enthält, als er bei der herrschenden Temperatur aufnehmen könnte.

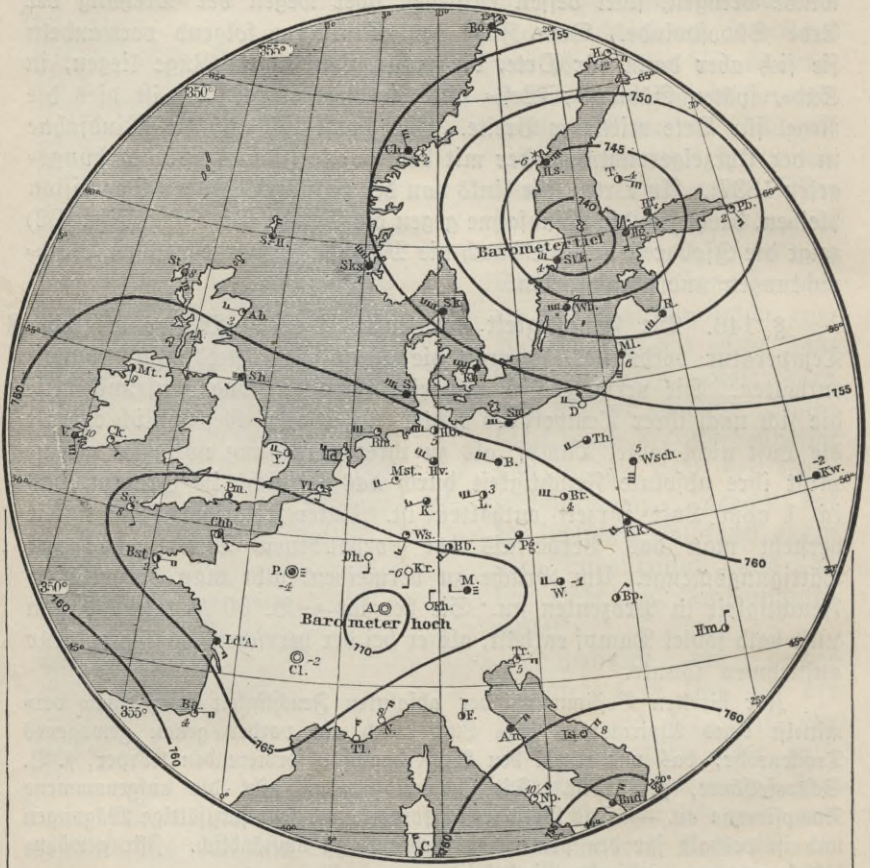
Zur direkten Bestimmung der absoluten Feuchtigkeit faugt man vermittelst eines Aspirators 1 cbm Luft durch ein vorher genau gewogenes Trockenrohr, das mit einem den Wasserdampf absorbierenden Körper, z. B. Schwefelsäure, gefüllt ist. Die Gewichtszunahme gibt die aufgenommene Dampfmenge an. — Das Verfahren erfordert zwei sehr sorgfältige Wägungen und ist deshalb für den praktischen Gebrauch zu umständlich. Für gewöhnlich benutzt man indirekte Methoden.

Bringt man in ein warmes Zimmer ein Glas kaltes Wasser, so bedeckt sich die äußere Wandung mit einem Hauch feiner Nebeltröpfchen. Die das Glas umgebende Luft ist dann unter den Sättigungspunkt abgekühlt. Hat das Wasser anfangs Zimmertemperatur, so kann man es durch Eisstückchen vorsichtig so weit abkühlen, daß das Glas sich zu beschlagen beginnt, die umgebende Luft also gerade den Sättigungs- oder Taupunkt erreicht.

Auf der Bestimmung des Taupunktes beruhen die von Daniell und Regnault angegebenen Hygrometer, bei denen zur Abkühlung verdunstender Äther verwendet wird.

Namen der Beobachtungsstationen:

A. Altkirch. Ab. Aberdeen. An. Ancona. B. Berlin. Ba. Bayonne. Kr. Karlsruhe. K.w. Kiew. L. Leipzig. Ls. Lesina. M. München.
 Bb. Bamberg. Bm. Bremen. Bnd. Brindisi. Bo. Bodö. Bp. Buda. ML. Mel. Mst. Münster. Mt. Mountcharles. N. Nizza. Np. Neapel.
 pest. Br. Breslau. Bst. Brest. C. Cagliari. Ch. Christiansund. P. Paris. Ph. Petersburg. P.g. Prag. Pm. Portsmouth. R. Riga. S. Sylt.
 Chb. Cherbourg. Ck. Cork. Cl. Clermont. D. Danzig. Dh. Diedenhofen. Sc. Scilly. S.H. Sumburgthead. Sh. Shields. Sm. Swinemünda.
 F. Florenz. Fh. Friedrichshafen. H. Hararanda. Hb. Hamburg. Hd. Heide. Sk. Skagen. Sks. Skudnesna. St. Stornorway. Stk. Stockholm.
 Hf. Helsingfors. H.g. Hangö. Hd. Hermannstadt. Hs. Herösand. T. Tammerfors. Th. Thorn. Tl. Toulon. Tr. Trieste. V. Valentia. VV. Vis-
 IV. Hannover. LdA. Ile d'Azur. K. Kassel. Kh. Kopenhagen. Kk. Krakau. sigen. N. Wien. Nw. Wetzlar. Ws. Wiesbaden. Wsch. Warschau. Y. Yarmouth



— Isobaren oder Linien gleichen Barometerstandes. Die fetten, stehenden Ziffern (760) beziehen sich auf letzteren, die zarten liegenden (4) auf die Lufttemperatur

- klar
- ¼ bedeckt
- ½ bedeckt
- ¾ bedeckt
- bedeckt
- Regen
- ≡ Nebel
- x Schnee
- ∞ Dunst
- Hagel
- ¼ Blitz, Gewitter.

- Die Befiederung der Pfeile gibt die Windstärke an; die Pfeile fliegen mit dem Winde.
- Windstille
 - leichter Wind
 - schwacher Wind
 - mässiger Wind
 - frischer Wind
 - starker Wind
 - steifer Wind
 - Sturm
 - starker Sturm

E. Debes dir.

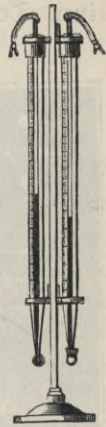
Geogr. Anst. v. Wagner & Debes, Leipzig.

Fig. 192. Synoptische Wetterkarte.

Findet man z. B., daß bei einer Lufttemperatur von 25° C der Taupunkt bei 10° liegt, so enthält nach der Tabelle (Seite 196) die Luft in 1 cbm 9,2 Gramm Wasserdampf. Dies ist demnach der absolute Feuchtigkeitsgehalt. Da aber zur Sättigung 22,8 Gramm bei 25° nötig sind, so beträgt die relative Feuchtigkeit $\frac{9,2}{22,8}$ oder $40,4\%$.

Das am häufigsten von Meteorologen zur Messung der Luftfeuchtigkeit benutzte Instrument ist das Psychrometer von August (Fig. 193). Es besteht aus zwei Thermometern. Die Kugel des einen ist mit feiner Leinwand umwickelt. Wird diese mit Wasser befeuchtet, so sinkt das Quecksilber bei hinreichendem Luftzuge um so mehr, je trockener die Luft ist. Der Unterschied in den Angaben beider Thermometer heißt die psychrometrische Differenz. Aus ihr findet man aus Tabellen, die nach Erfahrung und Theorie berechnet sind, den absoluten und den relativen Feuchtigkeitsgehalt.

Fig. 193.



Im alltäglichen Gebrauch sind vielfach Hygrometer, bei denen gewisse organische Körper benutzt werden, die je nach dem Sättigungsgrade der Luft mehr oder weniger Feuchtigkeit aufnehmen und dabei ihre Gestalt ändern. So dehnt sich ein entfettetes Menschenhaar um so mehr aus, je feuchter die Luft ist. Bei dem Haarhygrometer von Saussure ist ein solches Haar mit dem einen Ende befestigt, das andere trägt ein kleines Gewicht und ist über ein Röllchen geschlungen, mit dem sich ein Zeiger drehen kann. Auf einer empirisch hergestellten Skala liest man die relative Feuchtigkeit in Prozenten ab.

Wir nennen die Luft sehr feucht, wenn sie ihrem Sättigungspunkte sehr nahe ist. Bei einem und demselben Wassergehalte kann uns daher die Luft einmal sehr feucht und ein andermal sehr trocken erscheinen. Warum?

§ 147. **Atmosphärische Niederschläge.** Aus dem in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdampf entstehen: Nebel, Wolken, Regen, Schnee, Hagel, Tau, Reif. § 147.

1. Nebel entsteht, wenn die mit Dampf gesättigte Luft sich abkühlt; dann verdichtet sich der Dunst zu sehr kleinen Wasserteilchen. Wolken unterscheiden sich vom Nebel nur durch ihre größere Entfernung von der Erde.

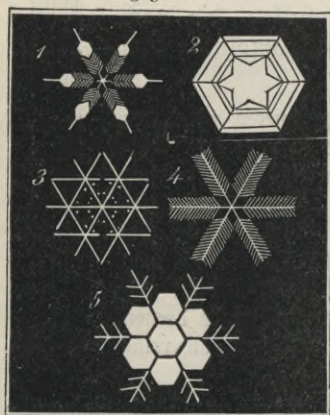
Der von kochendem Wasser aufsteigende rauchähnliche Körper ist Nebel. — Des Abends zeigt sich Nebel über Teichen und feuchten Wiesen. Warum ist der Nebel im Herbst und im Winter häufiger als im Sommer? Im Sommer verwandelt sich bisweilen der blaue Himmel plötzlich in grauen Regenhimmel, ohne daß man hat Wolken heranziehen sehen. Umgekehrt: Hat eine Gegend lange Zeit hindurch trockene, heiße Witterung gehabt, so verschwinden oft die heranziehenden Wolken über der Gegend.

2. Der Regen entsteht, wenn sich die Wasserteilchen des Nebels zu größeren Tropfen vereinigen, die dann herabfallen.

Die Entstehung der Wasserteilchen, ihr Ansammeln zu Tropfen und endlich deren Herabfallen kann man an den Fensterscheiben einer geheizten Stube beobachten. — Warum fällt der Regen in kleinen Tropfen, wenn die Wolken der Erde so nahe sind, daß sie als Nebel erscheinen, und in größeren, wenn sie höher stehen? — Warum sind namentlich die ersten Tropfen eines Gewitterregens so groß? — Wenn an einem heißen Tage eine plötzliche Abkühlung eintritt, so erfolgt gewöhnlich ein heftiger Regen. Warum?

3. Schnee entsteht, wenn der Niederschlag des Wasserdampfes bei einer Temperatur unter Null erfolgt. Die entstehenden Teilchen schießen dann zu sechsseitigen Kristallen zusammen. (Fig. 194.)

Fig. 194.



Bei ruhigem, mildem Wetter fallen große Flocken, bei stürmischem oder sehr kaltem kleine; warum? An den eisernen Fensterstäben der Keller, der Ställe u. dgl. entsteht Schnee, ebenso an den Fensterscheiben, bei nebligem Wetter an den Zweigen der Bäume. Bisweilen fällt gefrorener Regen, kleine durchsichtige Eiszügelchen, gewöhnlich, wenn nach strenger Kälte die Witterung mild wird. Wie läßt sich das erklären?

4. Graupeln sind Kügelchen aus zusammengeballtem Schnee. Sie entstehen gewöhnlich, wenn die Temperatur nicht viel unter Null ist, bei windigem Wetter (besonders häufig im März und im April).

5. Hagel sind Eisstücke von unregelmäßiger Form, an denen man oft mehrere Schichten unterscheiden kann, und die bisweilen die Größe eines Taubeneies und darüber haben. Über ihre Entstehung ist man noch im unklaren. Das scheint gewiß, daß sie nur nach und nach durch Niederschlag bis zu dieser Größe anwachsen können; aber man weiß nicht, woher die große Kälte kommt, die zur Bildung so großer Eisstücke erforderlich ist, und wie es möglich ist, daß Stücke Eis so lange Zeit in der Luft erhalten werden können, bis sie zu dieser Größe anwachsen.

Die Entstehung des Hagels ist wahrscheinlich sehr starken örtlichen Luftströmen zuzuschreiben, welche die dampfreiche Luft schnell in bedeutende Höhen hinauftreiben. Hagel fällt nur bei Gewittern.

6. Tau entsteht, wenn in hellen, windstillen Nächten durch Wärmeausstrahlung des Bodens dieser erkaltet, und durch ihn der

unmittelbar über ihm in der Luft befindliche gesättigte Wasserdampf abgekühlt wird. Anstatt des Taues entsteht Reif, wenn die Temperatur unter Null ist.

Warum entsteht kein Tau und Reif, wenn der Himmel bedeckt ist, oder wenn Wind weht? Warum entsteht unter Tischen und Bänken, die im Freien stehen, wenig oder gar kein Tau? Warum bildet sich mehr Tau am Grafe als auf dem kahlen Boden?

Diefer Abschnitt: Das Licht

§ 142. Das Licht und die Lichtausbreitung. Ein Lichtstrahl ist eine Bewegung, die sich in gerader Linie ausbreitet, und die durch die Ausbreitung der Lichtstrahlen bewirkt wird, dass wir Gegenstände sehen können. Die Lichtausbreitung erfolgt in gerader Linie, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus. Die Lichtausbreitung erfolgt in gerader Linie, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus.

§ 143. Die Eigenschaften des Lichts. Das Licht breitet sich in gerader Linie aus, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus. Die Lichtausbreitung erfolgt in gerader Linie, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus. Die Lichtausbreitung erfolgt in gerader Linie, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus.

§ 144. Die Ausbreitung des Lichts. Das Licht breitet sich in gerader Linie aus, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus. Die Lichtausbreitung erfolgt in gerader Linie, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus. Die Lichtausbreitung erfolgt in gerader Linie, und die Lichtstrahlen breiten sich in alle Richtungen aus.

Vierter Abschnitt: Das Licht.

§ 148. § 148. **Licht und Lichtempfindung.** In einem vollständig verdunkelten Zimmer können wir vermittlest des Auges keine Gegenstände wahrnehmen. Um einen Körper zu sehen, muß etwas von ihm ausgehen, was auf unsere Sehnerven einen Reiz ausübt. Dieses physikalische Etwas, das den Raum zu durchdringen vermag, nennen wir Licht. Das Licht selbst kann man nicht sehen, sondern nur die Körper, die es aussenden. Eine Lichtempfindung kann durch jede Reizung des Sehnerven hervorgerufen werden. Für das Sehen ist nur die durch das Licht verursachte Reizung von Bedeutung.

§ 149. § 149. **Selbstleuchtende und dunkle Körper.** Die eigentlichen Lichtquellen, wie die Sonne, die Fixsterne, die glühenden Körper, sehen wir unmittelbar; andere erst durch Vermittlung der ersten, z. B. Steine, Holz; noch andere sind uns unsichtbar, z. B. die meisten Gase. Die Körper der ersten Art nennt man selbstleuchtend, alle anderen sind an sich dunkel. Die dunklen Körper werden uns dadurch sichtbar, daß sie das von anderen Körpern empfangene Licht nach allen Richtungen (diffus) zurückwerfen (s. § 156).

Hält man die Hand oder ein Blatt Papier so in die Nähe des Fensters, daß die vordere Fläche von Sonnenstrahlen getroffen wird und nach der dunklen Seite des Fensterpfeilers gerichtet ist, so sieht man die Wand stärker erleuchtet.

§ 150. § 150. **Durchsichtigkeit.** Körper, wie Luft, Glas, Wasser, die das auf sie fallende Licht zum großen Teil hindurchlassen, heißen durchsichtig, da man durch sie hindurch andere Körper sehen kann. Es gibt weder vollkommen durchsichtige, noch vollkommen undurchsichtige Stoffe.

In tiefen Seen sieht man nicht bis auf den Grund, wenn das Wasser auch noch so klar ist. Das reinste Glas erscheint farbig, wenn man mehrere Scheiben übereinander legt und ein Blatt weißes Papier dahinter hält. — Andererseits lassen selbst die undurchsichtigsten Körper in sehr dünnen Schichten Licht durch. Sehr dünne Blättchen von Metall oder Holz sind durchscheinend.

A. Ausbreitung des Lichtes.

§ 151. **Lichtstrahlen.** Ein leuchtender Körper sendet Licht nach § 151. allen Seiten aus, denn man kann ihn von allen Seiten aus sehen, wenn nicht ein undurchsichtiger Körper auf der geraden Linie zwischen ihm und dem Auge sich befindet. Dringt Sonnenlicht durch eine Öffnung in ein verdunkeltes Zimmer, so beobachten wir an den beleuchteten Staubteilchen, daß sich das Licht geradlinig von der Öffnung aus ausbreitet. Ein undurchsichtiger Schirm, den man in den Weg des Lichtes stellt, wird nur an der getroffenen Stelle beleuchtet.

Wir haben ferner von frühesten Kindheit an tagtäglich die Erfahrung gemacht, daß sich ein Gegenstand in der Richtung befindet, in der wir ihn sehen, in der also Licht in das Auge gelangt. So oft wir nach einem Gegenstande greifen oder uns nach einem Ziel hin bewegen, dient uns fast immer das Auge als Führer, und der Erfolg bestätigt stets von neuem die Tatsache:

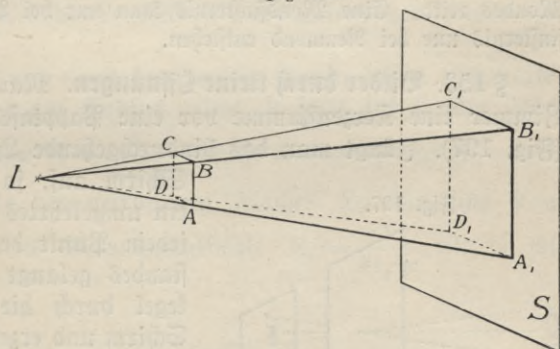
Das Licht pflanzt sich in demselben durchsichtigen Mittel in geraden Linien fort.

Diese geraden Linien nennt man Lichtstrahlen.

§ 152. **Schatten.** Bringt man in den Strahlengang einer mög- § 152.

lichst punktförmigen Lichtquelle L (Fig. 195) ein undurchsichtiges Quadrat ABCD, so erscheint auf dem Schirm S ein scharf begrenzter, tief schwarzer Schatten $A_1B_1C_1D_1$, der Schnitt der Pyramide L (ABCD) mit der Ebene des Schirmes (Schlagschatten).

Fig. 195.



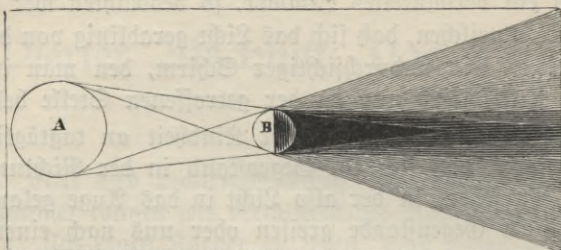
Welche Erscheinungen nimmt man wahr, wenn man das undurchsichtige Quadrat ersetzt durch einen Schirm mit einem quadratischen Ausschnitt ABCD in der Mitte? Wie hängt die Größe der beschatteten oder beleuchteten Fläche des Auffangeschirms von den in Betracht kommenden Entfernungen ab?

Die Schattengrenze wird unscharf, sobald die Lichtquelle eine größere Ausdehnung hat. Auch in diesem Falle befindet sich zwar hinter dem schattenwerfenden Körper ein Raum, in den gar kein Licht

von dem leuchtenden Körper gelangt (Kernschatten). Ein anderer Raum aber erhält nur von einzelnen Teilen Licht (Halbschatten).

Es sei z. B. A eine leuchtende, B eine schattenwerfende Kugel (Fig. 196), so ist der von den äußeren Tangenten begrenzte Raum der Kernschatten, der zwischen den äußeren und inneren Tangenten liegende Raum der Halbschatten. Kern- und Halbschatten gehen allmählich ineinander über. Warum?

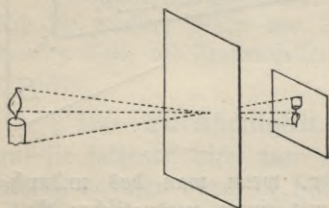
Fig. 196.



Ein in das Sonnenlicht gehaltener Finger erzeugt auf einem dicht dahinter befindlichen Schirm einen scharf begrenzten Schatten; die Grenzen werden aber immer unbestimmter, je weiter man den Schirm entfernt. — Eine Mondfinsternis entsteht, wenn der Mond in den Kernschatten der Erde tritt, und zwar eine partielle, wenn dies nur zum Teil, eine totale, wenn es vollständig geschieht. Eine Sonnenfinsternis findet für den Teil der Erde statt, der in den Schatten des Mondes gelangt, und zwar eine partielle, wenn er in den Halbschatten, eine totale, wenn er in den Kernschatten des Mondes tritt. Eine Mondfinsternis kann nur bei Vollmond, eine Sonnenfinsternis nur bei Neumond entstehen.

§ 153. § 153. **Bilder durch kleine Öffnungen.** Man stelle im verdunkelten Zimmer eine Kerzenflamme vor eine Papptafel mit feiner Öffnung (Fig. 197). Fängt man das hindurchgehende Licht auf einem weißen Schirm auf, so erscheint auf diesem ein umgekehrtes Bild der Kerze. Von jedem Punkt des leuchtenden Gegenstandes gelangt ein enger Strahlenkegel durch die Öffnung nach dem Schirm und erzeugt dort einen kleinen hellen Fleck. Sämtliche so hervorgerufenen Lichtflecke setzen sich zu einem umgekehrten Bilde der Kerze zusammen. Das Bild wird schärfer, aber

Fig. 197.

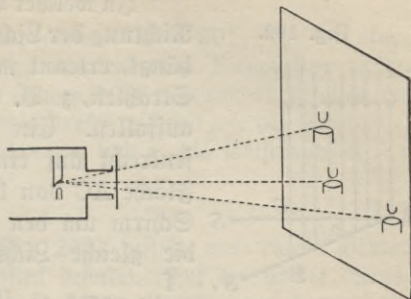


lichtschwächer, je enger man die Öffnung wählt. Dagegen erscheint es unabhängig von der Form der Öffnung, vorausgesetzt, daß der auffangende Schirm nicht sehr nahe der Öffnung aufgestellt ist.

Der Versuch läßt sich bei Benutzung einer Bogenlichtlaterne sehr eindrucksvoll gestalten. Nach Entfernung der Kondensierlinsen bringt man dicht

vor die Laterne ein Stanniolblatt (Fig. 198). So oft man dieses mit einer Nadel durchsticht, erscheint auf dem Projektionschirm in der Richtung Lichtquelle—Öffnung ein umgekehrtes Bild der glühenden Kohlen spitzen. Die Bilder werden kleiner und rücken näher zusammen, wenn man das Stanniolblatt etwas von der Laterne entfernt. Bei einer sehr großen Zahl dicht aneinander liegender Öffnungen überdecken sich die Bilder zum Teil und werden deshalb immer undeutlicher. Ist eine einzige große Öffnung in dem Stanniolblatt entstanden, so erscheint der Schirm gleichmäßig hell beleuchtet.

Fig. 198.



Von der Bilderzeugung durch eine enge Öffnung macht man Anwendung bei der Lochkamera, die bereits Roger Bacon (1214—1292) bekannt war. Kepler (1571—1630) benutzte sie zur Bestimmung des scheinbaren Sonnendurchmessers und bei der Beobachtung von Sonnenfinsternissen. Die von Porta angegebene Verbesserung ist in § 203 beschrieben.

§ 154. **Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, Helligkeit.** Unter Lichtstärke oder Leuchtkraft versteht man die Lichtmenge, die eine Lichtquelle in 1 Sek. ausstrahlt. Als Einheit dient in Deutschland die Hefnerkerze (1 HK), d. i. die Leuchtkraft einer Hefnerschen Amylacetatlampe.

Denkt man sich um einen leuchtenden Punkt, dessen Lichtstärke i sei, eine Kugel von r cm Radius gelegt, so fällt auf 1 qcm Fläche in 1 Sek. die Lichtmenge $E = \frac{i}{4r^2\pi}$. Diese Lichtmenge nennt man die Beleuchtungsstärke der getroffenen Fläche. Da für eine Kugel von Radius r_1 cm die Beleuchtungsstärke $E_1 = \frac{i}{4r_1^2\pi}$ ist, so folgt

$$\frac{E}{E_1} = \frac{r_1^2}{r^2}, \text{ d. h.:}$$

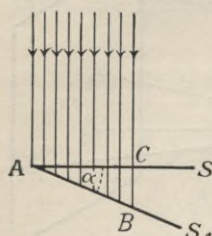
Die von einer punktförmigen Lichtquelle in verschiedenen Entfernungen hervorgebrachten Beleuchtungsstärken verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate dieser Entfernungen.

Alle unsere Lichtquellen sind ausgedehnt. Um angenähert einen leuchtenden Punkt zu erhalten, bringt man vor der Lichtquelle eine enge Blende an.

Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist die Meterkerze (mK), d. h. die Beleuchtungsstärke einer Fläche, die von dem Licht einer Hefnerlampe in 1 m Entfernung senkrecht getroffen wird. Lux (Lx)

Um ohne Schädigung der Augen zu lesen, ist mindestens eine Beleuchtungsstärke von 10 (mK) erforderlich. Wieviel (HK) muß eine Lichtquelle haben, um in $1\frac{1}{2}$ m Entfernung die Beleuchtungsstärke von 20 (mK) zu liefern?

Fig. 199.

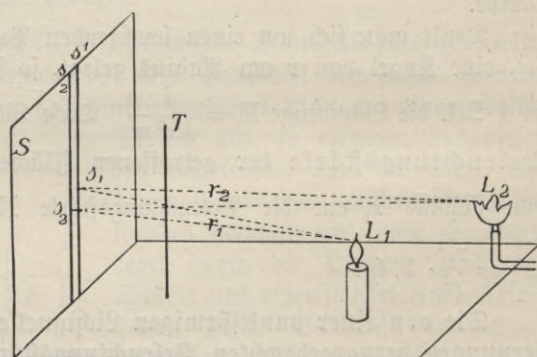
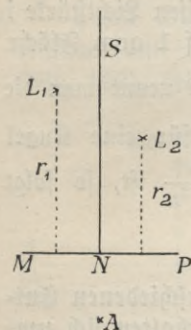


In welcher Weise die Beleuchtungsstärke von der Richtung der Lichtstrahlen zur beleuchteten Fläche abhängt, erkennt man am einfachsten, wenn parallele Strahlen, z. B. Sonnenlicht, auf eine ebene Fläche auffallen. Ein paralleles Strahlenbündel treffe senkrecht auf einen Schirm S und beleuchte eine Fläche AC von f qcm (Fig. 199). Dreht man den Schirm um den Winkel α in die Lage S_1 , so fällt die gleiche Lichtmenge auf die Fläche AB von $\frac{f}{\cos \alpha}$ qcm; es ist also, wenn E und E_1 die Beleuchtungsstärken bezeichnen, $Ef = \frac{E_1 \cdot f}{\cos \alpha}$, demnach $E_1 = E \cos \alpha$.

Die Helligkeit, unter der eine beleuchtete Fläche erscheint, hängt nicht nur von der Beleuchtungsstärke, sondern auch von der Beschaffenheit der Fläche und der Lichtempfindlichkeit des Auges ab. Aus der gleichen Helligkeit, die zwei verschiedene Lichtquellen auf ein und denselben Schirm hervorrufen, kann man auf gleiche Beleuchtungsstärke nur dann schließen, wenn die Lichtquellen gleich gefärbt sind.

Fig. 201.

Fig. 200.



§ 155. § 155. Photometrie. Zur Vergleichung von Lichtstärken dienen die Photometer.

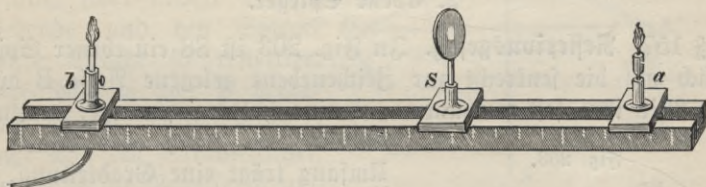
Nach Bouguer stellt man zwischen die Lichtquellen L_1 und L_2 (Fig. 200), deren Lichtstärken i_1 und i_2 man vergleichen will, einen schwarzen Schirm S, so daß die linke Hälfte MN einer Mattglasplatte nur von L_1 , die rechte NP nur von L_2 beleuchtet wird. Sind r_1 und r_2 die Entfernungen, in die man

L_1 und L_2 von MP bringen muß, damit dem Auge in A beide Gesichtsfelder gleich hell erscheinen, so sind die Beleuchtungsstärken von MN und NP gleich, also $\frac{i_1}{r_1^2} = \frac{i_2}{r_2^2}$ oder $\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$.

Bei dem Rumfordschen Schattenphotometer (Fig. 201) steht vor einem weißen Schirm S ein Stab T. Die zu vergleichenden Lichtquellen werden so aufgestellt, daß beide Schatten des Stabes dicht nebeneinander fallen und der von L_1 beleuchtete Schatten s_2 ebenso dunkel erscheint wie der Schatten s_1 , der nur von L_2 Licht erhält. Bezeichnen r_1 und r_2 die Entfernungen $L_1 s_2$ und $L_2 s_1$, so ist $\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$.

Das Bunjensche Photometer (Fig. 202) besteht aus einem Papier=schirm S, in dessen Mitte sich ein Fettfleck befindet. Auf der stärker erleuchteten Seite erscheint der Fleck dunkel auf hellem Grunde, auf der anderen

Fig. 202.



Seite hell auf dunklem Grund. a ist eine Lichtquelle von möglichst konstanter Leuchtkraft, z. B. eine elektrische Glühlampe. Die zu untersuchende Lichtquelle b verschiebt man, bis bei einer Entfernung r_1 vom Schirm der Fleck verschwindet. Hierauf ersetzt man b durch eine Lampe von bekannter Kerzenstärke n (HK) und bestimmt den Abstand r_2 , bei dem der Fleck wiederum verschwindet. Die Lichtstärke von b beträgt dann $\frac{r_1^2}{r_2^2} n$ (HK).

B. Reflexion des Lichtes.

1. Diffuse und regelmäßige Reflexion.

§ 156. Alle Körper werfen mehr oder weniger das Licht zurück, § 156. das ihre Oberfläche trifft, und zwar glatte Körper am meisten, rauhe um so stärker, je mehr sich ihre Farbe dem Weiß nähert. Ein absolut schwarzer Körper würde gar kein Licht reflektieren, man würde ihn also auch nicht sehen.

Warum erscheinen Fensteröffnungen und tiefe Brunnen schwarz?

Rauhe Flächen reflektieren das Licht diffus, d. h. sie senden von jedem Punkte das auffallende Licht nach allen möglichen Richtungen wieder aus, sie können deshalb wie selbstleuchtende Körper von allen Seiten gesehen werden.

An glatten Oberflächen, wie sie z. B. nicht bewegte Flüssigkeiten, Glas, polierte Metalle zeigen, erfolgt die Zurückwerfung nur in

bestimmten Richtungen. Da solche Flächen von den sie beleuchtenden Gegenständen Bilder erzeugen, so nennt man sie spiegelnd. Sie sind um so weniger sichtbar, je vollkommener sie spiegeln.

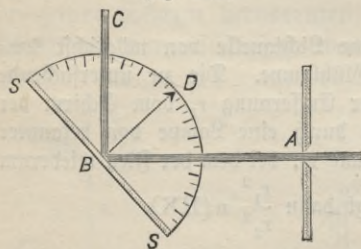
Der Unterschied von diffuser und regelmäßiger Reflexion zeigt sich sehr augenfällig, wenn man einen stark divergierenden Lichtkegel auf einen gewöhnlichen Spiegel fallen läßt, auf den man mit weißer Farbe ein Wort in Spiegelschrift gemalt hat. Auf einer verdunkelten Zimmerwand erblickt man dann die Schrift schwarz auf hellem Grunde.

Künstliche Spiegel aus poliertem Kupfer, Silber, Bronze waren bereits bei den ältesten Kulturvölkern in Gebrauch. Die Phönizier verfertigten geschliffene Spiegel aus dunklem Glase. Das noch jetzt zum Teil übliche Verfahren, Glas auf der Rückseite mit Zinn-Quecksilber zu belegen, stammt aus dem 14. Jahrhundert. Gegenwärtig werden die meisten Spiegel aus versilbertem Glase hergestellt.

2. Ebene Spiegel.

§ 157. § 157. **Reflexionsgesetz.** In Fig. 203 ist SS ein ebener Spiegel, der sich um die senkrecht zur Zeichenebene gelegene Achse B drehen läßt. Mit ihm fest verbunden ist eine halbkreisförmige, mattweiße Scheibe aus Blech oder Glas. Ihr Umfang trägt eine Gradteilung, nach deren Nullpunkt der auf SS senkrechte Radius BD zeigt. Läßt man einen Lichtstrahl AB auf den Spiegel fallen, so wird er in der Ebene ABD stets so in der Richtung BC reflektiert, daß $\angle ABD = \angle CBD$ ist. AB heißt der einfallende Strahl, BD das Einfallslot, Ebene ABD die Einfallsebene, $\angle ABD$

Fig. 203.



der Einfallswinkel und $\angle CBD$ der Reflexionswinkel. Der Versuch zeigt:

1. Die durch den einfallenden und den reflektierten Strahl gelegte Ebene steht senkrecht auf der Spiegelfläche.

2. Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

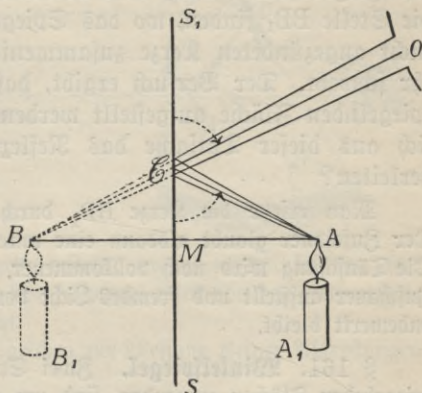
Nach diesem Gesetz muß, wenn CB der einfallende Strahl ist, BA der reflektierte sein. Der Vorgang ist also umkehrbar. Wir werden sehen, daß allgemein das Gesetz gilt: Wenn Licht auf irgend einem Wege von O nach P gelangt, so kann es auch stets umgekehrt denselben Weg von P nach O durchlaufen.

Bei einer Drehung des Spiegels (Fig. 203) um die Achse B behält der einfallende Strahl AB seine Richtung bei. Dagegen wird der Einfallswinkel ABD um den Drehungswinkel σ größer oder kleiner, demnach muß auch der Reflexionswinkel um σ wachsen oder abnehmen. Hieraus folgt der oft angewendete Satz: Dreht sich

ein Spiegel bei fester Richtung des einfallenden Strahles um eine zur Einfallsebene senkrechte Achse um den Winkel σ , so dreht sich der reflektierte Strahl um 2σ .

§ 158. **Spiegelbilder.** Von den Strahlen, die der Lichtpunkt A § 158. (Fig. 204) ausstrahlt, wird gemäß dem Reflexionsgesetz der die Spiegelebene SS_1 senkrecht treffende Hauptstrahl AM in sich selbst reflektiert, der Strahl AC in der Richtung CO so, daß $\angle SCA = \angle S_1CO$ ist. Denkt man sich AM und CO bis zum Schnittpunkt B hinter dem Spiegel verlängert, so folgt aus der Kongruenz der Dreiecke AMC und CMB die Gleichheit der Strecken AM und BM . Demnach muß auch jeder andere von A ausgehende und den Spiegel treffende Strahl so reflektiert werden, daß er von B her zu kommen scheint. In das Auge O gelangt also ein Strahlenkegel, dessen Basis die Pupille ist und dessen Spitze sich in B befindet, demnach so weit hinter dem Spiegel liegt als A davor. Da wir nun erfahrungsgemäß einen Gegenstand in der Richtung sehen, in der das Licht in unser Auge dringt, so erblickt man von O aus ein Bild von A in B und dementsprechend von dem Gegenstande AA_1 ein Bild BB_1 , das symmetrisch zu AA_1 in bezug auf die Spiegelebene gelegen ist. Ein so erzeugtes Spiegelbild heißt ein subjektives oder virtuelles, da es nicht durch ein wirkliches Schneiden von Lichtstrahlen zustande kommt.

Fig. 204.



§ 159. **Homozentrisch** nennt man ein Strahlenbüschel, dessen § 159. Strahlen entweder divergierend von einem Punkte ausgehen oder konvergierend sich in einem Punkte schneiden. Auch ein Büschel paralleler Strahlen ist homozentrisch, da man den unendlich fernen Punkt eines Strahles als Schnittpunkt ansehen kann.

Wird ein homozentrisches Büschel mit dem Scheitel A so abgelenkt, daß wiederum ein homozentrisches Büschel mit dem Scheitel B entsteht, so heißt B das Bild von A .

Umgekehrt kann auch A als Bild von B aufgefaßt werden. Man nennt deshalb A und B konjugierte Punkte.

Der Reflexionsvorgang beim ebenen Spiegel (Fig. 204) verändert den Strahlenweg des von A ausgesandten homozentrischen Büschels derartig, daß die reflektierten Strahlen ein homozentrisches Büschel

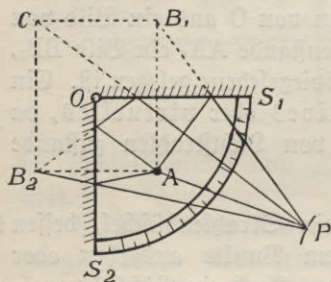
mit dem Scheitel B bilden. Hier ist A ein reeller Objektpunkt, B ein virtueller Bildpunkt. Ein konvergentes Strahlenbüschel, dessen Scheitelpunkt B hinter dem Spiegel liegt, würde so abgelenkt werden, daß die reflektierten Strahlen sich sämtlich in A schneiden. B würde in diesem Falle der virtuelle Objektpunkt, A der reelle Bildpunkt sein, der sich auf einem Schirm auffangen läßt.

- § 160. § 160. **Unbelegte Spiegel.** Ist SS_1 (Fig. 204) eine unbelegte Spiegelglasplatte, AA_1 eine brennende Kerze, dann kann man leicht die Stelle BB_1 finden, wo das Spiegelbild von AA_1 mit einer zweiten nicht angezündeten Kerze zusammenfällt und das Flammenbild über ihr schwebt. Der Versuch ergibt, daß BB_1 gerade so weit hinter der spiegelnden Fläche aufgestellt werden muß als AA_1 davor. Wie läßt sich aus dieser Tatsache das Reflexionsgesetz (§ 157) mathematisch herleiten?

Man ersetze die Kerze BB_1 durch eine mit Wasser gefüllte Flasche. Der Zuschauer glaubt alsdann eine unter Wasser brennende Kerze zu sehen. Die Täuschung wird noch vollkommener, wenn man AA_1 verdeckt gegen den Zuschauer aufstellt und fremdes Licht vom Spiegelglas abhält, so daß dieses unbemerkt bleibt.

- § 161. § 161. **Winkelspiegel.** Zwei Spiegel S_1 und S_2 , die einander ihre spiegelnden Flächen zuwenden, sind um ein Scharnier O drehbar (Fig. 205). Beträgt ihr Neigungswinkel n° , so erblickt man von einem zwischen ihnen befindlichen Gegenstande im allgemeinen $\frac{360}{n} - 1$ Bilder, die auf einem Kreise um

Fig. 205.



O angeordnet sind. In der Figur ist $n = 90^\circ$. Ein Auge in P sieht drei Bilder B_1 , B_2 , C. Die Bilder B_1 und B_2 entstehen durch einmalige Reflexion, das bei C durch zweimalige.

Um die sehr große Zahl von Bildern wahrzunehmen, die zwei parallele Spiegel von einem Gegenstande zwischen ihnen erzeugen, ersetzt man zwei gegenüberliegende Seitenwände einer oben offenen Zigarrenkiste durch Spiegel und entfernt von der Mitte des einen

ein wenig den Belag. Durch die unbelegte Stelle erblickt man von einer in der Kiste stehenden Kerzenflamme eine sehr lange, gerade Reihe von Bildern, die mit zunehmender Entfernung immer lichtschwächer werden.

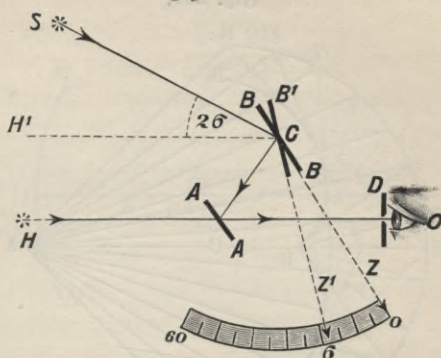
- § 162. § 162. Der **Spiegelsextant** ist ein Winkelmeßinstrument, das besonders dann angewendet wird, wenn eine feste Aufstellung nicht möglich ist, z. B. auf einem Seeschiff. Von den beiden senkrecht zur Zeichenebene stehenden Spiegeln A und B (Fig. 206), die ihre spiegelnden Flächen sich zuwenden, ist A fest, B um die gleichfalls zur Zeichenebene senkrechte Achse C drehbar. Der mit B verbundene Zeiger Z gestattet an einer Kreisteilung, die etwa 60° umfaßt (Sextant) und ihren Mittelpunkt in C hat, den Drehungswinkel

von B abzulesen. Bei D ist entweder eine enge Blende (Diopter) oder ein Fernrohr angebracht, durch das das Auge O über den Spiegel A hinweg das weit entfernte Objekt H, z. B. einen Punkt am Horizont oder einen Stern, sieht. Bei der Nullstellung des Zeigers ist Spiegel B parallel A, und man erblickt infolge des Strahlenganges $H'CAO$ ein Spiegelbild von H, das sich mit dem direkt gesehenen Objekt deckt. Dreht man B um den Winkel σ in die Lage B' , bis durch den Strahlengang $SCAO$ das Bild des Sternes S mit H in einer Richtung erscheint, so ist der zu messende Winkelabstand von H und S gleich 2σ (s. § 157).

Auf dem Prinzip des Sextanten beruht ein einfaches Instrument, das aus zwei festen Spiegeln besteht, die einen Winkel von 45° miteinander bilden. Dieser sogenannte Winkelspiegel wird von den Feldmessern zum Abstecken rechter Winkel gebraucht.

Über die Anwendung ebener Spiegelchen zur Messung kleiner Ablenkungen einer Magnetnadel s. § 285.

Fig. 206.



3. Kugelspiegel.

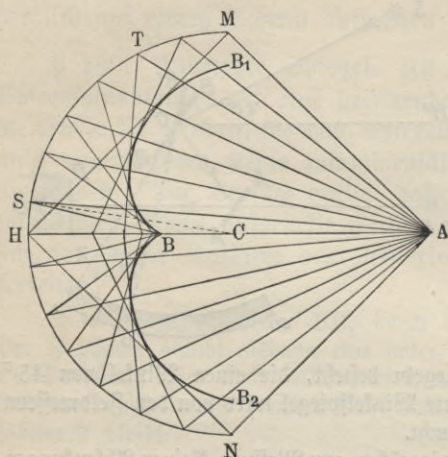
§ 163. Erklärungen. Die spiegelnde Oberfläche einer Kugel § 163. oder Kugelhälfte heißt hohl (konkav) oder erhaben (konvex), je nachdem die innere oder äußere Seite spiegelt. Die Gerade, die den Krümmungsmittelpunkt mit der Mitte der Spiegelfläche verbindet, wird Achse und der durch den Krümmungsmittelpunkt gehende Strahl eines leuchtenden Punktes Hauptstrahl genannt.

Auch für die Kugelspiegel gilt das Reflexionsgesetz (§ 157), da man das sehr kleine Flächenstück, wo ein Strahl auftrifft, durch die zugehörige Tangentialebene ersetzen kann. Für jeden Spiegelpunkt ist der nach ihm gezogene Radius das Einfallslot.

§ 164. Hohlspiegel. In Fig. 207 sei C der Krümmungsmittel- § 164. punkt des Spiegels MHN, A ein leuchtender Punkt und AH sein Hauptstrahl. Konstruiert man zu allen möglichen von A ausgehenden Strahlen, die in der Zeichenebene liegen, die reflektierten Strahlen, so umhüllen diese eine Kurve B_1BB_2 (Brennlinie), die eine Spitze im Punkte B des Hauptstrahles hat. Je näher die einfallenden Strahlen dem Hauptstrahl liegen, um so mehr nähert sich ihr Schnittpunkt mit diesem Strahle dem Punkte B. Für alle Strahlen AS, die mit AH einen Winkel HAS bilden, der etwa 5° nicht übersteigt, kann man praktisch B als Schnittpunkt der zurückgeworfenen Strahlen, d. h. als

Bild von A ansehen. Von den Strahlen eines homozentrischen Büschels werden also nur die nahe dem Hauptstrahl einfallenden durch Reflexion wieder zu einem homozentrischen Büschel vereinigt. Die Bedingung,

Fig. 207.



nur solche Strahlen zur Bild-
erzeugung zu verwenden, läßt
sich experimentell durch Blen-
den verwirklichen. Unter dieser
Voraussetzung kann man das

Streckenverhältnis AS:BS
durch AH:BH ersetzen. Nun
verhält sich aber AS:BS
= AC:BC, da SC den Winkel
ASB halbiert, demnach ist
auch AC:BC = AH:BH oder
AC:AH = BC:BH, das heißt:

Ein Lichtpunkt und
sein Bild teilen den zuge-
hörigen Krümmungsradius har-
monisch.

Aus der letzten Propor-
tion folgt, wenn man die

Gegenstandsweite AH mit a , die Bildweite BH mit b , den Krümmungsradius mit r bezeichnet, $\frac{a-r}{a} = \frac{r-b}{b}$ oder $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r}$.

Hiernach ist für denselben Spiegel die Bildweite allein eine Funk-
tion der Gegenstandsweite, und da man a und b miteinander ver-
tauschen kann, so ist wie beim ebenen Spiegel die Abbildung umkehrbar.

Wird der Hohlspiegel von einem parallelen Strahlenbüschel ge-
troffen, so ist a unendlich groß, und für b ergibt sich der Wert $\frac{r}{2}$.

Parallele Strahlen schneiden sich also nach der Reflexion im Mittel-
punkt ihres Hauptstrahles. Dieser Punkt heißt der Brennpunkt des
Hauptstrahles, im besonderen Falle der Hauptbrennpunkt, wenn die
Strahlen parallel der Achse einfallen. Führt man den Versuch mit
Sonnenlicht aus und bringt in den Schnittpunkt der reflektierten
Strahlen ein kleines Blatt Papier, so wird dieses durch die Wärme-
wirkung der vereinigten Strahlen in kurzer Zeit entzündet. Man
nennt deshalb den halben Krümmungsradius eines Hohlspiegels seine
Brennweite. Sie wird gewöhnlich mit f bezeichnet. Die Spiegelgleichung
erhält dann die Form $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$.

§ 165. § 165. **Bilder kleiner Flächen.** Auf Grund der Ergebnisse des
vorhergehenden Paragraphen kann man zu jedem Lichtpunkt den

Aus der Spiegelgleichung und der angegebenen Bildkonstruktion lassen sich folgende Resultate ableiten:

1. Für $a > 2f$ ist $f < b < 2f$;
das Bild ist reell, umgekehrt und verkleinert.
2. Für $a = 2f$ ist $b = 2f$;
das Bild ist reell, umgekehrt und gleich groß.
3. Für $2f > a > f$ ist $b > 2f$;
das Bild ist reell, umgekehrt und vergrößert.
4. Für $a < f$ ist $b < 0$;
das Bild ist virtuell, aufrecht und vergrößert.
5. Für $a < 0$ ist $b < f$;
das Bild ist reell, aufrecht und verkleinert.
6. Für $a = f$ ist $b = \infty$
7. Für $a = \infty$ ist $b = f$.

§ 167. § 167. Versuche und Anwendungen. Die Brennlinien eines Hohlspiegels kann man bei gewöhnlichem Tageslicht an einem Goldring beobachten, der auf einem weißen Papierblatt liegt. Um sie in größerem Maßstabe zu erzeugen, benutzt man einen blanken Blechstreifen, der am Umfang einer mattweiß gestrichenen Holzscheibe befestigt ist. Bei achsenparallelem Licht beträgt der Abstand der Kurvenspitze vom Spiegel $\frac{1}{2}r$. Wo erscheint die Spitze, wenn sich die Lichtquelle (eine kleine Glühlampe mit geradem Faden) am Rande der Scheibe befindet? (S. Fig. 207.) — Man stelle den Strahlen, die bei dem Versuch (Fig. 198) durch das mehrfach durchlochte Stannioblatt gehen, einen Hohlspiegel entgegen und vereinige sie auf einem Schirm zu einem lichtstarken Bilde der Kohlen spitzen. — Das in der Luft schwebende, reelle Bild eines kleinen Blumenstraußes sieht man in täuschender Naturtreue, wenn der Gegenstand in umgekehrter Stellung etwas unterhalb des Krümmungsmittelpunktes des wenig geneigten Spiegels angebracht wird! — Die Verwendung von Hohlspiegeln als Scheinwerfer hat man oft Gelegenheit zu beobachten. Sollen Lichtstrahlen auf sehr weite Entfernungen zusammengehalten werden, so benutzt man wegen der sphärischen Abweichung nicht Kugelspiegel, sondern parabolisch gekrümmte Spiegel, da diese die Strahlen der im Brennpunkt aufgestellten Lichtquelle genau parallel der Achse zurückwerfen.

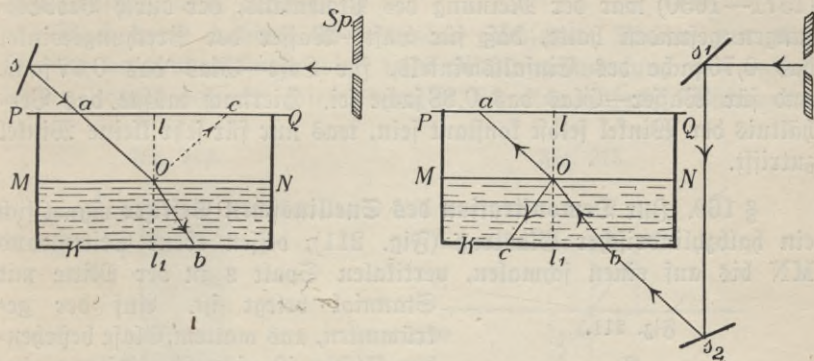
Für die konvergen Kugelspiegel, die weder physikalisch noch technisch von Bedeutung sind, gelten entsprechende Gesetze wie für die Konkaven. Die Bilder sind stets virtuell und verkleinert.

C. Brechung des Lichtes.

§ 168. § 168. Brechungsgesetz. Ein Glaskasten K (Fig. 210 a) ist bis MN mit Wasser gefüllt und mit einer Papptafel PQ überdeckt. Vermitteltst des Spiegels s wird ein flaches Lichtband, das eine kräftige Lichtquelle durch den horizontalen Spalt Sp sendet, so reflektiert, daß

es durch den Schliß a der Papptafel in den Kasten eindringt. Bei o trifft es die Wasserfläche MN , die wie ein ebener Spiegel einen Teil des Lichtes längs oc reflektiert. Ein anderer Teil dringt in das Wasser ein, geht aber nicht in der Verlängerung von a o weiter, sondern schlägt

Fig. 210a und b.



den steileren Weg ob ein, so daß der Strahl aob bei o geknickt erscheint. Man sagt deshalb, das Licht wird bei seinem Übergang aus Luft in Wasser gebrochen.

Der angegebene Strahlengang ist sehr deutlich zu sehen, wenn man in den Raum $MNPQ$ etwas Tabakrauch bläst und dem Wasser einige Tropfen einer Eosinlösung zusetzt.

Vergrößert man den Einfallswinkel aol , den der einfallende Strahl mit dem Einfallslot ll_1 bildet, so wächst auch der Brechungswinkel lob , doch nehmen beide Winkel nicht um gleichviel zu, wie man an dem größer werdenden Knick erkennt; der Winkel bol_1 im Wasser wächst langsamer. Stets aber liegen ao , ol und ob in einer Ebene, und der Strahl im Wasser wird **dem Einfallslot** zu gebrochen. Bei senkrechtem Einfall findet keine Brechung statt.

Um den Übergang des Lichtes aus Wasser in Luft zu beobachten, läßt man ein Lichtband durch einen Spalt bei b von unten in den Glaskasten eintreten (Fig. 210 b). Die in der Richtung bo das Wasser durchsetzenden Strahlen werden dann bei ihrem Austritt in die Luft **vom Einfallslot** weg längs oa abgelenkt.

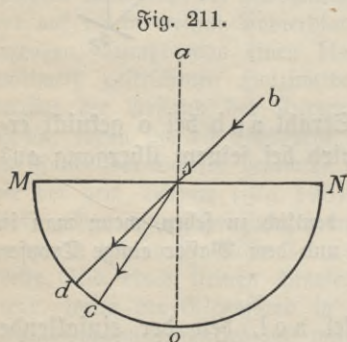
Ähnliche Erscheinungen wie bei Luft—Wasser zeigen sich stets, sobald Licht aus einem Mittel in ein anderes übergeht. Man nennt das Mittel, in dem der Lichtstrahl den kleineren Winkel mit dem Einfallslot bildet, das optisch dichtere. Das Gesetz, nach dem die Brechung geschieht, ist folgendes:

1. Der gebrochene Strahl liegt in der Einfallsebene.

2. Der Quotient aus dem Sinus des Einfallswinkels und des Brechungswinkels ist eine konstante, nur von der Farbe des Lichtes und der Natur der brechenden Mittel abhängige Größe.

Das Gesetz ist von Snellius in Leiden (1591—1626) entdeckt worden. Bekannt wurde es erst 1637 durch Descartes. Noch Kepler (1571—1630) war der Meinung des Ptolemäus, der durch Beobachtungen gefunden hatte, daß für Luft—Wasser der Brechungswinkel das 0,76 fache des Einfallswinkels, für Luft—Glas das 0,67 fache und für Wasser—Glas das 0,88 fache sei. Hiernach müßte das Verhältnis der Winkel selbst konstant sein, was nur für sehr kleine Winkel zutrifft.

§ 169. § 169. Zur Demonstration des Snelliusschen Gesetzes eignet sich ein halbzylindrischer Glästrog (Fig. 211), dessen ebene Seitenwand MN bis auf einen schmalen, vertikalen Spalt s in der Mitte mit Stanniol belegt ist. Auf der gekrümmten, aus mattem Glase bestehenden Fläche ist eine Gradteilung eingezeichnet, deren Nullpunkt dem Spalte gerade gegenüber liegt. Läßt man parallele Lichtstrahlen auf die Mitte der ebenen Fläche des Troges fallen, der zur Hälfte mit Wasser gefüllt ist, so geht das durch den Spalt eintretende Licht oberhalb durch Luft, unterhalb durch Wasser, und man erblickt auf der durchscheinenden, gekrümmten Glasfläche zwei helle Spaltbilder. Trifft das



Licht in der Richtung as senkrecht auf MN, so liegen die Spaltbilder am Nullpunkt senkrecht übereinander. Bei schrägem Einfall längs bs geht der obere Teil des Lichtes ungebrochen weiter bis d, der untere wird durch die Brechung im Wasser nach c abgelenkt. Man kann nun den Einfallswinkel bsa = dso und den Brechungswinkel cso bis auf $\frac{1}{2}^\circ$ genau ablesen und daraus das Verhältnis ihrer Sinus, den Brechungsquotienten n, berechnen. Ein genaueres Verfahren zur Bestimmung dieser Konstanten ist in § 178 angegeben. Für Luft—Wasser ist $n = \frac{4}{3}$, für Luft—Glas $\frac{3}{2}$.

§ 170. § 170. Umkehrbarkeit des Lichtweges. Bereits die Versuche mit dem Glaskasten (§ 168) machen es wahrscheinlich, daß der für die Reflexion richtige Satz von der Umkehrbarkeit des Lichtweges auch für die Brechung gilt. Es müßte dann z. B. der Brechungsquotient n_{LG} für Luft—Glas der reziproke Wert des Brechungsquotienten n_{GL} für

Glas—Luft sein. Das aber kann man experimentell nachweisen; denn läßt man ein Bündel paralleles Licht durch eine dicke Spiegelglasplatte (Fig. 212) gehen, so tritt der einfallende Strahl AB zu sich selbst parallel in der Richtung CD aus. Er erfährt bei der zweimaligen Brechung keine Richtungsänderung, sondern nur eine seitliche Verschiebung, die von der Dicke der Platte, dem Brechungsquotienten und dem Einfallswinkel abhängt.

Auch durch mehrere übereinander geschichtete Platten von verschieden brechender Kraft wird keine Richtungsänderung des auffallenden Lichtes bewirkt. Hieraus ergibt sich eine einfache Bestimmung

Fig. 212.

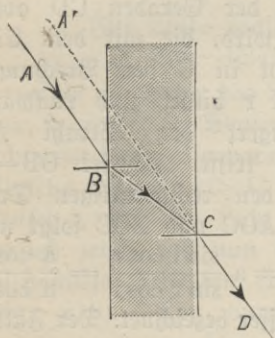
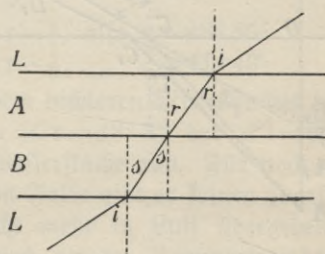


Fig. 213.



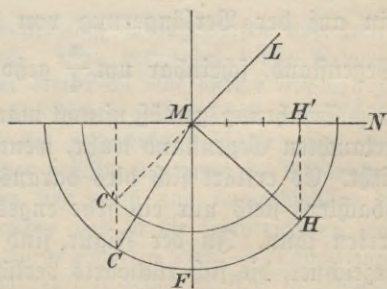
des Brechungsquotienten n_{AB} zweier Mittel A und B aus den Brechungsquotienten n_{LA} und n_{LB} dieser Mittel gegen Luft. Aus der Fig. 213 folgt 1) $\sin i = n_{LA} \sin r$, 2) $\sin r = n_{AB} \sin s$, 3) $\sin s = n_{BL} \sin i'$, demnach durch Multiplikation $n_{LA} \cdot n_{AB} \cdot n_{BL} = 1$ oder $n_{AB} = n_{LB}/n_{LA}$. Für Wasser—Glas z. B. ist $n_{WG} = \frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$.

§ 171. Konstruktion des gebrochenen Lichtstrahls. Das unterhalb § 171.

MN gelegene Mittel sei das optisch dichtere und LM der einfallende Strahl (Fig. 214). Man zeichne in der Einfallsebene um M zwei Kreise, deren Radien im Verhältnis des Brechungsquotienten stehen (in der Figur 4:3), verlängere LM bis zum Schnittpunkt C' mit dem inneren Kreise und fälle von C' das Lot auf MN , das den äußeren Kreis in C trifft.

Die Verbindungslinie MC ist der gebrochene Strahl.

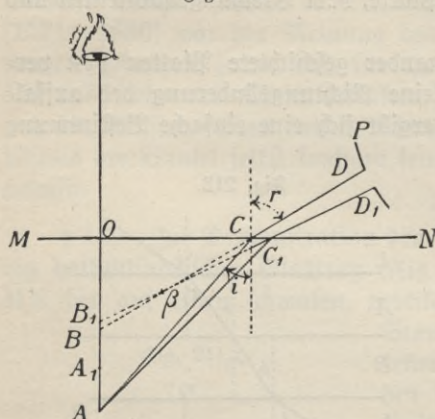
Fig. 214.



Aufgabe. Man zeichne für einen leuchtenden, unter Wasser befindlichen Punkt die Umhüllungskurve der gebrochenen Strahlen.

§ 172. § 172. **Abbildung durch Brechung an einer ebenen Fläche.** Ein Gegenstand befinde sich in der Tiefe $AO = a$ unter der Wasseroberfläche

Fig. 215.



MN (Fig. 215). Von den beiden Strahlen AO und AC des von einem Punkte A ausgehenden homozentrischen Lichtbüschels setzt der zu MN senkrechte Strahl AO seinen Weg ungebrochen fort, während der unter dem Einfallswinkel i auffallende Strahl längs der Geraden CD abgelenkt wird, die mit dem Einfallslot in C den Brechungswinkel r bildet und rückwärts verlängert den Strahl AO in B trifft. Es sei $OB = b$. Aus den rechtwinkligen Dreiecken AOC und BOC folgt nun

$OC = a \tan i = b \tan r$, also $b = a \frac{\tan i}{\tan r} = a \frac{\sin i \cos r}{\sin r \cos i} = \frac{a \cos r}{n \cos i}$ wenn n den Brechungsquotienten Luft-Wasser bezeichnet. Der Faktor $\frac{\cos r}{\cos i}$ ändert sich mit dem Einfallswinkel i , somit auch die Größe b .

Nur die Strahlen, die mit AC auf einem Kegelmantel liegen, dessen Achse AO ist, schneiden sich nach der Brechung virtuell in B . Das von A ausgehende Strahlenbüschel bleibt also nach der Brechung nicht homozentrisch, es kann deshalb auch im allgemeinen keine eindeutige Abbildung zustande kommen. Eine Ausnahme tritt für den Fall ein, daß i und r sehr kleine Winkel sind, denn dann nähert sich der Faktor $\frac{\cos r}{\cos i}$ dem bestimmten Grenzwerte eins, dann wird $b = \frac{a}{n} = \frac{3}{4} a$, und ein auf der Verlängerung von AO befindliches Auge erblickt den Gegenstand, scheinbar um $\frac{a}{4}$ gehoben, auf AO in A_1 .

Erfahrungsgemäß nimmt man aber auch dann einen unter Wasser getauchten Gegenstand wahr, wenn man schräg gegen die Wasseroberfläche sieht. Es erklärt sich dies daraus, daß durch die Pupille P des Beobachters stets nur ein sehr enges Strahlenbündel in das Auge eintreten kann. In der Figur sind zwei Grenzstrahlen CD und C_1D_1 gezeichnet, die sich rückwärts verlängert in β schneiden. Die virtuellen Vereinigungspunkte eines solchen Strahlenbündels, das durch Brechung des schmalen Strahlenkegels $A(CC_1)$ entsteht, erfüllen zwei sehr kurze

gerade Linien, von denen die eine BB_1 auf AO liegt, während die andere senkrecht zur Zeichenebene in β steht. Der bei β gesehene Gegenstand erscheint um so stärker gehoben und seitlich nach dem Auge zu verschoben, je schräger man auf die Wasserfläche blickt.

§ 173. **Totalreflexion.** Beim Übergang des Lichtes aus einem § 173. optisch dünneren in ein dichteres Mittel wächst mit dem Einfallswinkel i der Brechungswinkel r gemäß der Gleichung $\sin r = \frac{1}{n} \sin i$. Da der größte Wert für $\angle i$ 90° beträgt, $\sin 90^\circ$ aber 1 ist, so nähert sich r mit wachsendem i immer mehr einem Grenzwert, der durch die Gleichung $\sin r = \frac{1}{n}$ bestimmt ist.

Für Luft—Wasser ist $\sin r = \frac{3}{4}$, also $r = 48^\circ 35'$.

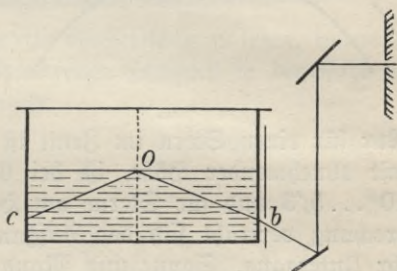
„ Luft—Glas „ $\sin r = \frac{2}{3}$, „ $r = 41^\circ 49'$.

Geht umgekehrt das Licht aus dem dichteren Mittel in das dünnere über, so gehört bei Wasser—Luft zu $\angle r = 48^\circ 35'$ der $\angle i = 90^\circ$, das Licht tritt dann also parallel der Wasserfläche aus. Für noch größere Winkel r wird $\sin i > 1$. In diesem Falle gibt es keinen zugehörigen Winkel i , und das Licht kann nicht mehr in Luft übergehen. Der Versuch zeigt, daß nun die Strahlen an der Trennungsfäche eine vollständige Reflexion erfahren (Fig. 216). Der durch die

Gleichung $\sin r = \frac{1}{n}$ bestimmte Winkel heißt der Grenzwinkel der totalen Reflexion.

Eine Wasser- oder Glasfläche, an der das Licht total reflektiert wird, wirkt wie ein vollkommener Spiegel. Läßt man senkrecht auf eine Kathetenfläche eines rechtwinklig = gleichschenkligen Glasprismas parallele Strahlen fallen, so werden sie an der Hypotenusenfläche vollständig zurückgeworfen und treten senkrecht zur anderen Kathetenfläche aus. Man verwendet solche Prismen zuweilen bei optischen Instrumenten, um dem Licht eine andere Richtung zu geben. — Ein Reagenzglas, das etwas Quecksilber enthält, stelle man schräg in ein Glas Wasser. Der leere Teil des Röhrchens erscheint, von oben gesehen, silberglänzend, der mit Quecksilber gefüllte mattgrau. — Glaspulver und die Schaumkämme von Wasserwellen sind weiß und undurchsichtig, da wegen der mit Luft erfüllten Zwischenräume das in die Körperteilchen eindringende Licht meist wieder vollständig zurückgeworfen wird. — Taucht man eine bis zur hellen Rotglut erhitzte Metallkugel in heißes Wasser, so erscheint sie von einer silberglänzenden Dampfhülle umgeben, solange das Wasser die Kugel nicht berührt. — Auf Totalreflexion beruht ferner die Fortleitung des

Fig. 216.



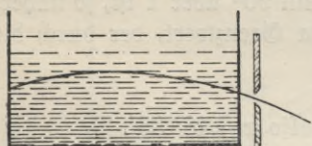
Trappe-Maschine, Schulphysik. 16. Aufl.

Lichtes in parabolisch gekrümmten Wasserstrahlen und S-förmig gebogenen Glasstäben, der Glanz von Luftbläschen im Wasser, das Funkeln geschliffener Edelsteine.

§ 174.

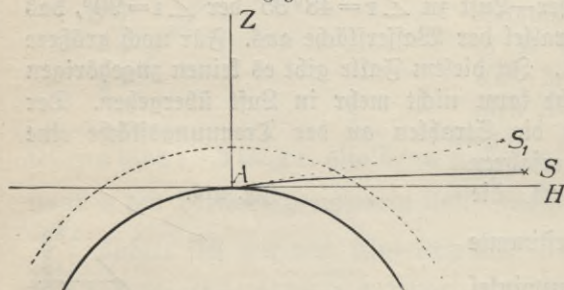
§ 174. **Gekrümmte Strahlen.** Wenn sich Licht in einem Mittel fortpflanzt, dessen optische Dichte kontinuierlich zu- oder abnimmt, so bleibt der Strahlengang nicht geradlinig. Schichtet man Wasser und eine gefättigte Kochsalzlösung (oder Alkohol und Schwefelkohlenstoff) in einem Glasgefäß vorsichtig übereinander, so entsteht durch

Fig. 217.



Diffusion eine Mischung, deren Dichtigkeit und Brechungsvermögen allmählich von oben nach unten wächst. Ein Bündel paralleler Lichtstrahlen, das in schräger Richtung in das Gefäß eintritt, beschreibt dann eine konvex nach oben gekrümmte Bahn (Fig. 217).

Fig. 218.



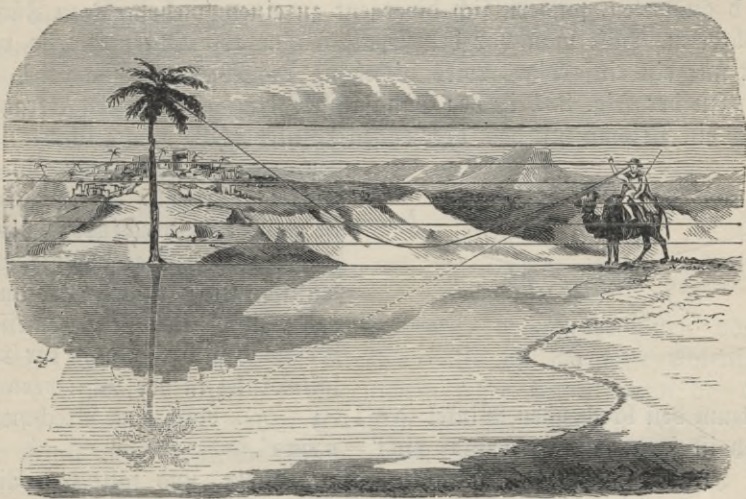
Das von den Sternen in unser Auge gelangende Licht muß vorher die Erdatmosphäre durchlaufen. Dabei wird der Strahlenweg schwach nach der Vertikalen zu gekrümmt (Fig. 218), und wir sehen deshalb die Sterne nicht an ihrem wahren Orte, sondern scheinbar etwas höher.

Nur für einen Stern im Zenit ist die Verschiebung Null; sie wächst mit abnehmender Höhe, ist bei $60^\circ \dots 0,55$, bei $30^\circ \dots 1,66$, bei $10^\circ \dots 5,3$ und für Sterne am Horizont $33'$. Durch die Strahlenbrechung verfrüht sich der Aufgang der Gestirne und verspätet sich ihr Untergang. Sonne und Mond erscheinen uns am Horizont nicht als kreisförmige Scheiben, sondern abgeplattet, da der untere Rand stärker gehoben wird als der obere. —

Auch bei weit entfernten irdischen Gegenständen bewirkt die atmosphärische Strahlenbrechung eine scheinbare Hebung. Hierauf beruht die unter dem Namen Kimmung oder Fata Morgana bekannte Erscheinung, daß zuweilen bei geeigneter Luftschichtung ferne Meeresufer gesehen werden, z. B. bei Reggio die Küste von Sizilien. — Blickt man über ein von der Sonne erwärmtes Dach oder eine Flamme hinweg, so scheinen die dahinter liegenden Gegenstände zu zittern, da das Licht in der ungleich erhitzten Luft eine beständig die Richtung wechselnde Brechung erleidet. — Das Funkeln der Fixsterne. — Die über einer Flamme aufsteigenden heißen Luftströmungen, der aus einer offenen Ätherflasche quellende Dampf werfen bei Bogenlichtbeleuchtung deutliche Schatten.

§ 175. Bei der **Luftspiegelung** erscheint ein umgekehrtes Bild § 175. unter den Gegenständen, wenn die unteren Luftschichten dünner als die oberen, über den Gegenständen, wenn die oberen dünner als die unteren sind (Fig. 219a und b). Die Strahlen bilden, wenn sie in dünnere Luftschichten eintreten, einen immer größeren Winkel mit dem Einfallslot, erreichen endlich den Grenzwinkel und werden nun total reflektiert. In der

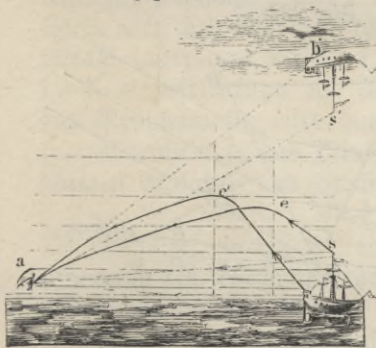
Fig. 219 a.



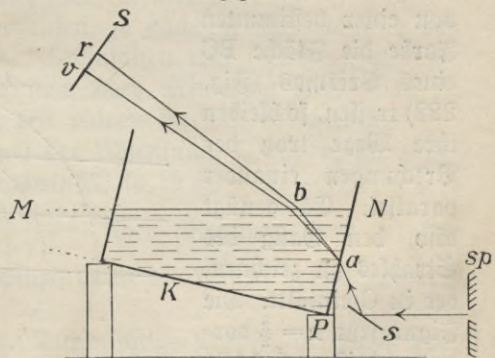
Wüste glaubt der Wanderer zuweilen eine Wasserfläche zu sehen, indem die Brechung der vom hellen Himmel kommenden Strahlen in der Nähe des heißen Erdbodens in Reflexion übergeht.

Fig. 219 b.

Fig. 220.



Wasserspiegel



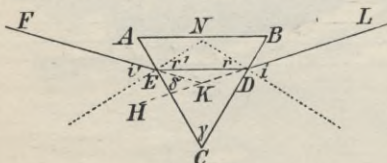
§ 176. **Brechung in Prismen.** Ein durchsichtiger Körper, der von § 176. zwei gegeneinander geneigten Ebenen begrenzt ist, heißt ein optisches Prisma, der Neigungswinkel der beiden Ebenen der brechende Winkel, ihre Schnittlinie die brechende Kante und eine auf dieser senkrechte Ebene ein Hauptschnitt.

Gewöhnlich sind die optischen Prismen aus Glas gefertigt. Durch Schrägstellen des teilweise mit Wasser gefüllten Glaskastens K (Fig. 220) erhält man ein Wasserprisma, dessen brechenden Winkel N man verändern kann. Der Gang des durch den Spalt a begrenzten Lichtbandes läßt sich in derselben Weise objektiv sichtbar machen wie bei einmaliger Brechung (s. § 168).

Man bemerkt, daß die Strahlen von der brechenden Kante weg abgelenkt werden und daß sie nicht mehr parallel und farblos bei b austreten, sondern sich divergent zu einem mehrfarbigen Fächer ausbreiten. Hält man vor den Spalt a eine rote Glasplatte, so verläßt nur ein einfarbiges rotes Lichtband das Wasserprisma bei b .

In der Fig. 221 ist der Gang LDEF eines einfarbigen Strahles durch ein Prisma mit dem brechenden Winkel $ACB = \gamma$ gezeichnet. Die

Fig. 221.



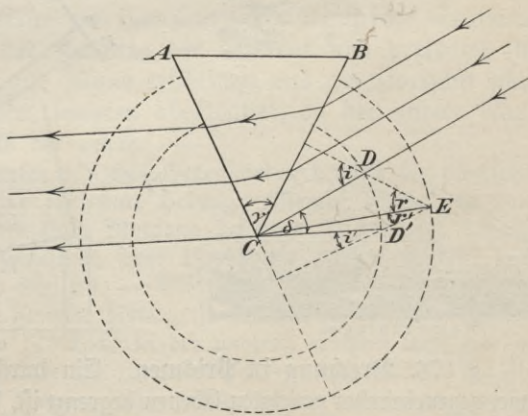
Summe der beiden Brechungswinkel innerhalb des Prismas ist gleich dem brechenden Winkel ($r + r' = \gamma$). Die gesamte Ablenkung des Strahles wird durch den Winkel $HKF = \delta$ gemessen, der gleich ist der Summe der Einfallswinkel in der Luft, vermindert um den brechenden Winkel ($\delta = i + i' - \gamma$). Nach dem Brechungsgesetz ist ferner $\sin i = n \sin r$, $\sin i' = n \sin r'$.

Ist das Prisma scharfkantig, also γ klein, und fällt das Licht nicht erheblich schief auf, so sind i, i', r, r', δ sämtlich nur kleine Winkel. Es ist dann näherungsweise $i = nr$, $i' = nr'$, $i + i' = n\gamma$, $\delta = (n - 1)\gamma$.

§ 177. § 177. Konstruktion des Strahlenganges im Prisma. Wenn

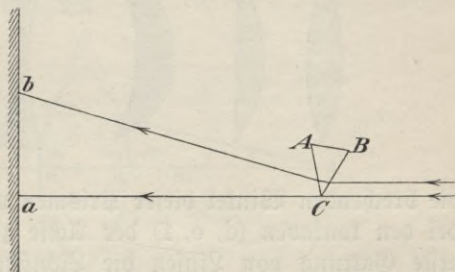
parallele Lichtstrahlen von einer bestimmten Farbe die Fläche BC eines Prismas (Fig. 222) treffen, so bleiben ihre Wege trotz der Brechungen einander parallel. Es genügt also, den Gang des Strahles zu zeichnen, der in C einfällt. Die Figur setzt $n = \frac{3}{2}$ voraus und ist nach § 171 leicht verständlich. Die Beziehung $\delta = D'CD = i - r + i' - r' = i + i' - \gamma$ läßt sich unmittelbar aus der Figur ablesen.

Fig. 222.



§ 178. **Das Minimum der Ablenkung in Prismen.** Man lasse § 178. ein Bündel paralleler und horizontal gerichteter Lichtstrahlen, nachdem sie eine farbige Glasplatte, am besten eine rote, durchsetzt haben, auf die Seite BC eines Prismas nahe der vertikal stehenden, brechenden Kante C so auffallen, daß ein Teil der Strahlen ungebrochen bei C vorbeigeht und auf der entfernten Zimmerwand einen Lichtfleck a hervorruft, während die durch Brechung abgelenkten Strahlen bei b auftreffen (Fig. 223). Dreht man langsam das Prisma um eine zur brechenden Kante parallele Achse, so verschiebt sich b gegen a, und man kann es leicht erreichen, daß bei einer weiteren Drehung, mag sie nun rechts oder links herum geschehen, b am wenigsten von a entfernt ist, die gebrochenen Strahlen also die geringste Ablenkung erfahren. Wie bereits der Augenschein lehrt, bilden dann die auffallenden und austretenden Strahlen mit den Flächen der brechenden Kante merklich gleiche Winkel. Daß dies genau der Fall sein muß, ergibt sich aus folgender Überlegung.

Fig. 223.



Gehört zum Einfallswinkel i der Austrittswinkel i' , so gehört auch umgekehrt zum Einfallswinkel i' der Austrittswinkel i , wie ein Blick auf die Grundgleichungen $\sin i = n \sin r$, $\sin i' = n \sin r'$ und $r + r' = \gamma$ zeigt. Da ferner $\delta = i + i' - \gamma$ ist, so kann man dieselbe Ablenkung δ , solange i von i' verschieden ist, stets bei zwei verschiedenen Stellungen des Prismas hervorrufen, je nachdem man nämlich den Strahl unter dem Winkel i oder i' einfallen läßt. Es muß also für $i = i'$ die Ablenkung ein Maximum oder Minimum sein. Daß sie ein Minimum ist, wird durch den obigen Versuch entschieden.

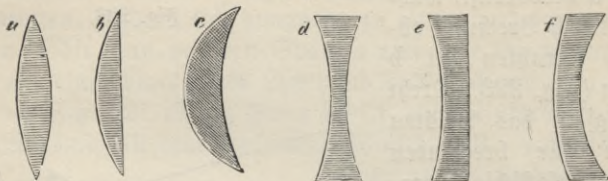
Bezeichnet δ_0 das Minimum der Ablenkung, i_0 und r_0 die zugehörigen Einfallswinkel und Brechungswinkel, so ist $\delta_0 = 2i_0 - \gamma$, $r_0 = \frac{1}{2}\gamma$,

demnach $n = \frac{\sin i_0}{\sin r_0} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta_0 + \gamma)}{\sin \frac{1}{2}\gamma}$. Diese Gleichung dient zur Bestimmung des Brechungsindex, wenn die Winkel γ und δ_0 durch den Versuch ermittelt sind.

§ 179. **Sphärische Linsen.** Durchsichtige Körper, die durch zwei § 179. Kugelflächen begrenzt sind, nennt man sphärische Linsen. Die Verbindungslinie der beiden Krümmungsmittelpunkte heißt die Achse. Ihre Schnittpunkte mit den Linsenflächen heißen die Scheitel. Fig. 224 zeigt die Achsenschnitte der sechs möglichen Formen sphärischer Linsen: a ist bikonvex, b plankonvex, c konkavkonvex; d bikonkav, e plankonkav,

f konvexkonkav. Die Formen a, b, c sind in der Mitte dicker, als am Rande, dagegen d, e, f in der Mitte dünner. Jede Linse muß einen Lichtstrahl genau so ablenken wie ein Prisma aus gleichem Stoff, dessen brechende Ebenen die Linsenflächen im Ein- und Austrittspunkt des Strahles berühren. Bei den konvergen Linsen (a, b, c) würden

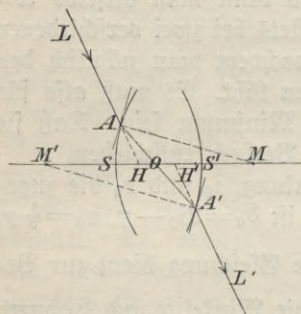
Fig. 224.



die brechenden Winkel dieser Prismen von der Achse weggerichtet sein, bei den konkaven (d, e, f) der Achse zugewendet. Deshalb bricht die erste Gattung von Linsen die Lichtstrahlen nach der Achse hin, die zweite von der Achse weg. Jene wirken als Sammellinsen, diese als Zerstreuungslinsen. Hierbei ist vorausgesetzt, daß der Brechungsquotient Luft—Linsensubstanz größer als eins ist. Für $n < 1$ ist die Wirkung umgekehrt.

§ 180. § 180. **Optischer Mittelpunkt.** Ein längs der Achse einfallender Lichtstrahl geht ungebrochen durch eine sphärische Linse, denn er steht senkrecht zu den parallelen Berührungsebenen in den Scheitelpunkten SS' (Fig. 225). Zieht man zwei parallele Krümmungsradien MA und $M'A'$, so sind auch die Tangentialebenen in A und A' parallel. Deshalb muß ein Strahl, der in der Richtung LA so auffällt, daß er innerhalb der Linse den Weg AA' zurücklegt, in der zu LA parallelen Richtung $L'A'$ austreten. Er erfährt also keine Ablenkung, sondern nur eine seitliche Verschiebung wie bei der Brechung durch eine planparallele Platte (§ 170).

Fig. 225.



Der Schnittpunkt O von AA' mit der Achse teilt die Strecke SS' im Verhältnis der Krümmungsradien, er ist also ein fester Punkt der Achse (Ähnlichkeitspunkt der Flächen). Durch ihn gehen reell oder virtuell alle Strahlen, die ohne Ablenkung die Linse durchlaufen. Man nennt ihn deshalb den optischen Mittelpunkt.

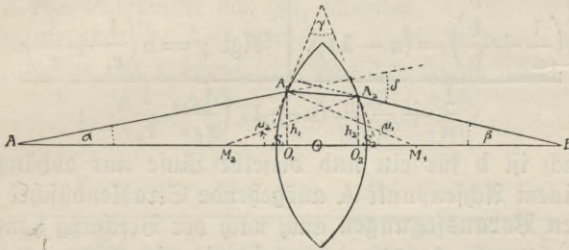
Für eine unendlich dünne Linse fallen die Punkte H und H' , in denen die Verlängerungen von LA und $L'A'$ die Achse treffen, mit O zusammen, d. h.:

Alle nach dem optischen Mittelpunkt einer unendlich

dünnen Linse gerichteten Strahlen (Zentral- oder Hauptstrahlen) gehen ungebrochen hindurch.

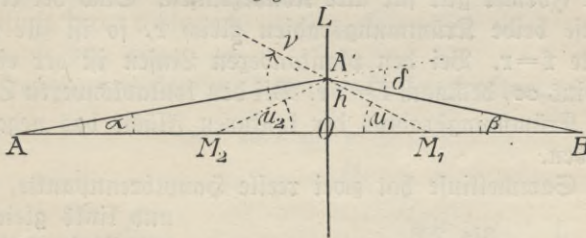
§ 181. **Sammellinsen.** In Fig. 226 bedeutet A einen Lichtpunkt § 181. auf der Achse M_1M_2 einer Sammellinse, deren Krümmungsradien $M_1A_1=r_1$ und $M_2A_2=r_2$ sind. Ein beliebiger Strahl AA_1 des von A ausgesandten homozentrischen Büschels durchsetze die Linse längs A_1A_2 . h_1 und h_2 bezeichnen die Abstände des Ein- und Austrittspunktes von

Fig. 226.



der Achse. Die gesamte Ablenkung $\delta = \alpha + \beta$, die der Strahl bei seiner zweimaligen Brechung erfährt, könnte auch durch ein Prisma hervorgerufen werden, dessen brechende Ebenen die Linsenflächen in A_1 und A_2 berühren. Der brechende Winkel γ dieses Prismas würde um so größer sein, je weiter A_1 vom Scheitel S_1 entfernt ist. Deshalb schneidet der austretende Strahl den Achsenstrahl um so eher, je näher er am Linsenrande auffällt. Nur solche Strahlen, die vor dem Eintritt auf einem Kegelmantel liegen, dessen Grundflächenradius h_1 ist, vereinigen sich nach dem Durchgange in dem Punkte B der Achse. Die austretenden Strahlen bilden also im allgemeinen kein homozentrisches Büschel.

Fig. 227.



Unter der Annahme, daß 1. wie bei den Hohlspiegeln nur die Strahlen zur Bilderzeugung verwendet werden, die vor der Brechung sehr nahe der Achse auffallen, und daß 2. die Dicke S_1S_2 der Linse gegen die Entfernungen $AO_1=a$ und $BO_2=b$ vernachlässigt werden kann, geht die Fig. 226 in die Fig. 227 über. Die Punkte A_1 und A_2 fallen dann in einem Punkte A' zusammen und O_1 und O_2 in den optischen Mittelpunkt O der Linse, so daß $h_1 = h_2 = h$ und $AO = a$, $BO = b$ wird.

Wegen der Voraussetzung 1. sind die Winkel α , β , μ_1 und μ_2 so klein, daß man für ihre Sinus und Tangenten die im Bogenmaß gemessenen Winkel setzen kann. Wegen 2. ist die gesamte Ablenkung δ eines Strahles gleich $(n-1)\gamma$, da die Kleinheit des brechenden Winkels γ die Anwendung der für scharfkantige Prismen gültigen Formel gestattet (s. § 176).

Aus $\delta = \alpha + \beta$ und $a = \frac{h}{a}$, $\beta = \frac{h}{b}$ folgt $\delta = h \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = (n-1)\gamma$.	Aus $\gamma = \mu_1 + \mu_2$ und $\mu_1 = \frac{h}{r_1}$, $\mu_2 = \frac{h}{r_2}$ folgt $\gamma = h \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$.
$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$.	

Hiernach ist b für ein und dieselbe Linse nur abhängig von a . Das von einem Achsenpunkt A ausgehende Strahlenbüschel bleibt also **unter obigen Voraussetzungen** auch nach der Brechung homozentrisch, und dem Lichtpunkt A entspricht eindeutig ein Bildpunkt B auf der Achse. Die Abbildung ist umkehrbar, da man a und b vertauschen kann.

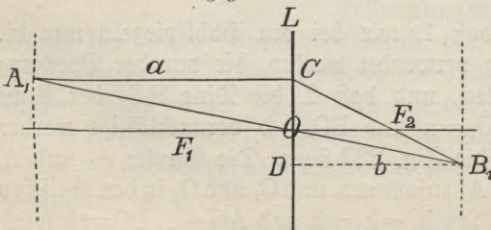
Für Strahlen, die parallel der Achse auffallen, ist $a = \infty$, also $\frac{1}{a} = 0$ und $\frac{1}{b} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$. Aus ähnlichen Gründen wie beim Hohlspiegel (s. § 164) bezeichnet man in diesem Falle den Bildpunkt als Hauptbrennpunkt. Seine Entfernung von der Linse heißt die Brennweite. Setzt man $(n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f}$, so geht die abgeleitete Linsengleichung über in $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$.

Diese Formel gilt für alle Konverglinsen. Sind bei einer bikonvergen Linse beide Krümmungsradien gleich r , so ist für $n = \frac{3}{2}$ die Brennweite $f = r$. Bei den plankonveren Linsen ist der eine Krümmungsradius ∞ , demnach $f = 2r$. Bei den konkavkonveren Linsen muß man dem Krümmungsradius der konkaven Fläche das negative Vorzeichen geben.

Jede Sammellinse hat zwei reelle Hauptbrennpunkte, die rechts

und links gleichweit von der Linse entfernt sind. Man nennt den reziproken Wert der Brennweite einer Linse ihre brechende Kraft. Als Einheit gilt eine Dioptrie, d. i. die brechende Kraft einer Linse von 1 m

Fig. 228.



Brennweite. Hiernach ist die brechende Kraft einer Linse von 25 cm Brennweite gleich 4 Dioptrien.

§ 182. **Abbildung einer Ebene.** Es bedeutet L in Fig. 228 eine § 182.
unendlich dünne Linse, O ist ihr optischer Mittelpunkt, F_1 und F_2 ihr
vorderer und hinterer Brennpunkt. Von den Strahlen, die ein nahe der
Achse gelegener Lichtpunkt A_1 ausfendet, geht der Hauptstrahl A_1O un-
gebrochen durch die Linse (§ 180), während der achsenparallele Strahl A_1C
nach der Brechung durch den hinteren Brennpunkt F_2 läuft und den Haupt-
strahl in B_1 , dem Bildpunkte von A_1 , schneidet.

Die Gegenstandsweite A_1C werde mit a , die Bildweite B_1D mit b
und die Brennweite mit f bezeichnet. Aus der Figur folgt:

$$1. \frac{a}{b} = \frac{A_1O}{OB_1}, \text{ also } \frac{a+b}{b} = \frac{A_1B_1}{OB_1}.$$

$$2. \frac{a}{f} = \frac{A_1B_1}{OB_1}$$

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

Demnach bilden sich Punkte von gleicher Gegenstandsweite in
gleicher Entfernung von der Linse ab, d. h.:

Die Abbildung einer zur Achse senkrechten Ebene ist eine
parallele Ebene.

Insbesonderen Falle, wenn $a = \infty$
ist, wird $b = f$. Parallele Strahlen,
die schräg zur Achse die Linse treffen,
werden also nach dem Schnittpunkt
 B_1 ihres Hauptstrahles mit der hin-
teren Brennebene gebrochen (Fig.
229). Hieraus erklärt es sich, daß
eine Sammellinse, deren Achse nach
dem Mittelpunkt der Sonne ge-
richtet ist, ein kreisförmiges Sonnenbildchen vom Halbmesser $f \tan 16'$ entwirft.

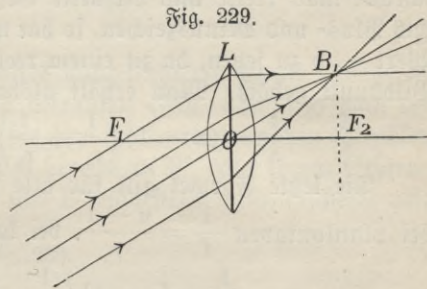
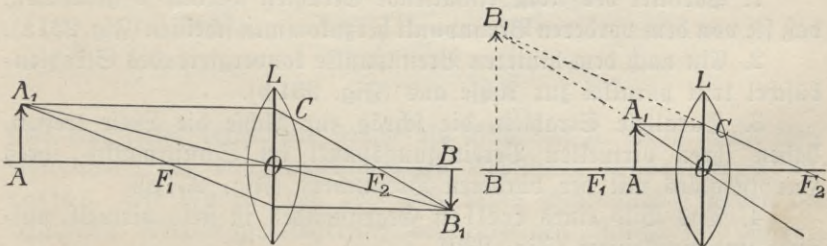


Fig. 230a und b.



§ 183. **Bildkonstruktion.** L (Fig. 230a und b) stellt eine Sammellinse § 183.
vor, deren Brennpunkte F_1 und F_2 sind. AA_1 ist eine kurze

Lichtlinie, senkrecht zur Achse. Man ziehe den zur Achse parallelen Strahl A_1C und verbinde C mit dem hinteren Brennpunkt F_2 . Die Verlängerung von CF_2 trifft den verlängerten Hauptstrahl A_1O im Bildpunkte B_1 . Die Senkrechte B_1B von B_1 auf die Achse ist das Bild von A_1A .

Zur Konstruktion von B_1 kann auch der Strahl A_1F_1 benutzt werden, der parallel der Achse gebrochen wird.

Die Figuren 230 a u. b zeigen, daß sich die Bildgröße zur Gegenstandsgröße verhält wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

Da für Konvexlinsen die gleiche Formel gilt wie für Hohlspiegel und auch für die Bildkonstruktion eine entsprechende Übereinstimmung besteht, so genügt es hier auf die in § 166 angegebenen Fälle hinzuweisen.

§ 184. § 184. **Zerstreuungslinsen** brechen die Lichtstrahlen von der Achse weg (s. § 179). In gleicher Weise wie in § 181 läßt sich unter den dort gemachten Voraussetzungen zunächst zeigen, daß für bikonkave Linsen die Formel gilt: $\frac{1}{b} - \frac{1}{a} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f}$, wenn die vorkommenden Strecken im absoluten Sinne genommen werden. Unterscheidet man reelle und virtuelle Gegenstands- oder Bildweiten durch das Plus- und Minuszeichen, so hat man in obiger Gleichung für b den Wert $-b$ zu setzen, da zu einem reellen Lichtpunkt stets ein virtueller Bildpunkt gehört. Man erhält alsdann

$$-\frac{1}{b} - \frac{1}{a} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}.$$

Die letzte Formel gilt für alle Zerstreuungslinsen, und zwar ist bei plankonkaven $\frac{1}{f} = \frac{n-1}{r}$, bei konvexkonkaven

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{für } r_1 < r_2.$$

Aus der Linsenformel ergibt sich:

1. Parallel der Achse einfallende Strahlen werden so gebrochen, daß sie von dem vorderen Brennpunkt herzukommen scheinen (Fig. 231 a).
2. Ein nach dem hinteren Brennpunkte konvergierendes Strahlenbüschel tritt parallel zur Achse aus (Fig. 231 b).
3. Parallele Strahlen, die schräg zur Achse die Linse treffen, haben ihren virtuellen Vereinigungspunkt im Schnittpunkte ihres Hauptstrahles mit der vorderen Brennebene (Fig. 231 c).
4. Das Bild eines reellen Gegenstandes ist stets virtuell, aufrecht und verkleinert (Fig. 232).

§ 185. § 185. **Sphärische Abweichung.** Die Abbildungsgesetze für sphärische Spiegel und Linsen wurden unter gewissen Voraussetzungen

abgeleitet, die experimentell niemals vollkommen erfüllt sind. Der Bedingung, nur Zentralstrahlen zur Bilderzeugung zu benutzen, kann man zwar durch enge Blenden mit hinreichender Annäherung genügen, doch ist dies stets mit einem entsprechenden Lichtverlust verbunden. Läßt man aber Lichtbündel mit größerem Öffnungswinkel

Fig. 231 a.

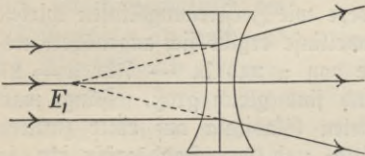


Fig. 231 b.

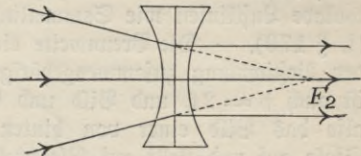


Fig. 231 c.

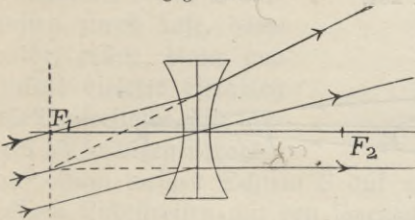
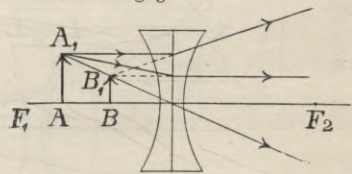
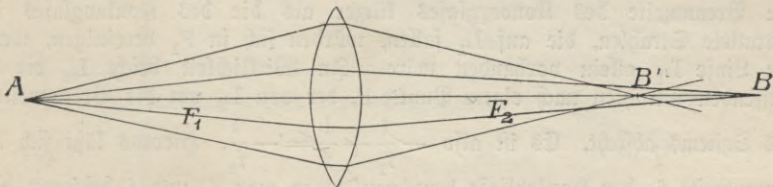


Fig. 232.



zu, so ist das Bild eines Lichtpunktes nicht mehr ein Punkt. Während die von A ausgehenden mittleren Strahlen (Fig. 233) sich nach der Brechung in B schneiden, werden die dem Linsenrande nahen Strahlen stärker abgelenkt und vereinigen sich bereits in B'. Auf einem Schirm, der in B oder B' oder zwischen B und B' aufgestellt wird, erscheint also

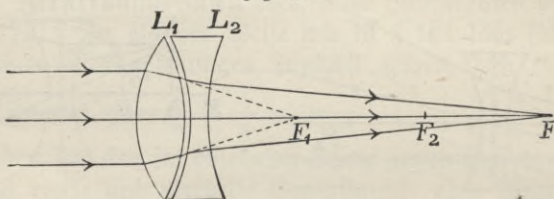
Fig. 233.



stets eine kleine beleuchtete Fläche als Bild von A. Man nennt diese Abweichung von einer punktförmigen Abbildung sphärische Aberration. Sie bewirkt, daß das Bild eines Gegenstandes wegen der teilweisen Übereinanderlagerung der einzelnen Bildflächen unscharf wird. Durch geeignete Wahl der Krümmungsradien einer Linse und durch Anwendung mehrerer Linsen statt einer läßt sich die störende Wirkung der sphärischen Abweichung vermindern.

§ 186. § 186. Versuch. Den Strahlengang durch Linsen kann man in Luft, die durch Rauch oder Salmiaknebel leicht getrübt ist, deutlich sichtbar machen, wenn man über Sonnenlicht oder eine andere ausreichend kräftige Lichtquelle verfügt. Man hängt eine oder mehrere Linsen, z. B. die Beleuchtungsinsen eines Skoptikons, leicht verschiebbar in einem Glaskasten (s. § 168) auf und läßt paralleles Licht durch ein Gitter mit horizontalen Spalten eintreten. — Bringt man in den mit Wasser gefüllten Glaskasten Luftlinsen, die man durch Zusammenfitten von Uhrgläsern leicht herstellen kann, so zeigt sich, daß konkave Luftlinsen wie Sammellinsen, konvexe wie Zerstreuungslinsen wirken (s. § 179). — Die Brennweite einer Sammellinse ergibt sich angenähert aus der Bestimmung zusammengehöriger Werte von a und b . — Für $a = 2f$ ist auch $b = 2f$, und Bild und Gegenstand sind gleich groß. Fängt man also das Bild einer von hinten beleuchteten Glaskala auf einer zweiten Skala auf und stellt auf Gleichheit von Bild- und Gegenstandsgröße ein, so

Fig. 234.



ist der Skalenabstand bei Vernachlässigung der Linsendicke gleich $4f$. — Durch ein auf „Unendlich“ eingestelltes Fernrohr erblickt man einen Gegenstand nur dann scharf, wenn Parallelstrahlenbüschel das Fernrohrobjektiv treffen. Bringt man also zwischen Gegenstand (Glasmaßstab) und Fernrohr die zu untersuchende Sammellinse und verschiebt den Gegenstand, bis man ihn deutlich durch das Fernrohr sieht, so befindet er sich in der Brennebene der Linse. — Das Linsensystem (Fig. 234) wirkt wie eine Sammellinse, wenn die Brennweite des Konverglases kürzer als die des Konkavglases ist. Parallele Strahlen, die auf L_1 fallen, würden sich in F_1 vereinigen, wenn die Linse L_1 allein vorhanden wäre. In Wirklichkeit bricht L_2 die sie treffenden Strahlen nach einem Punkte F , der von L_2 um die Brennweite f des Systems absteht. Es ist also $-\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f} = -\frac{1}{f_2}$. Hieraus läßt sich die Brennweite f_2 der Konkavlinse berechnen, wenn man f_1 und f bestimmt hat.

D. Farbenzerstreuung.

§ 187. § 187. Grundversuche. 1. Bei jeder Brechung weißen Lichtes zeigt sich außer der Ablenkung noch eine andere Erscheinung, die Farbenzerstreuung oder Dispersion, auf die bereits in § 176 aufmerksam gemacht wurde.

Wir wiederholen den dort angegebenen Versuch mit dem Wasserprisma MNP (Fig. 235) und lassen bei a ein Band paralleler weißer Strahlen auffallen. Diese treten nicht mehr farblos und parallel bei b in Luft aus, sondern divergierend als ein vielfarbiger Strahlenfächer, dessen oberste Strahlen rot, die untersten violett sind. Durch Verkleinerung des Einfallswinkels bei a nimmt auch der Brechungswinkel im Wasser bei a ab, während die Winkel bei b wachsen, bis endlich alles Licht total reflektiert wird (s. § 173). Vergrößert man jetzt allmählich den Einfallswinkel bei a, so verlassen zuerst rote, dann gelbe, grüne, blaue und zuletzt violette Strahlen die Wasserfläche. Wir fangen die farbigen Strahlen auf einem weißen Schirm S auf und erhalten auf ihm einen rechteckigen Lichtstreifen mit den sogenannten Regenbogenfarben.

Fig. 235.

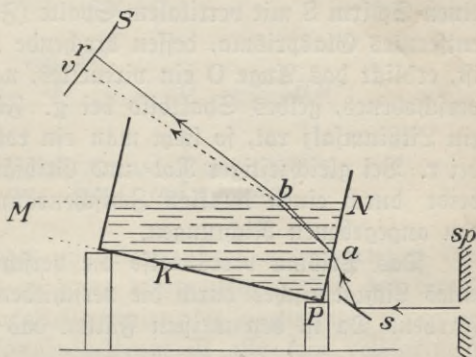
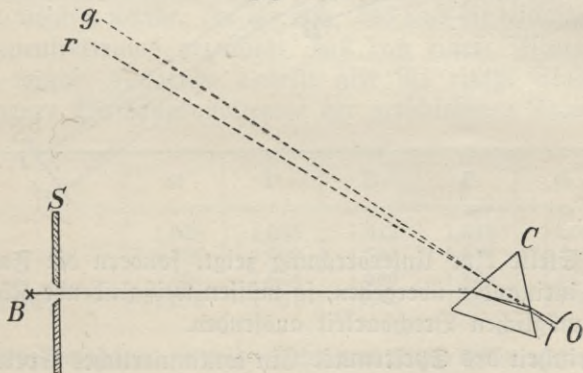


Fig. 236.



Newton nannte einen solchen farbigen Lichtstreifen, den er vermittelst eines Glasprismas erzeugte, ein Spektrum und unterschied folgende Hauptfarben: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Er hat zuerst eine richtige Erklärung der scheinbaren Verwandlung von weißem Licht in farbiges gegeben und durch eine Reihe klassischer Versuche begründet. Nach Newton besteht das weiße Licht, das die Sonne und andere Lichtquellen aussenden, aus unzählig vielen,

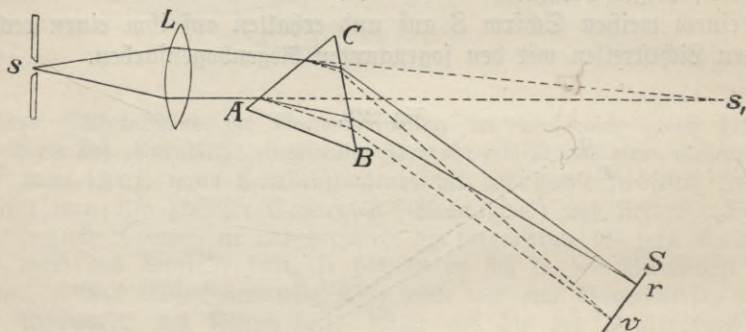
verschiedenfarbigen Lichtarten, die bei der Brechung eine ungleiche Ablenkung erfahren und deshalb zerstreut (dispergiert) werden. Am wenigsten wird rotes Licht, am stärksten violettes abgelenkt.

2. **Spektrum farbiger Flammen.** Von der verschiedenen Brechbarkeit farbiger Lichtarten kann man sich durch einen einfachen Versuch überzeugen.

Vor eine durch Kochsalz gelb gefärbte Bunsenflamme B stellt man einen Schirm S mit vertikalem Spalte (Fig. 236). Durch ein 2 bis 3 m entferntes Glasprisma, dessen brechende Kante C dem Spalt parallel ist, erblickt das Auge O ein virtuelles, nach der brechenden Kante hin verschobenes, gelbes Spaltbild bei g. Färbt man die Flamme durch ein Lithiumsalz rot, so sieht man ein rotes, weniger abgelenktes Bild bei r. Bei gleichzeitiger Rot- und Gelbfärbung der Flamme erscheinen beide durch einen dunklen Zwischenraum getrennten Spaltbilder in den angegebenen Richtungen.

Das Prisma verrät also die verschiedenartige Zusammensetzung eines Lichtgemisches durch die verschiedene Brechbarkeit der einzelnen Farben. Da in den meisten Fällen das Spektrum von weißem Licht

Fig. 237.



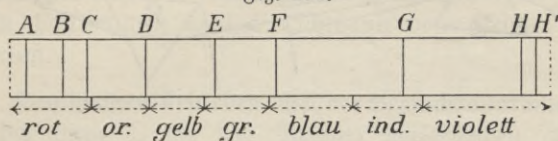
an keiner Stelle eine Unterbrechung zeigt, sondern die Farben kontinuierlich ineinander übergehen, so müssen weißglühende Körper Licht von jeder möglichen Brechbarkeit aussenden.

3. **Reinheit des Spektrums.** Ein kontinuierliches Spektrum wird um so reinere Farben zeigen, je weniger sich die Spaltbilder benachbarter Farben übereinander lagern, je schmaler also diese Bilder sind. Man benutzt deshalb zur objektiven Darstellung folgendes Verfahren:

Von dem vertikalen Spalt *s* (Fig. 237), der durch eine starke, weiße Lichtquelle beleuchtet wird, entwirft man zunächst vermittlest der Sammellinse *L* ein scharfes Bild *s*₁. Hierauf stellt man in den Weg des von *L* her kommenden Strahlenkegels das Prisma *ACB* mit der brechenden Kante *C* parallel zu *s* so auf, daß das Minimum der

Ablenkung erfolgt, und fängt die austretenden farbigen Strahlen auf einem Schirm S auf, der vom Prisma so weit entfernt ist wie s_1 . Die zu den einzelnen Farben gehörigen Spaltbilder sind dann um so schmäler und setzen sich deshalb zu einem desto reineren Spektrum zusammen, je enger man den Spalt s macht. Bei weiter Spaltöffnung fallen in der Mitte des Spektrums Spaltbilder der verschiedensten Farben übereinander, so daß die Mitte weiß erscheint, nur rechts und links von einem farbigen Saum eingefast.

Fig. 238.



Beleuchtet man den Spalt mit Sonnenlicht und verengert ihn möglichst, so zeigen sich stets an ganz bestimmten Stellen des Spektrums schwarze, dem Spalt parallele Linien, die sogenannten Fraunhoferschen Linien. Das Sonnenspektrum ist also kein vollkommen kontinuierliches. Es fehlen in ihm gewisse Farben, deren Brechbarkeit durch die Lage der dunklen Linien bestimmt ist. Fraunhofer (1814), der diese Linien zuerst genauer untersucht und aufgezeichnet hat, erkannte ihre große Bedeutung für die praktische Optik, da erst durch sie eine scharfe Bezeichnung spektraler Farben, also auch der Brechungsquotienten möglich wurde. In der Fig. 238 sind die wichtigsten Linien eines Sonnenspektrums gezeichnet, das von einem Flintglasprisma entworfen wurde. Folgende Tabelle gibt für einige Stoffe die auf Luft bezogenen Brechungsquotienten der verschiedenen Farben an.

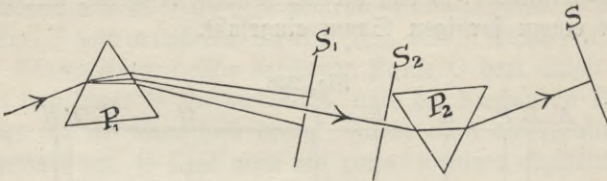
	B	D	E	F	G	H
Flintglas	1,628	1,635	1,642	1,648	1,660	1,671
Crown Glas	1,526	1,530	1,533	1,536	1,542	1,547
Wasser	1,331	1,334	1,336	1,338	1,341	1,344
Schwefelkohlenstoff . .	1,618	1,631	1,644	1,656	1,680	1,702

4. **Experimentum crucis.** Licht von einer bestimmten Brechbarkeit ist einfach (homogen). Wenn es auf ein Prisma trifft, so wird es zwar gebrochen, doch nicht in andere Farben zerlegt. Newton bewies dies durch einen Versuch, den er als entscheidend für seine Theorie ansah und den er deshalb als experimentum crucis bezeichnete.

Man entwirft (s. § 187,3) vermittelst des Prismas P_1 (Fig. 239) ein horizontales, möglichst farbenreines Spektrum auf dem Schirm S_1 , der mit einer senkrechten Spalte versehen ist. Durch diese fällt ein farbiges Lichtbündel auf einen zweiten Schirm S_2 , durchsetzt dessen

Spalte und trifft auf das Prisma P_2 , dessen brechende Kante der von P_1 parallel ist. Auf einem dritten Schirm S erblickt man alsdann ein vertikales, einfarbiges Spaltbild. Durch eine geringe Drehung von P_1 kann man alle möglichen Lichtarten durch die Spalten von S_1 und S_2

Fig. 239.

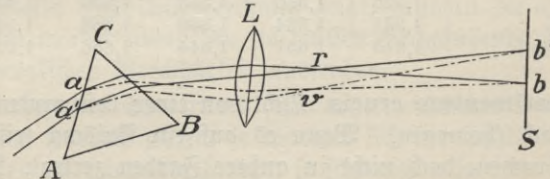


hindurchgehen lassen, von denen jede in genau derselben Richtung auf das Prisma P_2 fällt und von diesem mehr oder weniger abgelenkt, doch nicht weiter dispergiert wird.

5. **Gekreuzte Prismen.** Man erzeugt durch ein Prisma, dessen brechende Kante vertikal steht, ein horizontales Spektrum, stellt nahe hinter dem Prisma einen Schirm mit horizontalem Spalt auf und dicht dahinter ein zweites Prisma, dessen brechende Kante horizontal nach unten liegt. Fallen auf das zweite Prisma Strahlen sämtlicher Farben, so erhält man auf einem Auffangeschirm ein schräg ansteigendes Spektrum, das auf einen Blick die verschiedene Brechbarkeit der spektralen Lichtarten erkennen läßt.

6. **Bereinigung spektraler Farben.** Wenn weißes Licht ein Gemisch aus den vielfarbigem Strahlen des Spektrums ist, so müssen sich diese wieder zu Weiß zusammensetzen lassen. Zu dem Zweck entwirft man durch einen Hohlspiegel oder, wie in Fig. 240, durch eine

Fig. 240.



Sammellinse L ein reelles Bild der Prismenfläche AC , an der die erste Brechung des auffallenden weißen Lichtes erfolgt. Die Linse vereinigt dann die von den Punkten $a \dots a'$ ausgehenden farbigen Strahlen auf dem Schirme S zu einem weißen Bilde $b \dots b'$. Bedeckt man die

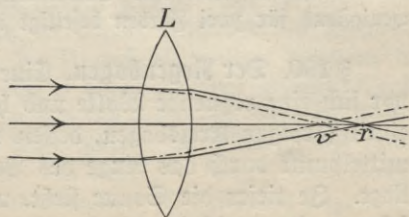
Fläche AC mit einem Streifen Karton, der bei aa' eine rechteckige Öffnung hat, und entfernt hierauf das Prisma, so überzeugt man sich, daß bb' das farblose Bild des Fensterchens aa' ist. — Daß wir die gleichzeitige Wirkung gewisser, verschiedener Farben als Weiß empfinden, kann man mittelst einer Farbenscheibe nachweisen, auf die ein Spektrum in kreisförmiger Anordnung möglichst naturgetreu gemalt ist. Bei rascher Rotation der Scheibe erscheint sie, mit weißem Licht beleuchtet, grauweiß (s. § 193,3). — Fängt man ein horizontales Spektrum mit einem ebenen Spiegel auf und dreht den Spiegel rasch um eine vertikale Achse, so erblickt man auf einem passend aufgestellten Schirm ein vollkommen weißes Lichtband von gleicher Breite wie das Spektrum.

§ 188. **Komplementärfarben.** Bei der Versuchsanordnung Fig. 240 § 188. vereinigt die Linse L die das Prisma verlassenden gleichfarbigen Strahlen zu einem kleinen Spektrum rv , von dem man durch eine geeignete Spaltvorrichtung eine oder mehrere Farben abblenden kann. Auf dem Schirm S erscheint dann das Bild der Öffnung aa' in einer Farbe, die von der Art der durchgelassenen Strahlen abhängt. Stellt man in der Ebene rv statt der Blenden ein schmales Prisma auf, parallel mit seiner brechenden Kante zu der des Prismas ACB, so läßt sich ein Teil der Strahlen seitwärts ablenken, und man erhält auf dem Schirm S zwei Bilder des Fensters aa' in verschiedenen Farben. Vereint geben diese Weiß, wie man sofort nach Wegnahme des scharfkantigen Prismas sieht. Man findet, daß sich z. B. Rot und grünliches Blau, Gelb und Indigoblau, grünliches Gelb und Violett, Grün und Purpur zu Weiß ergänzen. Zwei derartige Farben heißen komplementär. Spektrales Grün ist die einzige Farbe des Spektrums, zu der es keine einfache komplementäre Farbe gibt, denn die Ergänzungsfarbe Purpur ist ein Gemisch aus Rot und Violett.

Von dem hier angegebenen Verfahren, farbige Lichter zusammenzusetzen, ist dem Wesen nach verschieden das Mischen flüssiger oder pulverisierter Farbstoffe (§ 214).

§ 189. **Achromasie.** Bei jeder Brechung weißen Lichtes findet auch § 189. eine Farbenzerstreuung statt. Sie macht sich sehr störend bei der praktischen Anwendung von Linsen bemerkbar. Fällt weißes Licht auf die Sammellinse L parallel der Achse auf (Fig. 241), so schneiden sich die am stärksten abgelenkten violetten Strahlen bereits in v , die roten erst in r . Die Brennweite

Fig. 241.

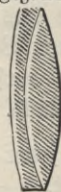
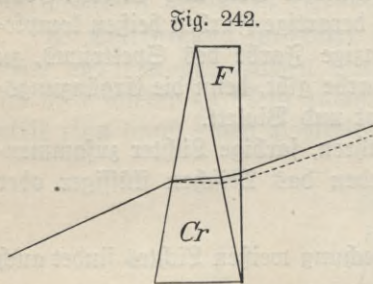


hängt also von der Farbe des Lichtes ab. Deshalb erscheinen die von einer solchen Linse erzeugten Bilder verwaschen und mit farbigen Rändern umgeben. Newton hielt es für ausgeschlossen, diesen Übelstand zu beseitigen. Doch bereits Dollond in England (1706—1761), der das ungleiche Dispersionsvermögen verschiedener Glasarten bemerkt hatte, gelang es, Linsensysteme herzustellen, bei denen die chromatische Abweichung größtenteils aufgehoben war.

Bermittelt ein Prisma aus Flint- oder Kalium-Bleiglas erhält man ein etwa doppelt so langes Spektrum als durch ein Prisma aus Crown- oder Kalium-Kalziumglas von gleichem brechenden Randwinkel, während die Ablenkung von der ursprünglichen Richtung für die mittleren grünen Strahlen bei beiden Prismen fast die gleiche ist. Nun hängt die Länge eines Spektrums von dem Winkel ab, den die äußersten roten und violetten Strahlen bei ihrem Austritt aus dem Prisma miteinander bilden. Bezeichnen n_r und n_v die Brechungsquotienten dieser Strahlen und δ_r und δ_v ihre Ablenkungen, so ist nach § 176 für kleine Winkel $\delta_r = (n_r - 1)\gamma$ und $\delta_v = (n_v - 1)\gamma$, also $\delta_v - \delta_r = \gamma(n_v - n_r)$. Die Länge eines Spektrums ist demnach proportional dem brechenden Winkel γ und der Differenz $n_v - n_r$, der sogenannten totalen Dispersion. Für leichtes Flintglas ist $n_v - n_r = 0,0418$, für schweres Crownglas $= 0,0211$. Die Farbenzerstreuung ist also bei der ersten Glasorte 2,089 mal so groß wie bei der zweiten. Ein Crownglasprisma mit dem brechenden Winkel 20° zerstreut hiernach die roten und violetten Strahlen in gleicher Weise wie ein Flintglasprisma, bei dem γ etwa 10° beträgt. Dagegen ist die Ablenkung $\delta_e = \gamma(n_e - 1)$, die die mittleren grünen Strahlen erfahren, für Crownglas $20(1,6185 - 1) = 12,037$, für Flintglas $10(1,6145 - 1) = 6,014$. Legt man daher zwei derartige Prismen so zu-

sammen, daß sie ihre brechende Kante nach entgegengesetzten Seiten wenden, so bleibt eine Ablenkung von über 6° bestehen, während die Farbenzerstreuung der roten und violetten Strahlen aufgehoben und die der übrigen stark vermindert ist (Fig. 242).

In entsprechender Weise kann man eine konvexe Crown-
glaslinse mit einer konkaven
Flintglaslinse zu einem System



verbinden, das wie eine Sammellinse wirkt und bei dem die Dispersion wenigstens für zwei Farben beseitigt ist (Fig. 243).

§ 190.

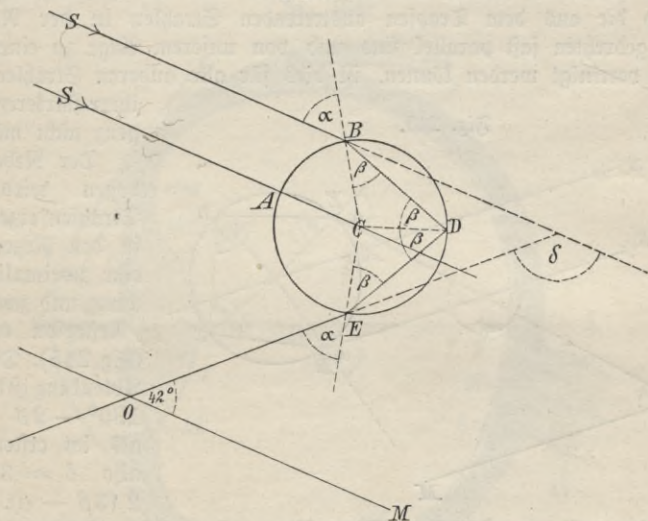
§ 190. **Der Regenbogen.** Einen Regenbogen sieht man, wenn man vor sich eine regnende Wolke und hinter sich die Sonne hat. Er bildet einen farbigen Kreisbogen, dessen Mittelpunkt auf der vom Sonnenmittlepunkt durch das Auge des Beobachters gezogenen geraden Linie liegt. Je tiefer die Sonne steht, um so mehr ist von dem Bogen zu sehen, und er erscheint als Halbkreis, wenn die Sonne im Horizont ist.

Über dem Hauptregenbogen befindet sich oft noch ein Nebenregenbogen. Während die Farben des ersten von außen nach innen in der Ordnung ihrer Brechbarkeit von rot bis violett liegen, ist die Farbenfolge im Nebenregenbogen umgekehrt, also violett außen und rot innen. Es sind jedoch weder beim Haupt- noch beim Nebenregenbogen sämtliche Farbenabstufungen eines kontinuierlichen Spektrums vorhanden, wie dies die bekannte Redensart von den sieben Regenbogenfarben anzudeuten scheint. Zuweilen fehlt jedes Blau und fast immer Dunkelblau. Ein reines Rot ist öfters nicht zu sehen. Auch die Breite und Intensität der einzelnen Farben weicht bei den zu verschiedenen Zeiten beobachteten Regenbogen voneinander ab.

Der scheinbare Radius für den roten Teil des Hauptregenbogens beträgt etwa 42° , der des Nebenbogens 50° . Eine in der Hauptsache richtige Erklärung dieser Beobachtung rührt von Descartes her.

Es seien SA und SB zwei parallele Sonnenstrahlen, die den Regentropfen C treffen (Fig. 244). Von diesen geht SA ungebrochen hindurch,

Fig. 244.



SB wird in B gebrochen und in seine Farben zerlegt. Wir verfolgen von den farbigen Strahlen nur einen, BD, der an der Rückwand des Tropfens in D nach DE zurückgeworfen wird, bei E nach abermaliger Brechung in der Richtung EO austritt und in das bei O befindliche Auge gelangt. Denkt man sich die ganze Figur um die Gerade OM, die den Gegenpunkt der Sonne mit dem Auge verbindet, als Achse gedreht, so beschreibt SB einen Zylindermantel, EO einen Kegelmantel. EO stellt also immer einen Strahl dar, der nach zweimaliger Brechung und einmaliger Reflexion das Auge trifft.

Hieraus ist klar, warum der Regenbogen einen Kreis bildet, dessen

Mittelpunkt auf OM liegt. Die Größe des Winkels EOM hängt ab von dem Brechungsvermögen des Wassers und der Entfernung des Strahles SB von SA. Dieser Winkel ist der scheinbare Radius des Regenbogens. Da er, wie die Erfahrung lehrt, etwa 42° beträgt, so schloß Descartes, daß wir nur von Strahlen, die in einer bestimmten Entfernung von SA den Tropfen treffen, einen bemerkbaren Lichteindruck empfangen, die anderen Strahlen aber, die in einer anderen Entfernung von SA auf den Tropfen fallen, von diesem so ungünstig für das Auge zurückgeworfen werden, daß wir sie nicht bemerken.

Bezeichnen wir mit α den Einfallswinkel des Strahles SB, mit β den Brechungswinkel, so wird der Strahl in B um den Winkel $\alpha - \beta$ gedreht. Bei der Reflexion in D findet eine weitere Drehung um $180^\circ - 2\beta$ statt und bei dem Austritt in E eine abermalige Drehung um $\alpha - \beta$. Der Strahl SB wird demnach im ganzen um $\delta = 180^\circ - 2(2\beta - \alpha)$ gedreht. Berechnet man nach dem Brechungsgesetz $\sin \alpha = n \sin \beta$ für $n = \frac{4}{3}$ zu den verschiedenen Winkeln α die zugehörigen Winkel β und δ und stellt die Resultate in einer Tabelle zusammen, so ergibt sich, daß für $\alpha = 59^\circ 24'$ die Drehung δ den kleinsten Wert $137^\circ 58'$ erreicht.

Aus der Fig. 244 folgt nun $\angle EOM = 180^\circ - \delta = 42^\circ 2'$. Das ist aber der scheinbare Radius des Regenbogens, den die Beobachtung liefert. Während die aus dem Tropfen austretenden Strahlen in der Nähe des mindest gedrehten fast parallel sind und von unserem Auge zu einem Nebenhautbild vereinigt werden können, ist dies für alle anderen Strahlen wegen

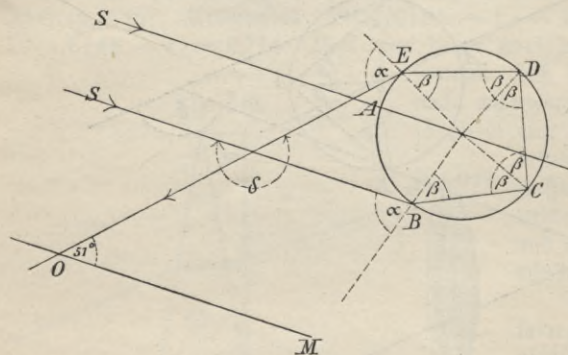
ihrer stärkeren Divergenz nicht möglich.

Der Nebenregenbogen wird durch Strahlen erzeugt, die in den Regentropfen eine zweimalige Brechung und zweimalige Reflexion erleiden (Fig. 245). Die totale Ablenkung ist dann um $180^\circ - 2\beta$ größer als im ersten Falle, also $\delta = 360^\circ - 2(3\beta - \alpha)$. Eine

Tabelle der zusammengehörigen Werte für α , β , δ läßt erkennen, daß für $n = \frac{4}{3}$ dem $\angle \alpha = 71^\circ 50'$ die geringste Drehung $\delta = 230^\circ 59'$ entspricht, und aus der Figur ersieht man, daß $\angle EOM = \delta - 180 = 50^\circ 59'$ ist, also gleich dem beobachteten scheinbaren Radius des Nebenregenbogens.

Das Verdienst von Descartes ist es, die Bedeutung der mindest gedrehten Strahlen für die Bildung des Haupt- und Nebenregenbogens erkannt zu haben. Dagegen ist seine Erklärung von der Entstehung der Farben unrichtig. Auch die Newtonsche Ansicht, daß die Farben lediglich durch die mit jeder Brechung verbundene Farbenzerstreuung hervorgerufen werden, läßt sich nicht aufrechterhalten. Wie Airy (1828) und Pernter (1898) gezeigt

Fig. 245.

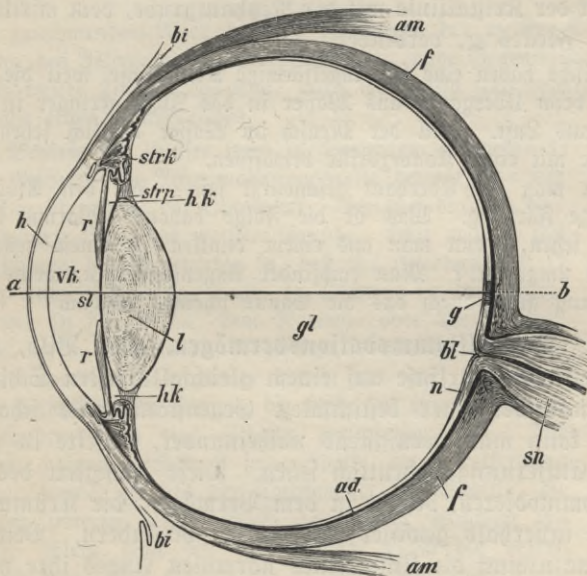


haben, kommen die Regenbogenfarben durch Interferenz der Strahlen zustande, die in der Nähe des mindest gedrehten austreten. Die bei verschiedenen Regenbogen beobachteten Abweichungen in den Farbentönen erklären sich aus der Größe der Regentropfen. Bei einem Tropfendurchmesser von 0,05 mm und darunter fallen die einzelnen Interferenzstreifen derartig aufeinander, daß sie nur ein weißes Band bilden, den Nebelregenbogen, den man zuweilen auf Nebelwänden beobachten kann.

E. Das menschliche Auge und das Sehen.

§ 191. **Bau des Auges.** Das menschliche Auge, sowie das aller § 191. Wirbeltiere, läßt sich in physikalischer Beziehung mit der camera obscura des Photographen vergleichen. Wie bei dieser durch ein Sammellinsensystem ein reelles, umgekehrtes und verkleinertes Bild des Gegenstandes auf der photographischen Platte entworfen wird, so entsteht durch die brechenden Medien des Auges ein derartiges Bild der Außenwelt auf der lichtempfindlichen Netzhaut.

Fig. 246.



Die Fig. 246 zeigt den horizontalen Durchschnitt eines rechten menschlichen Auges in etwa 2,5 facher Vergrößerung. Der Augapfel hat die Form zweier Kugelabschnitte, von denen der größere von der weißen, undurchsichtigen, harten Haut *f*, der kleinere und stärker gekrümmte von der durchsichtigen Hornhaut *h* umschlossen ist. Die Innenseite der harten Haut ist mit der schwarzen Aderhaut *ad* bekleidet.

Über dieser liegt die Netzhaut n , die eine Ausbreitung des hinten in das Auge eintretenden Sehnervs sn ist. Die beiden inneren Räume der Kugelabschnitte sind durch die in einer zarten, durchsichtigen Kapsel liegende Kristalllinse l und den sie haltenden Faltenkranz voneinander geschieden. Der vordere Raum vk ist mit einer wässerigen Flüssigkeit, der hintere, größere mit einer durchsichtigen, gallertartigen Substanz gl , dem Glaskörper, gefüllt. Vor der Kristalllinse ist eine fast ebene, gefärbte, undurchsichtige Haut r , die Iris, ausgespannt. In ihrer Mitte befindet sich eine runde Öffnung, die Pupille, die sich im Dunkeln erweitert und im Hellen verengt.

Die Kristalllinse, der vordere, von der durchsichtigen Hornhaut begrenzte Kugelabschnitt und der Glaskörper wirken wie drei aneinanderliegende Konverglinsen. Der physikalische Vorgang der Lichtbrechung im Auge ist wegen der Verschiedenheit der brechenden Medien ein sehr zusammengesetzter. Zur Konstruktion der Netzhautbilder kann man das Auge durch eine sehr dünne, in Luft befindliche Linse ersetzen, deren Mittelpunkt (Kreuzungspunkt) 7,44 mm hinter der Hornhaut auf der Augenachse ab liegt, d. h. auf der Geraden, die den Mittelpunkt der Kristalllinse mit der Netzhautgrube, dem mittleren Teil des gelben Fleckes g , verbindet.

Die Fische haben eine fast kugelförmige Kristalllinse, weil die Brechung des Lichtes beim Übergange aus Wasser in das Auge geringer ist als beim Übergange aus Luft. Will der Mensch im Wasser deutlich sehen, so muß er das Auge mit einer Konvexbrille bewaffnen.

Warum mag die Oberhaut geschwärzt sein? Bei den Albinos fehlt diese schwarze Färbung. Was ist die Folge davon? Warum kann man nicht gleich sehen, wenn man aus einem dunklen in einen hellen Raum kommt, und umgekehrt? Man empfindet Augenschmerzen, wenn man ein Staket entlang geht, durch das die Sonne scheint. Warum?

§ 192. § 192. Das Akkommodationsvermögen. Das Bild, das eine fest aufgestellte Konverglinse auf einem gleichfalls festen Schirme entwirft, ist nur bei einer bestimmten Gegenstandsweite scharf. Mit dem Auge kann man, wenigstens nacheinander, Objekte in sehr verschiedenen Entfernungen deutlich sehen. Diese Fähigkeit des Auges, sich zu akkommodieren, besteht in dem Vermögen, die Krümmung der Kristalllinse innerhalb gewisser Grenzen zu verändern. Beim Sehen in die Ferne nimmt die Linse eines normalen Auges ihre natürliche Krümmung an, es schneiden sich dann achsenparallele Strahlen auf der Netzhaut, und man sagt deshalb: der Fernpunkt liegt im Unendlichen. Je näher ein Gegenstand dem Auge rückt, desto divergenter sind die von einem Punkte ausgehenden und das Auge treffenden Strahlen, desto stärker muß sich also die Linse krümmen, damit ein scharfes Bild auf der Netzhaut entsteht. Der Normalsichtige kann noch auf einen 10—12 cm nahen Punkt sein Auge einstellen. Den Abstand zwischen

dem Nahe- und Fernpunkt nennt man die Akkommodationsbreite. Unter deutlicher Sehweite versteht man die Entfernung von 20—26 cm, in der ein gesundes Auge gewöhnliche Druckschrift bei guter Beleuchtung bequem zu lesen vermag.

Fehler des Akkommodationsvermögens kommen häufig vor. Beim Kurzsichtigen liegt der Nahpunkt beträchtlich näher als 10 cm, der Fernpunkt oft nur in einem Abstände von 30 und weniger Zentimetern. Strahlen, die von weiter entfernten Punkten herkommen, vereinigen sich deshalb schon vor der Netzhaut. Das Bild eines Punktes ist dann nicht wieder ein Punkt, sondern ein kleiner Kreis. Die den verschiedenen Objektpunkten entsprechenden Kreise auf der Netzhaut überdecken sich zum Teil, und es entsteht ein verschwommenes Bild. Um die Strahlen auf der Netzhaut zum Schnitt zu bringen, müssen sie weniger konvergent gemacht werden. Das geschieht durch eine Brille mit Konkavgläsern.

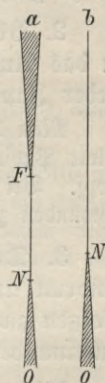
Während beim Kurzsichtigen die Augenachse von vorn nach hinten zu lang ist, liegt beim Übersichtigen der Fehler in einem zu kurzen Bau des Auges. Achsenparallele Strahlen werden in diesem Falle so gebrochen, daß sie sich erst hinter der Netzhaut schneiden würden. Durch eine Brille mit konvexen Gläsern werden sie stärker konvergent gemacht und so auf der Netzhaut vereinigt.

Mit zunehmendem Alter erfahren die Augen der meisten Menschen eine Schwächung des Akkommodationsvermögens für nahe Gegenstände, der Nahpunkt rückt weiter hinaus, das Auge wird weitsichtig und bedarf zum Sehen in der Nähe eines Konverglases.

Die Schärfe der Gläser wird in Dioptrien angegeben (s. § 181).

Zur Messung der Akkommodationsbreite bedient man sich einfacher Vorrichtungen: der Optometer. Geeignet dazu ist eine gerade, schwarze Linie auf weißem Grunde. Hält man sie fast in der Richtung der Augenachse so, daß ihr Anfangspunkt O ein wenig unter dem Auge liegt, so erscheint sie dem Kurzsichtigen wie in Fig. 247a, dem Normal- oder Weitsichtigen wie in Fig. 247b. N gibt den Nahpunkt, F den Fernpunkt an.

Fig. 247.



Eine andere Art Optometer besteht aus zwei ineinander steckenden, verschiebbaren Röhren, die beide an ihren entgegengesetzten Enden durch eine Scheibe verschlossen sind. Die Scheibe der äußeren enthält 2 feine Spalte, deren Entfernung voneinander kleiner ist als der Durchmesser der Pupille, die Scheibe der inneren einen Spalt in gleicher Richtung mit den ersten. Sieht man mit einem Auge durch die beiden Spalte nach dem hellen Himmel, so erscheint der innere Spalt einfach, wenn er sich innerhalb der Akkommodationsbreite befindet; in jeder anderen Entfernung erscheint er doppelt.

Macht man mit einer Nadel ein sehr kleines Loch in ein Kartenblatt und hält dieses ganz dicht vor das Auge, so sieht man sehr kleine Gegenstände ganz deutlich, auch wenn man sie noch so nahe an das Auge hält. Hat man aber zwei solche kleine Löcher in das Kartenblatt gemacht, deren Entfernung kleiner als der Durchmesser der Pupille ist, so sieht man

Gegenstände, die außerhalb der Akkommodationsbreite liegen, doppelt. Scheinerscher Versuch 1619.

§ 193. § 193. **Erregung des Sehnerven.** 1. Die Zapfen- und Stäbchenschicht. Die Netzhaut besteht aus mehreren Schichten. Die eigentlich lichtempfindliche Schicht ist die der Zapfen und Stäbchen, in denen die feinsten Fasern des Sehnerven endigen. Die Netzhautgrube enthält nur Zapfen, und zwar etwa 4000. Hier stehen sie am engsten zusammengedrängt, und von jedem scheint eine besondere Nervenfasern den Lichtreiz nach dem Gehirn fortzuleiten. Wenn wir einen Gegenstand deutlich sehen wollen, so müssen wir eine bestimmte Stelle von ihm fixieren, d. h. unser Auge so stellen, daß ein Bild davon auf die Netzhautgrube fällt. Beim direkten Sehen treten also nur Zapfen in Tätigkeit. Sie allein sind farbenempfindlich. Beim indirekten Sehen wirken auch die Stäbchen mit. Da sie für sehr schwache Lichteindrücke empfindlicher sind wie die Zapfen, so erklärt es sich, daß uns bei geringer Helligkeit alles nur grau und verschwommen erscheint.

Erhitzt man in einem vollkommen dunklen Zimmer den Faden einer Glühlampe allmählich durch einen elektrischen Strom, so tritt die erste Lichtwahrnehmung auf, wenn der Faden auf etwa 400°C gebracht ist. Es geht dann von ihm ein düsternebelgraues Licht aus, das aber sofort verschwindet, wenn man es fixieren will. Wir bemerken es also nur beim indirekten Sehen. Nach Lummer (1897) sind in diesem Falle die Stäbchen der Netzhaut die lichtempfindlichen Elemente. Erst bei einer Temperatur von etwa 500°C werden auch die Zapfen erregt, und der Faden beginnt rot zu glühen.

2. **Blinder Fleck.** Die Stelle, wo der Sehnerv aus dem Kopfe in das Auge eintritt, ist für Licht unempfindlich. Hier befinden sich weder Zapfen noch Stäbchen (Mariottescher Fleck).

Man lege zwei Pfennigstücke in etwa 10 cm Abstand vor sich auf ein Blatt Papier, betrachte das linke mit dem rechten Auge und nähere den Kopf. Bei einer bestimmten Entfernung scheint der zweite Pfennig verschwunden zu sein.

3. **Dauer des Lichteindrucks.** Man empfindet einen Lichteindruck auch noch einige Zeit nach dem Verschwinden der Ursache. Folgen zwei Reizungen der Netzhaut in weniger als etwa 0,1 Sek. aufeinander, so können wir sie nicht mehr getrennt wahrnehmen.

Wird eine glühende Kohle schnell im Kreise herumgeschwungen, so erblickt man einen feurigen Kreis. — An einem sich rasch drehenden Rade sieht man die Speichen nicht; der Raum, den sie durchlaufen, erscheint von einer durchsichtigen Masse erfüllt. Wird aber das Rad von einem elektrischen Funken beleuchtet, so kann man die einzelnen Speichen wieder unterscheiden, und das Rad scheint stillzustehen, da es sich während der außerordentlich kurzen Dauer des Funkens nur unmerklich bewegt.

Auf der Dauer des Lichteindrucks beruhen die Apparate Thaumatropp, stroboskopische Scheibe, Schnellseher, Kinematograph.

4. Subjektive Farben. Richtet man den Blick unverwandt auf das farbige Rechteck A (Fig. 248), das in der Mitte einer anders gefärbten Papptafel B aufgeklebt ist, und verdeckt man nach etwa 20 Sek. A und B durch einen weißen Schirm C, so sieht man auf diesem ein komplementär gefärbtes Nachbild von A und B. Die Erscheinung erklärt sich durch eine Ermüdung der Netzhautstellen, die vorher von den farbigen Strahlen getroffen wurden.

Fig. 248.



5. Unter Irradiation versteht man die scheinbare Vergrößerung heller Flächen.

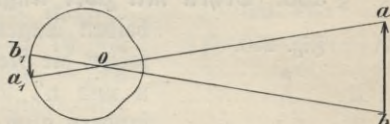
Die Mondichel scheint zu einem größeren Kreise zu gehören als der aschfarbene Teil des Mondes, der nur schwach durch die ihm zugewendete Erdhälfte beleuchtet ist. Den weißglühenden Faden einer Glühlampe halten wir für viel dicker als den dunklen.

Nach Helmholtz beruhen diese Erscheinungen darauf, daß das Netzhautbild eines Punktes wegen der chromatischen und sphärischen Abweichung des Auges auch bei scharfer Akkommodation ein kleines Lichtscheibchen ist.

§ 194. Gesichtswinkel. Die von den Endpunkten der Strecke ab nach dem Kreuzungspunkt (optischen Mittelpunkt) o des Auges gezogenen Strahlen begrenzen das Netzhautbild $a_1 b_1$ (Fig. 249). Winkel aob heißt die scheinbare Größe der Strecke oder ihr Gesichtswinkel. Je weiter ab von o sich entfernt, desto kleiner wird der Gesichtswinkel, also auch das Netzhautbild.

Fig. 249.

§ 194.



Da man einen Gegenstand nur dann scharf sieht, wenn sein Bild auf die Netzhautgrube fällt, so können wir immer nur wenige Punkte auf einmal genau sehen. Wollen wir also die Länge einer nicht ganz kurzen Linie beurteilen, so richten wir die Augenachse zuerst auf den einen Endpunkt und drehen das Auge, bis ihre Verlängerung den anderen Endpunkt trifft. Der Drehungswinkel ist der Gesichtswinkel oder Sehswinkel. Nun wissen wir aus Erfahrung, daß sich das Auge um so mehr drehen muß, je länger die Linie ist, und schließen daher umgekehrt: je größer der Sehswinkel, desto größer ist die Linie. Wir wissen aber auch, daß der Sehswinkel einer und derselben Linie nicht immer der gleiche bleibt, sondern größer und kleiner wird, je nachdem die Linie dem Auge näher oder ferner liegt, je nachdem sie senkrecht oder schief gegen die Augenachse gerichtet ist. Wir verlassen uns daher bei Beurteilung der Länge einer Linie nicht bloß auf den Sehswinkel, sondern bringen auch ihre Entfernung und Richtung in Anschlag. Außerdem wird unser Urteil beeinflusst durch den Vergleich mit anderen uns bekannten, daneben befindlichen Längen.

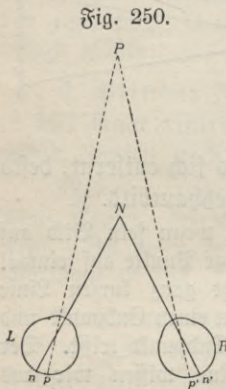
Wir beurteilen also die Dimensionen eines Gegenstandes:

1. nach dem Schwinkel, wobei wir die Entfernung und die Richtung berücksichtigen, und 2. nach der Größe, in der uns andere bekannte Längen erscheinen.

Die beiden parallelen Reihen einer Baumallee, die beiden parallelen Eisenbahnschienen, der Fußboden und die Decke eines langen Korridors scheinen in der Ferne zusammenzulaufen. Die Sonnenstrahlen, die bisweilen bei bedecktem Himmel zwischen den Wolken hindurch scheinen und die Dünste oder den Staub in der Atmosphäre erleuchten, scheinen nach der Erde hin zu divergieren. Eine wagerechte Fläche scheint in ihren entfernten Teilen aufzusteigen. Warum erscheinen uns Bäume, Häuser usw. einer Landschaft, durch ein offenes Fenster gesehen, von dem man etwas entfernt steht, so klein? Den aufgespannten Regenschirm hält man gewöhnlich für viel breiter, als die offene Haustür, in die man eintreten will, obgleich das Umgekehrte der Fall ist. Ein kleiner Fleck auf der Nase erscheint uns sehr groß. In der Ferne scheint uns eine Windmühle sich langsamer zu drehen, ein Reiter langsamer zu reiten u. dgl., als in der Nähe. Eine Mücke, die seitwärts dicht an unserem Auge vorbeisliegt, halten wir für einen großen in der Ferne fliegenden Vogel. Von einem Turme gesehen erscheinen uns die Personen, die Häuser usw. viel kleiner und verhältnismäßig breiter, als wenn sie in gleicher wagerechter Entfernung von uns sind, daher der Unterschied zwischen einem gewöhnlichen Bilde einer Gegend und einem aus der Vogelperspektive aufgenommenen.

§ 195.

§ 195. **Sehen mit zwei Augen.** Wenn wir einen Punkt N mit



beiden Augen L und R (Fig. 250) fixieren, so fallen die Netzhautbilder auf die Netzhautgruben n und n' , und wir sehen N nicht nur scharf, sondern auch einfach. Dagegen erscheint uns ein Punkt P, der die Bilder p und p' hervorruft, doppelt. Das ist stets der Fall, wenn die Bilder nicht auf entsprechende (identische) Stellen der Netzhäute fallen, d. h. auf solche Stellen, die nach derselben Seite gleichweit von den Netzhautgruben liegen.

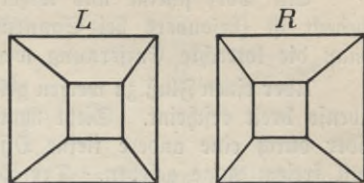
Die Entfernung naher Gegenstände schätzen wir mit zwei Augen richtiger als mit einem, da uns im ersten Falle die größere oder geringere Divergenz der Augenachsen einen sichereren Anhalt liefert und wir einen Gegenstand gewissermaßen von zwei Standpunkten aus sehen. Der Versuch, eine Nähnadel einzufädeln, wenn man ein Auge geschlossen hat, mißglückt fast immer.

§ 196.

§ 196. **Das körperliche Sehen.** Betrachten wir einen nahen Gegenstand, z. B. unsere ausgestreckte Hand, abwechselnd mit dem rechten und dem linken Auge, so nehmen wir einen beträchtlichen Unterschied wahr, denn das rechte Auge sieht mehr von den rechts liegenden

Teilen, das linke mehr von den links liegenden. In Fig. 251 ist ein Pyramidenstumpf gezeichnet, wie er dem rechten und linken Auge erscheint. Eine entsprechende Verschiebung müssen auch die beiden Netzhautbilder zeigen. Trotzdem sehen wir beim gleichzeitigen Gebrauch beider Augen einen Gegenstand für gewöhnlich nicht doppelt (§ 195), sondern beide Gesichtseindrücke verschmelzen zu einem einzigen, und die Körperlichkeit des Gegenstandes tritt weit vollkommener hervor als beim einäugigen Sehen.

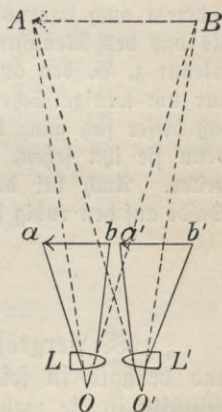
Fig. 251.



Hält man zwischen die Zeichnungen der Fig. 251 ein Blatt Papier so, daß jedes Auge nur ein Bild erblickt, so verschmelzen nach kurzer Zeit die Doppelbilder, und der Pyramidenstumpf scheint aus der Zeichenebene hervorzuspringen.

Das Einfachsehen derartiger, meist auf photographischem Wege hergestellter Doppelbilder wird sehr erleichtert durch das von Wheatstone (1838) erfundene Spiegelstereoskop. Eine noch vollkommenere Täuschung erzielt man vermittelt des Linsenstereoskops von Brewster (1843). Bei diesem werden die beiden Bilder ab und $a'b'$ (Fig. 252) durch zwei konvexe Halblinsen L und L' betrachtet, die wie Vergrößerungsgläser wirken. Dadurch werden die Bilder scheinbar in die Ferne geschoben und übereinandergelegt, so daß der Beobachter, dessen Augenkreuzungspunkte mit o und o' bezeichnet sind, den Gegenstand AB in richtiger Entfernung und natürlicher Größe zu sehen glaubt.

Fig. 252.



§ 197.

§ 197. **Schätzung der Entfernung.** Die Entfernung eines Gegenstandes von uns können wir nur unsicher nach dem Schwinkel beurteilen, weil sich dieser mit zunehmender Größe der Entfernung nur sehr wenig ändert. Wir wissen aber aus Erfahrung, daß uns ein Gegenstand desto größer und deutlicher erscheint, je näher er uns liegt, und schließen daraus umgekehrt: Je deutlicher und größer ein Gegenstand uns erscheint, desto näher ist er uns. Ferner wissen wir, daß zwischen einem Gegenstand und unserem Standpunkte desto mehr Gegenstände Raum haben, je ferner er von uns liegt, und schließen daraus: Je mehr Gegenstände zwischen uns und dem zu beurteilenden Gegenstande liegen, desto ferner ist er.

Endlich stützen wir unser Urtheil über die Entfernung eines Gegenstandes auf die Größe des Winkels, den unsere Augenachsen bilden, wenn wir sie auf den Gegenstand richten.

Ein Dorf scheint uns näher zu liegen, wenn das Feld mit Schnee bedeckt ist (besonders bei Sonnenschein), als im Sommer. Warum kann man die lotrechte Entfernung weniger gut beurteilen als die horizontale?

Über einen Fluß zu werfen gelingt weniger gut als über ein Ackerstück, das ebenso breit erscheint. Sieht man nach Gegenständen durch die hohle Hand oder durch eine andere kleine Öffnung, so erscheinen diese viel ferner, als mit freiem Auge gesehen. Der Maler malt die Gegenstände, die er als in der Ferne liegend darstellen will, sehr klein, mit unbestimmten Farben und mit unbestimmten Umrissen. Die Höhe eines Turmes erscheint, wenn man von oben herabsieht, viel größer als eine gleiche horizontale Entfernung; die Sterne halten wir alle für gleichweit entfernt. Ein Turm, der hinter einem Berge hervorragt, scheint auf dem Berge zu stehen. Die Bergspitzen eines Gebirges scheinen alle gleichweit von uns entfernt zu sein. Warum halten wir die Entfernung hoher Berge gewöhnlich für kleiner, als sie wirklich ist?

Warum erscheinen uns Sonne und Mond beim Auf- und Untergange viel größer, als wenn sie hoch über dem Horizonte stehen? Ebenso erscheinen die einzelnen Sterne eines Sternbildes in der Nähe des Horizonts viel weiter voneinander zu stehen, als wenn sich dieses in größerer Höhe befindet.

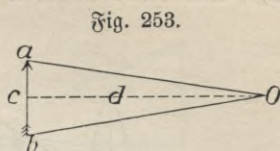
Wie sehr beim Sehen der Verstand tätig sein muß, um den Eindruck, den ein Gegenstand auf die Netzhaut macht, zu entziffern, geht unter anderem auch daraus hervor, daß die Tiere, wenn ihr Auge auch schärfer als das des Menschen ist, doch schlechter sehen als dieser. Denn das Wild erkennt z. B. den auf dem Anstande stehenden Jäger nicht, wenn es auch nur um wenige Schritte neben ihm aus dem Walde kommt, vorausgesetzt, daß dieser sich ganz regungslos verhält. Die scheuesten Tiere stutzen zwar, wenn sie ihn sehen, betrachten ihn einige Zeit, gehen dann aber sorglos weiter. Auch bei der Treibjagd, also am Tage, kommt das Wild im Walde auf den ruhig stehenden Jäger los, sieht ihn an und erkennt ihn nicht.

F. Optische Instrumente.

§ 198. § 198. **Bergrößerung.** Wir sehen einen Gegenstand um so größer und deshalb in seinen Einzelheiten deutlicher, je größer sein Netzhautbild ist, je mehr wir ihn also dem Auge nähern. Dieses Hilfsmittel kann aber nur bis zum Nahpunkt ausgenutzt werden, da wir sonst die Möglichkeit der Akkommodation einbüßen. Bringen wir zwischen Auge und Gegenstand einen Schirm mit enger Öffnung, so bleibt zwar das Netzhautbild bei noch geringerer Entfernung scharf wegen der Kleinheit der Zerstreuungskreise, es geht aber dabei so viel an Licht verloren, daß dies Verfahren praktisch nicht von Bedeutung ist.

Um einen Gegenstand vergrößert zu sehen, bedient man sich optischer Instrumente. Die Vergrößerung wird in jedem Falle gemessen durch das Verhältnis der Gesichtswinkel, unter dem der Gegenstand einmal im Instrument, das andere Mal ohne dasselbe erscheint.

Steht die Strecke ab (Fig. 253) senkrecht zur Augenachse, und ist $oc = d$ der Abstand vom Augenkreuzungspunkte o , so kann man den im Bogenmaß gemessenen, sehr kleinen Gesichtswinkel gleich $\frac{ab}{d}$ setzen.



§ 199. Das einfache Mikroskop. Konverglinsen von kleiner Brennweite sind einfache Mikroskope (Lupen). § 199.

Man bringt das Auge möglichst nahe an die Linse und hält den Gegenstand so zwischen Linse und vorderen Brennpunkt, daß das Bild in der deutlichen Sehweite erscheint.

Die lineare Vergrößerung eines einfachen Mikroskops ist gleich $\frac{d}{f} + 1$, wenn d die deutliche Sehweite und f die Brennweite bezeichnet.

Befindet sich das Auge dicht an der Linse L (Fig. 254), und soll das aufrechte, vergrößerte, subjektive Bild BB_1 des Gegenstandes AA_1 in der deutlichen Sehweite liegen, so folgt für die Gegenstandsweite a aus der Linsenformel die Gleichung

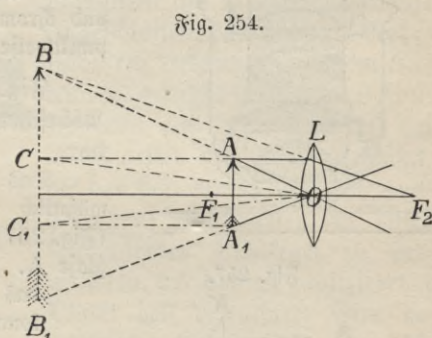
$$\frac{1}{a} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}, \text{ demnach}$$

$$\frac{d}{a} = \frac{d}{f} + 1 = \frac{BB_1}{AA_1}.$$

Das Bild wird von O aus unter dem Winkel $BOB_1 = \frac{BB_1}{d}$ gesehen; der Gegenstand würde ohne Linse unter dem Winkel $COC_1 = \frac{CC_1}{d} = \frac{AA_1}{d}$ erscheinen, wenn er vom Auge um d entfernt wäre. Für das Verhältnis dieser beiden Winkel, durch das die Vergrößerung V gemessen wird, ergibt sich also $V = \frac{d}{f} + 1$.

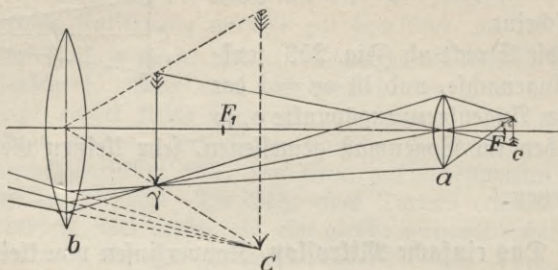
Warum muß man das Auge der Lupe möglichst nahebringen?

§ 200. Das zusammengesetzte Mikroskop (Fig. 255) besteht im § 200. einfachsten Falle aus einer Sammellinse a (Objektiv) von sehr kleiner



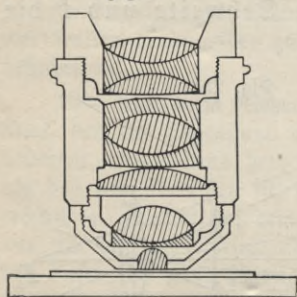
Brennweite, die von dem wenig außerhalb der Brennweite befindlichen Gegenstande c ein vergrößertes, umgekehrtes und reelles Bild γ erzeugt, und einer anderen b von etwas größerer Brennweite, die als

Fig. 255.



Lupe wirkt, so daß das Auge ein subjektives Bild C in der deutlichen Sehweite erblickt. Die Vergrößerung ist gleich dem Produkt aus der Vergrößerung des Objektivs und der des Okulars.

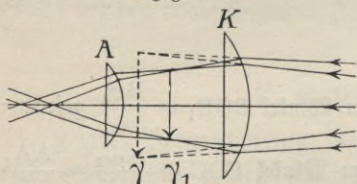
Fig. 256.



Der wichtigste Teil des Mikroskops ist das Objektiv, das aus mehreren Linsen zusammengesetzt wird, um auch für weit geöffnete Strahlenbüschel eine von sphärischer und chromatischer Abweichung freie, möglichst punktweise Abbildung zu erzielen.

Fig. 256 stellt einen Schnitt des Abbe'schen Objektivs in dreifacher Größe dar.

Fig. 257.



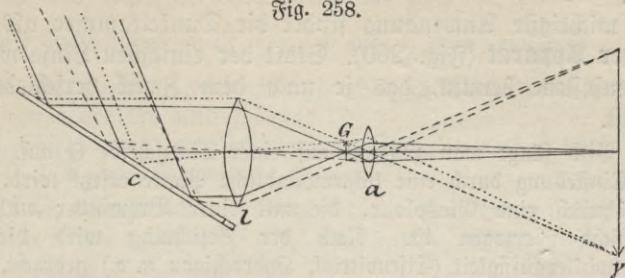
Das Okular (Huygens) besteht gewöhnlich aus zwei plankonvexen Linsen (Fig. 257), dem Kollektiv K und dem Augenglas A . Ehe das Bild γ entsteht, fängt das Kollektiv die vom Objektiv herkommenden Strahlen auf und erzeugt ein kleineres Bild γ_1 innerhalb der Brennweite des Augenglases. Dadurch wird zwar die Vergrößerung etwas vermindert, aber das Gesichtsfeld vergrößert und die Schärfe des Bildes erhöht.

Die Erfindung des Mikroskops fällt in die Zeit von 1600—1625.

§ 201. Das Sonnenmikroskop (Fig. 258) besteht aus einer Konvexlinse (a) von kleiner Brennweite, die von den kleinen Gegenständen, die man vor der Linse außerhalb der Brennweite anbringt, auf der weißen Wand eines verdunkelten Zimmers ein sehr vergrößertes Bild gibt. Da aber die von dem kleinen Gegenstande ausgehenden Strahlen auf eine große Fläche ausgebreitet werden, so muß

der Gegenstand sehr stark beleuchtet sein. Dies geschieht durch eine oder mehrere Konverglinsen l , die das von einem Planspiegel c auf sie

Fig. 258.



geworfene Sonnenlicht auf den Gegenstand vereinigen. Anstatt des Sonnenlichtes bedient man sich auch des Drummondschen Kalklichtes oder des elektrischen Lichtes.

Das Sonnenmikroskop wurde von Lieberkühn 1738 erfunden.

Fig. 259.

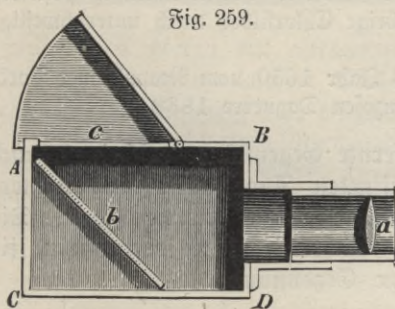
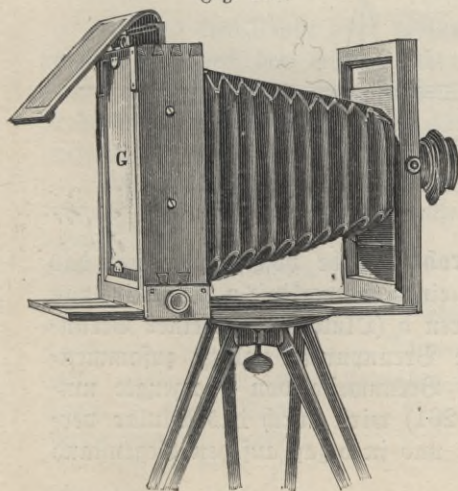


Fig. 260.



§ 202. Der Projektions- § 202.

apparat beruht auf demselben Prinzip wie das Sonnenmikroskop. Eine starke, möglichst punktförmige Lichtquelle ist in einem Gehäuse eingeschlossen, das in einem Rohransatz ein Beleuchtungssystem enthält. Es besteht dies aus 2—3 Konverglinsen von mindestens 10 cm Durchmesser und hat den Zweck, die von der Lampe divergent ausgehenden Lichtstrahlen in einen konvergenten Lichtkegel zu verwandeln, der das zu projizierende Objekt hell beleuchtet. Eine gewöhnliche Konverglinse oder bei stärkeren Vergrößerungen eine Linsenkombination entwirft von dem Gegenstand ein reelles, umgekehrtes und vergrößertes Bild auf einem weißen Schirm.

§ 203. Die Dunkelkammer § 203.

oder camera obscura (s. § 153) ist ein innen geschwärzter Kasten ABCD (Fig. 259), in dessen Vorderwand ein Rohrsteuzen eingesetzt ist, in dem sich ein zweites Rohr

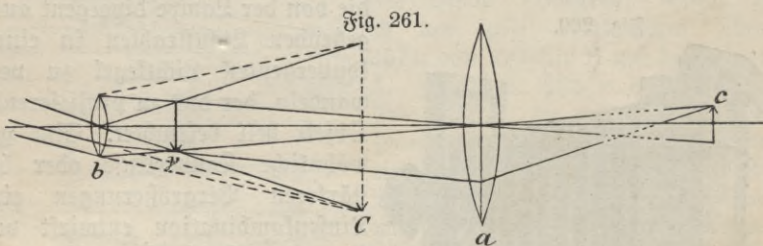
mit der Sammellinse a verschieben läßt. Die von a erzeugten Bilder werden von einem Planspiegel b auf eine horizontale Mattglasplatte c geworfen.

Die wichtigste Anwendung findet die Dunkelkammer als **photographischer Apparat** (Fig. 260). Statt der einfachen Linse wird hier ein Linsensystem benutzt, das je nach dem Zweck verschieden konstruiert ist.

Das Bild fängt man zunächst auf einer Mattscheibe G auf, die nach erfolgter Einstellung durch eine lichtempfindliche Platte ersetzt wird. Es ist dies gewöhnlich eine Glasplatte, die mit einer Bromsilber enthaltenden Gelatineschicht überzogen ist. Nach der Belichtung wird die Platte in die Entwicklerflüssigkeit (Eisenvitriol, Hydrochinon u. a.) gebracht, wo sich an den vom Licht getroffenen Stellen Silber in schwärzlicher Farbe ausscheidet (negatives Bild). Hierauf fixiert man das Bild, indem man die unzeretzten Salze in einer Lösung von unterschwefligsaurem Natron auswäscht. Die nun nicht mehr lichtempfindliche Platte legt man auf ein mit Chlor Silber überzogenes Papier und setzt sie dem Tageslicht aus; so schwärzen sich die Stellen, wo das Licht durch die Glastafel dringen kann — positives Bild —, und nun wäscht man das übrige Chlor Silber durch unterschwefligsaures Natron aus.

Die Linsenkamera wurde um das Jahr 1650 vom Neapolitaner Porta erfunden, die Lichtbilder von dem Franzosen Daguerre 1838.

§ 204. § 204. **Fernrohre.** Weit entfernte Gegenstände erscheinen, auch wenn sie groß sind, dem unbewaffneten Auge unter sehr kleinem Gesichtswinkel, so daß man Einzelheiten nicht erkennen kann. Die Fernrohre haben den Zweck, den Gesichtswinkel zu vergrößern, sie sind gleichsam Mikroskope für ferne Gegenstände.



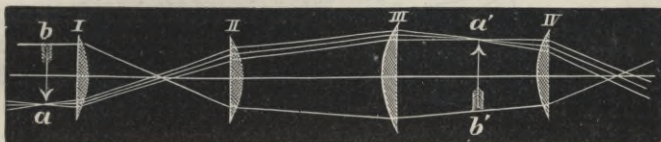
1. Das **astronomische Fernrohr** wurde von Kepler um das Jahr 1630 konstruiert. Es ist aus einer Konverlinse a (Objektiv) von großer Brennweite und einer anderen b (Okular) von kleiner Brennweite so zusammengesetzt, daß die Brennpunkte nahezu zusammenfallen. Das von a innerhalb der Brennweite von b erzeugte umgekehrte und reelle Bild γ (Fig. 261) wird durch das Okular vergrößert, so daß man das subjektive und in bezug auf den Gegenstand umgekehrte Bild C erblickt.

Sind f und f' die Brennweiten von Objektiv und Okular, a und a' die Gesichtswinkel, unter denen der Gegenstand einmal im Fernrohr, das andere Mal ohne Fernrohr vom Objektiv aus erscheint, und bezeichnet γ die Größe des Objektivbildes, so ist $\frac{\gamma}{f'} = a$ und $\frac{\gamma}{f} = a'$, mithin $V = \frac{a}{a'} = \frac{f}{f'}$. Die Vergrößerung ist demnach gleich dem Verhältnis der Brennweiten von Objektiv und Okular.

Als Objektiv wird eine achromatische Doppellinse (s. § 189) verwendet, als Okular z. B. das Huygenssche (Fig. 257).

2. Das terrestrische Fernrohr dient zur Betrachtung irdischer Gegenstände. Da man diese für gewöhnlich aufrecht sehen will, so

Fig. 262.

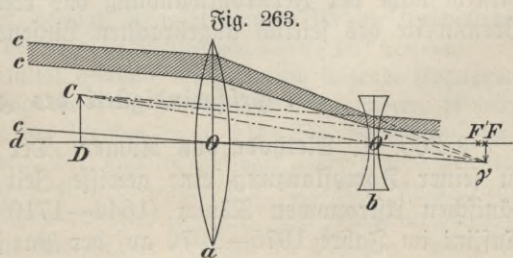


benutzt man hierzu ein astronomisches Fernrohr, bei dem zwischen Objektiv und Huygenschem Okular III IV (Fig. 262) ein bildumkehrendes Linsensystem I II eingeschaltet ist.

Stellt man auf einen Gegenstand ein, so bleiben die Linsen I—IV, die das terrestrische Okular bilden, in unveränderter Lage, nur das sie einschließende Rohr wird so verschoben, daß das vom Objektiv erzeugte, umgekehrte Bild ab innerhalb der Brennweite von I nahe an den Brennpunkt fällt. $a'b'$ ist das aufrechte Bild, von dem das Augenglas IV ein vergrößertes, subjektives und aufrechtes Bild entwirft. Das terrestrische Okular wirkt demnach wie ein zusammengesetztes Mikroskop. Es wurde 1645 von Schyrl (de Rheita) erfunden.

3. Das Galileische oder holländische Fernrohr (Sperngucker) erreicht den Zweck der Bildaufrichtung in einfacherer Weise wie das unter 2. beschriebene. Vor diesem hat es den Vorteil der kürzeren Rohrlänge voraus, doch ist es für starke Vergrößerungen weniger geeignet, da dann sein Gesichtsfeld sehr klein wird.

Es besteht aus dem konvergen Objektivglas a (Fig. 263) und dem konkaven Okularglas b , das sich innerhalb der Brennweite $OF = f$ des Objektivs befindet. Die von einem Punkte c des entfernten Gegenstandes ausgehenden und das Objektiv treffenden Strahlen würden durch dieses allein nach dem Punkte γ seiner Brennebene gebrochen werden. Die Linse b , deren Zerstreuungswerte $O'F' = f'$

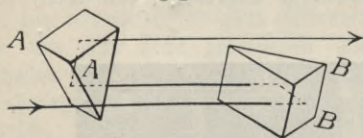


nur wenig kleiner als $O'F$ ist, bewirkt, daß die Strahlen schwach divergent das Fernrohr verlassen, als ob sie von C herkämen, so daß das Auge den Gegenstand aufrecht sieht. Die Vergrößerung ist $= \angle CO'D/cOd = FO'\gamma/FO\gamma \sim f/f'$.

Die Erfindung dieses Fernrohrs fällt in die Zeit von 1600—1610.

4. Das **Prismenfernrohr von Zeiß** ist ein astronomisches Fernrohr, bei dem die Bildaufrichtung durch eine vierfache Totalreflexion an zwei rechtwinkligen Glasprismen erzielt wird. Die brechenden Kanten AA und BB der beiden Prismen (Fig. 264) liegen senkrecht

Fig. 264.

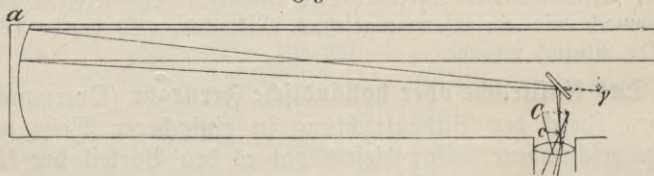


zueinander. Da der Gang des Hauptstrahles, wie aus der Figur ersichtlich, einen viermaligen Knick erfährt, so erhält das Fernrohr eine geringe Länge. Da außerdem die Okularachse parallel zur Objektivachse seitlich verschoben ist, so haben

die beiden Objektive eines Zeißschen Doppelfernrohrs einen beträchtlich größeren Abstand als die Okulare, wodurch die stereoskopische Wirkung, die auf dem Sehen mit zwei Augen beruht, außerordentlich verstärkt wird.

5. Bei den **Spiegelteleskopen** ist der wesentliche Teil ein Hohlspiegel, der in seiner Brennebene ein Bild von dem entfernten Gegenstande entwirft. Abweichend bei den verschiedenen Konstruktionen ist nur die Art, wie dieses Bild durch eine Okularlinse beobachtet wird.

Fig. 265.



Im Newtonschen Teleskop (1672) fallen die Lichtstrahlen, bevor sie sich zu dem Bilde γ vereinigen (Fig. 265), auf einen Planspiegel, der mit der Hohlspiegelachse einen Winkel von 45° bildet. Auf diese Weise entsteht nahe der Fernrohrwandung das reelle Bild c innerhalb der Brennweite des seitlich angebrachten Linsenokulars.

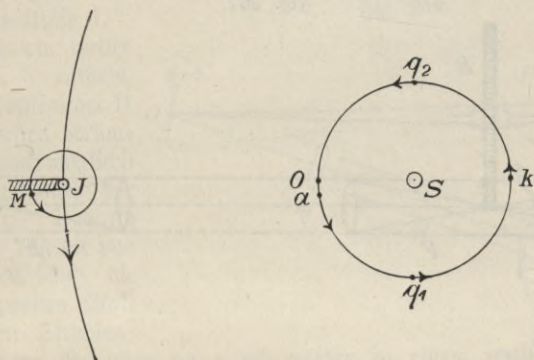
G. Geschwindigkeit des Lichtes.

§ 205. § 205. 1. **Methode von Römer.** Der Nachweis, daß das Licht zu seiner Fortpflanzung eine gewisse Zeit braucht, ist zuerst dem dänischen Astronomen Römer (1644—1710) gelungen. Als er und Cassini im Jahre 1675—1676 auf der Pariser Sternwarte mit einer

Untersuchung über die Umlaufzeiten der Jupitermonde beschäftigt waren, fiel ihnen eine merkwürdige Veränderung dieser Zeit auf, die im Zusammenhang mit der jährlichen Bewegung der Erde stand.

In Fig. 266 sei S die Sonne, der um S gezogene Kreis oq_1kq_2 die Erdbahn, J der Jupiter und M sein erster Trabant. Beobachtet man um die Zeit der Opposition, wenn die Erde etwa in a ist, zwei aufeinander folgende Austritte des Mondes M aus dem Kernschatten des Jupiter, so findet man die dazwischen liegende Zeit $t = 42$ Std. 28 Min. 36 Sek., und das ist die richtige synodische Umlaufzeit des Mondes. Das gleiche Resultat ergibt sich, wenn man kurz nach der Konjunktion die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Eintritten bestimmt. Dagegen scheint die Umlaufzeit etwas länger zu sein, wenn die Erde sich bei q_1 befindet, und um ebensoviel kürzer bei der Erdstellung q_2 . Römer vermutete richtig den Grund dieser Erscheinung in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes.

Fig. 266.



Zur Zeit der Opposition und Konjunktion bewegt sich die Erde fast parallel der Jupiterbahn, sie wird sich also während eines Mondumlaufs weder merklich von ihr entfernen noch ihr nähern. In den Stellungen q_1 und q_2 dagegen bewegt sich die Erde fast senkrecht zur Jupiterbahn, und da sie in 1 Sek. etwa 4 Meilen zurücklegt, so hat sie sich bei q_1 in 42,5 Std. um rund $6 \cdot 10^5$ Meilen vom Jupiter entfernt, bei q_2 sich ihm um ebensoviel genähert. Die Umlaufzeit des Mondes muß demnach um so viel Sekunden vergrößert oder verkürzt erscheinen, wie das Licht zur Zurücklegung von $6 \cdot 10^5$ Meilen braucht. Da der Unterschied der in q_1 und q_2 beobachteten Umlaufzeiten etwa 30 Sek. beträgt, so folgt hieraus für die Geschwindigkeit des Lichtes der Wert von $4 \cdot 10^4$ Meilen/sec. = $3 \cdot 10^5$ km/sec.

Zu einem gleichen Resultat gelangte Römer durch folgende Überlegung.

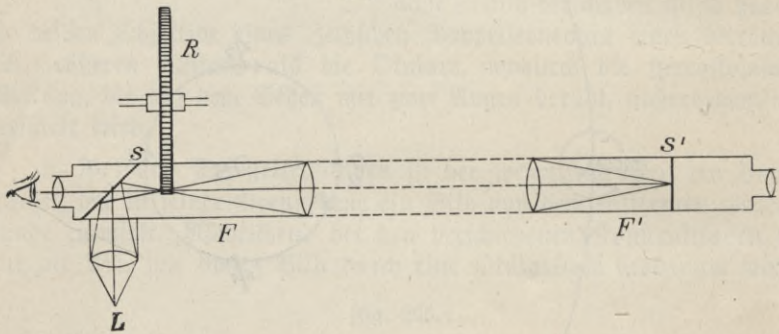
Würde sich die Stellung der Erde zum Jupiter nicht ändern, so müßte man n Aus- oder Eintritte des Mondes in $(n-1)t$ Std. beobachten. Zählt man als ersten Austritt den, der unmittelbar nach einer Opposition stattfindet, wenn die Erde in a ist, so müßte z. B. der 101. Austritt nach $100t$ Std. = 176 Tg. 23 Std. 40 Min. erfolgen. Tatsächlich verspätete sich aber der so vorausberechnete Austritt um ungefähr 15 Minuten. Diese Zeit,

so schloß Römer, braucht das Licht zum Durchlaufen der Strecke, um die die Erde nach 100 t Std. vom Jupiter weiter absteht als in a. Ist im einfachsten Falle diese Strecke gleich dem Durchmesser der Erdbahn ($4 \cdot 10^7$ Meilen), so beträgt die Verspätung rund 1000 Sek. In 1 Sek. durchläuft also das Licht $4 \cdot 10^4$ Meilen = $3 \cdot 10^5$ km. Auf Grund neuerer Beobachtungen ergibt sich der Wert 298300 km/sec.

2. Methode von Fizeau. Die Lichtgeschwindigkeit für irdische Lichtquellen hat zuerst Fizeau (1849) durch ein sinnreiches Verfahren bestimmt. Zur Erläuterung seiner Versuche dient Fig. 267.

Zwei Fernrohre sind in der Entfernung von a km so aufgestellt, daß durch jedes das Objektiv des anderen gesehen werden kann. Nach erfolgter Einstellung befestigt man senkrecht zur optischen Achse in dem einen Fernrohr F' einen ebenen Spiegel s' in der Brennebene des Objektivs. Im

Fig. 267.



anderen Fernrohr F wird von einer seitlich aufgestellten starken Lichtquelle L durch eine Sammellinse und eine unter 45° zur Fernrohrachse geneigte, unbelegte Spiegelglasplatte s ein reelles Bild im Brennpunkt des Objektivs entworfen. In der zur Achse senkrechten Ebene dieses Punktes ist das Fernrohr durchbrochen und eine zahnradartige Scheibe R so angebracht, daß der Brennpunkt zwischen den Zähnen liegt. Bei ruhig stehender Scheibe erblickt man durch das Okular dieses Fernrohrs ein Bild der Lichtquelle. Das Licht legt hierbei einen Weg von $2a$ km zurück. Wird die Scheibe mittelst eines Uhrwerks gedreht, so sieht man zunächst auch noch das Bild, es wird aber allmählich mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit lichtschwächer, bis bei einer gewissen Geschwindigkeit das Gesichtsfeld völlig dunkel ist. Dieser Fall tritt ein, wenn das Licht, das durch eine Zahnücke nach dem Spiegel s' und von da zurück ins Fernrohr F gegangen ist, auf den nächstfolgenden Zahn trifft, das Zahnrad sich also in dieser Zeit um eine Zahnbreite gedreht hat. Vergrößert man die Umdrehungsgeschwindigkeit, so wird das Bild der Lichtquelle wieder sichtbar und erreicht bei doppelter Geschwindigkeit seine größte Helligkeit. Bei der dreifachen Geschwindigkeit verschwindet das Bild abermals.

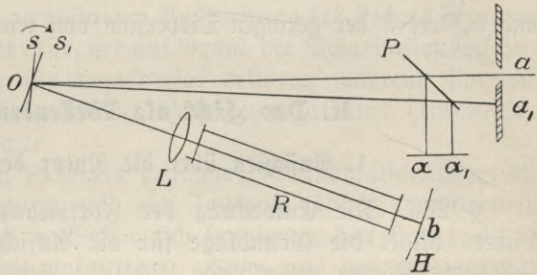
Macht das Zahnrad, wenn das Bild zum ersten Male verschwindet, n Umdrehungen in 1 Sek., und ist z die Anzahl der Zähne, so legt das Licht in $\frac{1}{2nz}$ Sek. den Weg $2a$ km zurück, also in 1 Sek. $4anz$ km. Bei den Fizeauschen Versuchen war $a = 8,633$ km, $z = 720$ und $n = 12,6$, also ist $c = 4 \cdot 8,633 \cdot 12,6 \cdot 720 = 313 \cdot 10^3$ km/sec. Cornu, der ein verfeinertes Verfahren zur Messung der Zahnradgeschwindigkeit anwandte, fand für c den Wert von rund $300 \cdot 10^3$ km/sec.

3. Die von Foucault (1854) benutzte Methode ist prinzipiell besonders wichtig, da sie gestattet, auch die Geschwindigkeit des Lichtes in anderen Mitteln als Luft zu bestimmen. Die Fig. 268 zeigt schematisch das Wesentliche der Versuchsanordnung.

Durch den vertikalen Spalt a dringt ein Bündel horizontal gerichteter Sonnenstrahlen und fällt auf einen kleinen Spiegel s , der bei der gezeichneten Stellung das Licht nach einer Sammellinse L

Fig. 268.

wirft, so daß ein reelles Spaltbild bei b entsteht. Hier ist ein Hohlspiegel H aufgestellt, dessen Krümmungsmittelpunkt möglichst in den Mittelpunkt der Linse L fällt. Dadurch wird bewirkt, daß die von H reflektierten und die Linse zum zweiten Male durchgehenden Strahlen



nach abermaliger Reflexion an s sich wieder zu einem reellen Bilde vereinigen, das mit dem beleuchteten Spalt a zusammenfällt. Um dieses Bild beobachten zu können, wird vermitteltst einer unbelegten Spiegelglasplatte P ein Teil des zurückkehrenden Lichtes nach a reflektiert und hier auf einer Mattscheibe aufgefangen. Läßt man den Spiegel s in der Pfeilrichtung um die zur Zeichenebene senkrechte Achse o rasch rotieren, so wird bei jeder Umdrehung, wenn der Spiegel die Lage s erreicht, blitzartig ein Spaltbild auf die Mattscheibe geworfen. Bei mehr als 10 Umdrehungen in 1 Sek. setzen sich die Lichteindrücke für den Beobachter zu einem einzigen Bilde zusammen, und bei einer genügend großen Umdrehungszahl (800 in 1 Sek.) erscheint dieses Bild um eine meßbare Strecke von a nach a_1 verschoben. Während nämlich das Licht von o nach H und wieder zurück nach o gelangt, hat sich der Spiegel aus der Lage s um einen sehr kleinen Winkel in die Lage s_1 gedreht, der Strahl oa also um den doppelten Winkel nach oa_1 (s. § 157). Aus der Verschiebung $aa_1 = aa_1$ und der Entfernung oa ergibt sich der Winkel $aoa_1 = 2\alpha$ und aus $\angle \alpha$ und der Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels die Zeit, in der das Licht die doppelte Strecke ob zurücklegt. Foucault fand auf diese Weise die Lichtgeschwindigkeit in Luft gleich $298 \cdot 10^3$ km/sec. Um die Geschwindigkeit im Wasser zu bestimmen, schaltete er zwischen L und H ein mit Wasser

gefülltes, 2 m langes Rohr R ein. Aus der nun beobachteten größeren Verschiebung des Spaltbildes folgte das wichtige Resultat, daß sich das Licht im Wasser langsamer fortpflanzt als in Luft.

Michelson, der durch eine etwas abgeänderte Versuchsanordnung die Genauigkeit der Methode erhöhte, wies für Wasser und Schwefelkohlenstoff nach, daß das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit in Luft zu der in einem anderen Mittel gleich dem Brechungsquotient n_{LM} dieses Mittels bezogen auf Luft ist. Da der Brechungsquotient beim Übergang des Lichtes aus dem Vakuum in Luft 1,00029 beträgt, so muß die Lichtgeschwindigkeit im Weltenraum dem entsprechend etwas größer als in Luft sein.

Daß in ein und demselben, normal dispergierenden Mittel rotes Licht sich rascher fortpflanzt als violettes, folgt aus der verschiedenen Brechbarkeit dieser Strahlen. Michelson hat die Folgerung $c_r = c_v \cdot \frac{n_v}{n_r}$ durch den Versuch bestätigt. In Luft ist der Unterschied von c_r und c_v wegen der geringen Dispersion von keiner praktischen Bedeutung.

H. Das Licht als Wellenbewegung.

1. Ansichten über die Natur des Lichtes.

§ 206. § 206. Die Entdeckung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes bildet die Grundlage für die Ansicht, daß das von einem sichtbaren Körper ausgehende Licht ein Bewegungsvorgang sei. Wie bereits in der Wellenlehre unter „Fernwirkungen“ (§ 94) auseinandergesetzt wurde, können wir uns diesen Vorgang entweder so vorstellen, daß das Licht selbst etwas Stoffliches wäre, das die leuchtenden Körper ausschleudern, oder wir können annehmen, das Licht pflanze sich in einem den Raum erfüllenden Mittel — dem Äther — von Teilchen zu Teilchen fort, etwa wie der Schall in der Luft.

Für die erste Ansicht, die sogenannte Emissionshypothese, spricht die große Einfachheit, mit der sie die optischen Grunderscheinungen, wie die geradlinige Ausbreitung, das Vorhandensein von Strahlen und Schatten, die Gesetze der Reflexion und unter gewissen Annahmen auch die der Brechung erklärt. Doch bereits Newton, der gewöhnlich als Urheber dieser Hypothese genannt wird, kannte Erscheinungen, die sich aus ihr ohne grundlegende Änderungen nicht ableiten lassen. Die Untersuchung der Farben dünner Blättchen führte ihn zu der Erkenntnis, daß ein Lichtstrahl nicht bloß der Weg sich geradlinig bewegender Lichtteilchen sein könnte. Indem er den Strahlen die Eigenschaft einer sich periodisch ändernden Struktur beilegte, brachte er das Tatsächliche, durch die Beobachtung Gegebene der Lichtausbreitung zum

Ausdruck, das auch den Kernpunkt der Undulationshypothese und der gegenwärtig herrschenden Ansicht über das Wesen des Lichtes bildet.

Trotzdem verhielt sich Newton ablehnend gegen die Annahme seines Zeitgenossen Huygens von der Wellennatur des Lichtes, da er die geradlinige Ausbreitung und die daraus folgende Schattenbildung durch undurchsichtige Körper für unvereinbar ansah mit den bekannten Gesetzen einer wellenförmigen Bewegung. Wie die Wasserwellen von mächtigen Felsen selbst nicht vollständig aufgehalten würden, sondern sich auch hinter ihnen weiter ausbreiten, wie der Schall sich um die Ecke fortpflanzt, so, meinte Newton, müßten sich auch Lichtwellen um undurchsichtige Gegenstände herumbeugen, es könnte also keine Schatten geben.

Huygens selbst hat nicht vermocht, diese Schwierigkeit auf Grund seines Prinzips (§ 100) in einwandfreier Weise zu beseitigen. Das gelang erst über ein Jahrhundert später Fresnel, indem er das Huygenssche Prinzip in Verbindung mit dem Interferenzprinzip zur Erklärung der scheinbar geradlinigen Ausbreitung des Lichtes heranzog (§ 100). Er war auch der erste, der auf Grund der Polarisationerscheinungen die Lichtwellen für transversal erklärte, während sie noch Thomas Young, der Entdecker des Interferenzprinzips (1802), für longitudinal gehalten hatte.

Durch die Arbeiten Fresnels gelangte die Undulationshypothese allmählich zur Anerkennung, und als Foucault (1854) experimentell nachwies, daß das Licht in Wasser sich langsamer fortpflanzt als in Luft, war ihre Herrschaft unbestritten. Denn aus der Huygensschen Hypothese folgt dieses Resultat mit Notwendigkeit (s. § 101b), nach der Emissionshypothese hätte das Umgekehrte der Fall sein müssen.

Allerdings zeigten sich auch bei der Undulationshypothese noch gewisse Schwierigkeiten, die nicht zu beseitigen waren, solange man die periodischen Zustandsveränderungen im Äther für elastische Schwingungen erklärte. Feste elastische Körper können, wie z. B. die Erscheinungen des Schalles zeigen, sowohl transversale wie longitudinale Schwingungen fortpflanzen, Flüssigkeiten und Gase dagegen nur longitudinale.

Nun zwingen die Polarisationerscheinungen zu der Annahme, daß die Störungen im Äther senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung erfolgen, während keine einzige Erscheinung bisher bekannt geworden ist, die das Vorhandensein longitudinaler Ätherschwingungen wahrscheinlich machte. Elastische Schwingungen von lediglich transversaler Natur kann aber nur ein solcher fester Körper ausführen, bei dem Volumenänderungen seiner Teilchen ausgeschlossen sind. Wir müßten dem Äther die Eigenschaften eines festen und vollkommen unzusammendrückbaren Körpers beilegen. Hiergegen aber spricht die reibungslose Bewegung der Gestirne.

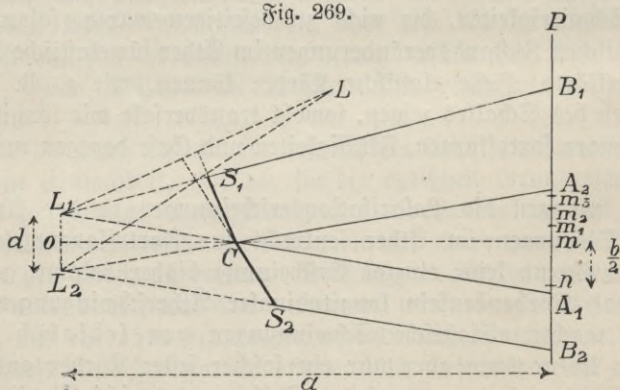
Die neueren Ansichten über das Wesen des Lichtes, die zuerst von Faraday ausgesprochen, von Maxwell theoretisch und von Herz experimentell begründet wurden, stützen sich auf die Hypothese, daß die Lichtwellen im freien Äther nicht elastischer, sondern elektromagnetischer Natur sind. Die Gründe für diese Annahme können erst später (s. § 333 u. 334) besprochen werden.

2. Interferenz und Beugung.

§ 207. § 207. Die Berge und Täler zweier Wasserwellen oder die Verdichtungen und Verdünnungen zweier Luftwellen können sich so übereinanderlagern, daß sie durch Interferenz (§ 99, 117) ihre Wirkungen gegenseitig verstärken oder schwächen und unter gewissen Umständen selbst vollständig vernichten. Da man beim Licht ähnliche Erscheinungen beobachtet und insbesondere es sich zeigt, daß Licht zu Licht gefügt auch Dunkelheit hervorrufen kann, so ist damit die Wellennatur des Lichtes erwiesen. Die Frage, ob diese Wellen auf elastischen oder elektromagnetischen Eigenschaften des durchstrahlten Mittels beruhen, wird dadurch nicht entschieden und kann auch vorläufig unerledigt bleiben, da von ihrer Beantwortung die Anwendbarkeit der Grundgesetze der Wellentheorie (§§ 94—102) auf die Ausbreitung des Lichtes nicht abhängt.

Sollen sich beim Licht Interferenzen beobachten lassen, so müssen die Strahlen von ein und demselben reellen Lichtpunkte ausgegangen sein. Nur in diesem Falle treffen sie an einer zweiten Stelle mit konstant bleibender Phasendifferenz zusammen. Für zwei verschiedene Punkte derselben Flamme ändert sich selbst bei homogenem Licht die Phasendifferenz innerhalb sehr kurzer Zeit.

Fig. 269.



a) Beim **Fresnel'schen Spiegelversuch** werden von einem beleuchteten Spalt L (Fig. 269) durch zwei vertikale Spiegel OS_1 und OS_2 , die fast genau einen Winkel von 180° miteinander bilden und deren gemeinsame

Kante C parallel dem Spalt ist, zwei subjektive Bilder L_1 und L_2 erzeugt. Fängt man die reflektierten Strahlen mit einer Mattscheibe P auf, so erblickt man, wenn L durch homogenes Licht beleuchtet ist, auf dem Teil A_1A_2 von P, der Licht von beiden Spiegeln erhält, vertikale, abwechselnd helle und dunkle Streifen. Nach dem Punkte m, der von L_1 und L_2 gleichweit entfernt ist, gelangen zwei Strahlen, die gleiche Wege durchlaufen haben, hier treffen also stets zwei Schwingungen von gleicher Phase zusammen und verstärken sich. Da dasselbe für die vertikal über oder unter m liegenden Punkte gilt, so entsteht hier ein heller Streifen. Dagegen müssen in einem Punkte m_1 , dessen Entfernungsdifferenz von L_1 und L_2 eine halbe Wellenlänge $= \frac{\lambda}{2}$ beträgt, stets zwei Schwingungen ankommen, die sich in entgegengesetzter Phase befinden, die sich also aufheben, so daß wir bei m_1 einen dunklen Streifen wahrnehmen. An der Stelle m_2 entsteht wieder ein heller Streifen, wenn $L_2m_2 - L_1m_2 = 2 \frac{\lambda}{2}$ ist, dagegen bei m_3 ein dunkler, wenn die Wegdifferenz $3 \frac{\lambda}{2}$ beträgt.

Es sei $d = L_1L_2$ der Abstand der beiden subjektiv gesehenen Lichtlinien L_1 und L_2 , $a = mo$ die Entfernung der Mattscheibe von L_1L_2 und $\frac{b}{2}$ der Abstand irgend eines dunklen Streifens n von m. Aus $L_1n^2 = a^2 + \left(\frac{b+d}{2}\right)^2$ und $L_2n^2 = a^2 + \left(\frac{b-d}{2}\right)^2$ folgt $(L_1n + L_2n)(L_1n - L_2n) = bd$,

oder, weil $L_1n + L_2n$ sehr wenig von $2a$ verschieden und $L_1n - L_2n = \frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}$ usw. ist,

$$\frac{b}{2} = \frac{a}{d} \cdot \frac{\lambda}{2'} \cdot \frac{a}{d} \cdot \frac{3\lambda}{2'} \cdot \frac{a}{d} \cdot \frac{5\lambda}{2'} \text{ usw.}$$

Zwei benachbarte dunkle Streifen sind demnach stets um $\frac{a}{d} \lambda = b$ voneinander entfernt. Da die Größen a, b, d der Messung zugänglich sind, so läßt sich die Wellenlänge $\lambda = \frac{bd}{a}$ des homogenen Lichtes bestimmen, das den Spalt L beleuchtet.

Je nach der Farbe des Lichtes sind die Abstände der dunklen Streifen verschieden. Sie sind am größten für rotes, am kleinsten für violettes Licht. Stellt man also den Versuch mit weißem Licht an, so überlagern sich die den verschiedenen Farben entsprechenden Interferenzbilder, und es erscheinen farbige Streifen rechts und links von dem mittleren weißen m.

Durch den Fresnelschen Spiegelversuch lernen wir ein neues unterscheidendes Merkmal für verschieden gefärbtes Licht kennen: Die Wellenlänge. Aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit c und der Wellenlänge λ ergibt sich die Anzahl der Schwingungen in 1 Sek. $n = \frac{c}{\lambda}$. Für die verschiedenen Farben, die durch die Lage der Fraunhofer'schen

Linien (§ 187,₃) im Spektrum angegeben werden, hat man folgende Werte ermittelt:

	A	D	F	H
λ in 10^{-6} mm	760	589	486	397
n in Billionen	395	509	617	756.

Von der Schwingungszahl oder Wellenlänge hängt beim Schall die Tonhöhe, beim Licht die Farbe ab. Der Ausdruck Farbenton ist deshalb sehr bezeichnend. Das Intervall vom tiefsten bis zum höchsten Tone, den das Ohr noch wahrnimmt, beträgt etwa 11 Oktaven. Das Auge ist für Lichtschwingungen nur innerhalb einer Oktave empfindlich. Auf 0,1 mm oder auf die Dicke eines starken Haares gehen 135 Wellen des äußersten Rot und 270 des äußersten Violett im Sonnenspektrum. Die Luftwellenlängen eines wahrnehmbaren Tones liegen zwischen 21 m und 8 mm.

b) **Farben dünner Blättchen.** Durchsichtige Substanzen, die in dickeren Schichten farblos sind, erscheinen in sehr dünnen Schichten lebhaft gefärbt, z. B. Seifenblasen, Ölschichten auf Wasser, Glas- kugeln, die man bis zum Zerspringen aufgeblasen hat, Drydhschichten, die sich beim Erhitzen blanker Metalle bilden, usw. Alle diese Erscheinungen erklären sich durch Interferenz der an der vorderen und hinteren Schichtgrenze reflektierten Strahlen.

Fig. 270.

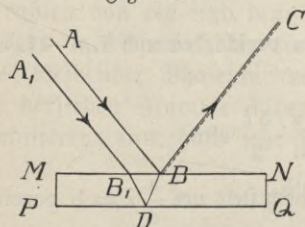
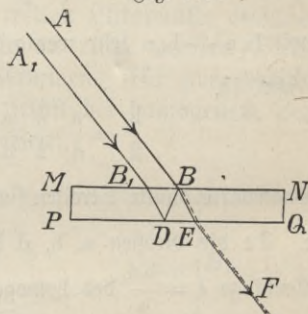


Fig. 271.



Auf die überall gleich dünne Glasplatte MNPQ (Fig. 270) falle ein Bündel parallelen Lichtes von homogener Farbe. Ein Teil des Lichtes wird an der Vorderfläche MN zurückgeworfen, der andere Teil wird gebrochen und an der hinteren Fläche wiederum reflektiert und gebrochen. Ist BC der zu AB gehörige reflektierte Strahl, so gibt es stets einen zweiten Strahl A_1B_1 , der im Glase den Weg B_1DB zurücklegt und sich beim Austritt über den ersten Strahl BC lagert, mit dem er zur Interferenz gelangt. Zu dem Gangunterschied, der durch die verschiedenen Wege bedingt wird, ist noch $\frac{\lambda}{2}$ hinzuzufügen wegen der Reflexion des Strahles AB am dichteren Mittel (§ 101a). Je nach der Richtung der auffallenden Strahlen und der Dicke

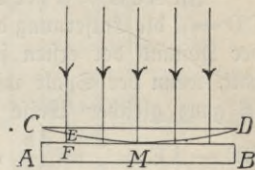
der Platte erscheint diese mehr oder weniger hell und bei völliger Vernichtung der Strahlen sogar dunkel.

Im weißen Licht tritt bei hinreichender Dünne des Glases die Auslöschung einer oder mehrerer Farben stets ein, und wir sehen deshalb das Glas gefärbt.

Ein Blättchen, das bei der Beobachtung im reflektierten weißen Licht violett aussieht, erscheint im durchgelassenen Licht gelb, also komplementär gefärbt. Die Fig. 271 macht dies klar. Es interferieren hier die Strahlen $ABEF$ und A_1B_1DBEF . Der durch die verschiedenen Wege veranlaßte Gangunterschied ist zwar derselbe wie im ersten Falle (Fig. 270), da aber nun keine Reflexion am dichteren Mittel stattfindet, so besteht tatsächlich eine Differenz von $\frac{\lambda}{2}$. Deshalb wird das violette durchgehende Licht besonders geschwächt, das gelbe aber verstärkt.

Newton untersuchte ähnliche Erscheinungen an einer Luftschicht, die von einer ebenen Spiegelglasplatte AB und einer sehr schwach gekrümmten Konvexlinse CD begrenzt war (Fig. 272). Die Dicke EF der Schicht an einer bestimmten Stelle läßt sich aus dem Krümmungsradius der Linse und dem Abstand MF berechnen. Im homogenen reflektierten Licht erblickt man an der Berührungsstelle der Gläser einen dunklen Fleck, der abwechselnd von hellen und dunklen Ringen umgeben ist (Kurven gleicher Dicke). Die dunklen Ringe entstehen da, wo die Schichtendicke ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt. Die Durchmesser der Ringe sind um so größer, je größer die Wellenlänge des angewendeten Lichtes ist. Im weißen Licht entstehen farbige Ringe um den dunklen Fleck. Wie erklären sich diese Erscheinungen? Warum ändert sich das Interferenzbild im durchgelassenen Licht? Warum sind bei einem ebenen, vertikal gehaltenen Seifenhäutchen die Kurven gleicher Dicke horizontale Streifen?

Fig. 272.



§ 208. **Beugung des Lichtes.** Die Farben dünner Blättchen und § 208. die beim Fresnel'schen Spiegelversuch beschriebenen Interferenzen gehören zu den reinen, wo lediglich durch regelmäßige Reflexionen und Brechungen die Strahlen von ihrer ursprünglichen Richtung so abgelenkt werden, daß sie interferieren können. Unter Beugung oder Diffraktion des Lichtes versteht man Erscheinungen, bei denen Strahlen eines leuchtenden Punktes nahe an Kanten undurchsichtiger Körper vorbeigehen und dadurch eine solche Richtungsänderung erfahren, daß sie zur Interferenz gelangen. Bei Schall- und Wasserwellen sind Beugungsercheinungen etwas Alltägliches, da meistens die Länge dieser Wellen im Vergleich zur Größe des beugenden Körpers nicht verschwindend klein ist. Auf der außerordentlich geringen Länge der Lichtwellen beruht es, daß Beugungen des Lichtes für gewöhnlich nur

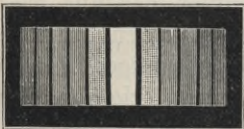
an sehr schmalen undurchsichtigen Körpern und beim Durchgange durch sehr enge Öffnungen beobachtet werden.

a) **Beugung an einem schmalen Körper.** In den Gang der Sonnenstrahlen, die ein Heliostat durch einen engen senkrechten Spalt in das verdunkelte Zimmer wirft, wird eine dünne Stricknadel, 1—2 m vom Spalt entfernt, vertikal aufgestellt und etwa 2—4 m dahinter eine Mattgläserplatte. Man sieht dann auf dieser im Schatten der Nadel zu beiden Seiten eines hellen Mittelstreifens eine Reihe heller und dunkler Streifen. Würde das Licht sich genau geradlinig fortpflanzen, so müßte der geometrische Schatten tiefschwarz erscheinen. Der Versuch zeigt, daß Strahlen in den Schatten hineingebeugt werden. Man kann der Nadel von beiden Seiten undurchsichtige Schirme, deren Kanten parallel der Nadel laufen, fast bis zur Berührung nähern, ohne daß die Lage der hellen und dunklen Streifen sich ändert. Sie entstehen also durch Interferenz der Strahlen, die rechts und links dicht am Nadelrande eine Beugung erfahren.

Ist $ACB = d$ der Durchmesser der Nadel (Fig. 273), $CD = a$ die Entfernung der Mattscheibe von ihr, $EE_1 = b$ der Abstand der ersten schwarzen Streifen, die man erhält, wenn der Spalt mit einem einfarbigen Glase bedeckt wird, so läßt sich in ganz gleicher Weise wie beim Spiegelversuch (§ 207 a) nachweisen, daß $BE - AE = \frac{\lambda}{2} = \frac{db}{2a}$, also $\lambda = \frac{bd}{a}$ sein muß.

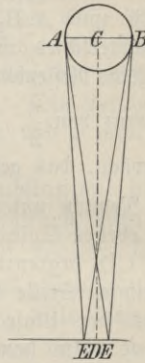
b) **Beugung durch einen Spalt.** Statt der Stricknadel im vorhergehenden Versuch stellt man in den Gang des Strahlenbündels, das den Heliostatenspalt S_1 durchsetzt hat, einen zweiten Spalt S_2 und läßt die Strahlen wieder auf eine genügend entfernte Mattscheibe fallen. Bei weiter Öffnung von S_2 ist das aufgefangene Spaltbild von S_1 ziemlich scharf begrenzt, wie es bei einer geradlinigen Ausbreitung des Lichtes sein muß. Hiermit stimmt auch noch die weitere Erscheinung, daß bei einer Verengung von S_2 zunächst auch das Spaltbild schmaler wird. Fährt man aber mit der Verengung von S_2 fort, so erreicht man bald eine Grenze, von der ab das Spaltbild rasch an Breite zunimmt. Hat man den Heliostatenspalt mit einem einfarbigen Glase bedeckt, so entsteht die in Fig. 274 wiedergegebene Erscheinung: ein breites Lichtband, dessen Helligkeit von der Mitte nach den Seiten zu rasch abnimmt und das von vertikalen, schwarzen Streifen durchzogen ist. Je enger man den Spalt S_2 macht, desto weiter rücken die schwarzen Streifen auseinander. Ihr Abstand ändert sich auch

Fig. 274.



mit der Wellenlänge des benutzten Lichtes und ist für Rot am größten, für Violett am kleinsten. Bei Anwendung weißen Lichtes ist das mittlere, helle Rechteck farblos; die Rechtecke links und rechts davon erscheinen vielfarbig und sind durch lichtschwächere, farbige Streifen getrennt.

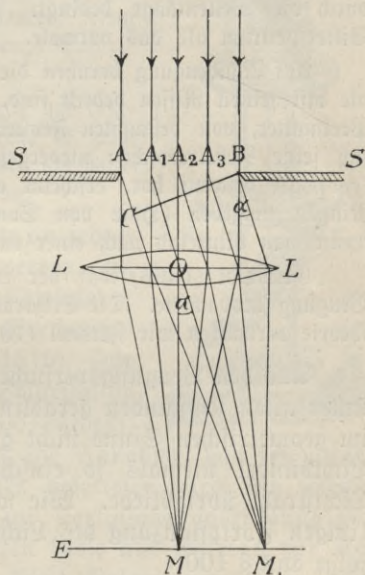
Fig. 273.



Objektiv lassen sich Beugungserscheinungen wegen ihrer Lichtschwäche nur im verdunkelten Zimmer wahrnehmen. Subjektiv kann man sie viel leichter beobachten. Hält man z. B. einen engen Spalt vor das Auge und blickt nach einer schmalen Lichtquelle, etwa der Flamme eines Schwalbenschwanzbrenners oder einer Kerze, so sieht man rechts und links davon eine Reihe farbiger Streifen. Diese Methode hat **Fraunhofer** verbessert. Man bringt hinter den beugenden Spalt, auf den senkrecht ein paralleles Strahlenbündel fällt, das Objektiv eines auf Unendlich eingestellten Fernrohrs. Die in der Brennebene entstehende Beugungserscheinung sieht man dann vergrößert durch das Okular.

Es sei S der beugende Schirm, $AB = d$ die Spaltbreite, L das Objektiv, O sein optischer Mittelpunkt und E seine Brennebene (Fig. 275). Da die Wellenflächen des einfallenden Strahlenbündels Ebenen sind, die senkrecht zur Strahlenrichtung stehen (§ 101b), so ist die Phasendifferenz für alle Punkte $A, A_1, A_2, A_3 \dots B$ der Spaltöffnung in jedem Augenblick gleich Null. Nach dem Fresnelschen Prinzip (§ 100) setzt sich die Lichtwirkung in irgend einem Punkte hinter dem Spalt aus den Lichtwirkungen zusammen, die jeder einzelne Punkt $A, A_1, A_2 \dots B$ dort hervorruft. Wir beschränken die Betrachtung auf die Punkte der Schnittgeraden von Brenn- und Zeichenebene. Die in der Einfallsrichtung fortschreitenden Strahlen werden von dem Objektiv nach M gebrochen, wo sie mit der Phasendifferenz Null interferieren, da die Linse keinen Gangunterschied bewirkt. In dem seitlich gelegenen Punkte M_1 werden von L nur die Strahlen vereinigt, die parallel der Nebenachse M_1OA_1 auf die Linse fallen (s. Fig. 229), und diese Strahlen interferieren in M_1 mit demselben Gangunterschiede, den sie vorher in einer zu A_1O senkrechten Ebene, z. B. BC , hatten. Zerlegt man die Spaltbreite d so in n gleiche

Fig. 275.



Teile $AA_1, A_1A_2, A_2A_3, A_3B$, daß $AC = n \frac{\lambda}{2}$ ist, so heben sich stets für die Wellenlänge λ die Lichtwirkungen zweier benachbarten Teile auf, und es muß bei Anwendung homogenen Lichtes in M_1 Dunkelheit herrschen, wenn n eine gerade Zahl, also $AC = \lambda, 2\lambda, 3\lambda \dots$ ist; dagegen bleibt die Wirkung von einem einzigen Teile übrig für $n = 3, 5, 7 \dots$. Man erblickt deshalb rechts und links von der hellen Mitte abwechselnd dunkle und helle Streifen,

deren Intensität rasch abnimmt. Bilden die gebeugten Strahlen mit der ursprünglichen Fortschreitungsrichtung den Winkel α , so ist $AC = d \sin \alpha$. Die Winkel α , für die $\sin \alpha = \frac{\lambda}{d}, \frac{2\lambda}{d}, \frac{3\lambda}{d} \dots$ wird, bestimmen die Lage der dunklen Streifen.

Von Wichtigkeit für die genaue Messung von Wellenlängen ist die Beugungserscheinung, die ein aus sehr vielen Spalten bestehendes Gitter liefert. Man stellt solche Gitter z. B. dadurch her, daß man auf Glas parallele Linien in genau gleichem Abstände mit dem Diamanten einrißt. Die feinsten Glasgitter enthalten bis 400 Linien auf einen Millimeter. Geht homogenes Licht durch ein solches Gitter, so besteht das Beugungsbild aus einzelnen, gleichweit voneinander entfernten Lichtlinien, deren Helligkeit nach den Seiten zu abnimmt. Verschiedenfarbige Strahlen werden proportional ihrer Wellenlänge abgelenkt. Bei Beleuchtung mit weißem Licht erscheinen deshalb rechts und links von dem mittleren weißen Spaltbilde eine Reihe kontinuierlicher Spektren. Während bei einem durch Brechung erzeugten Spektrum die Ausdehnung der Farben wesentlich von der Prismensubstanz abhängt, ist im Gitterspektrum die Verteilung der Farben allein durch die Wellenlänge bedingt. Aus diesem Grunde bezeichnet man das Gitterspektrum als das normale.

Auf Lichtbeugung beruhen die Farbenercheinungen an polierten Platten, die mit feinen Rissen bedeckt sind, die Farben der Schmetterlingsflügel, von Perlmutter, von bestaubten Fensterscheiben. Durch eine Glasplatte, auf der sich feine Nebeltröpfchen niedergeschlagen haben oder die man mit semen *lycopodii* bestreut hat, erscheint eine Kerzenflamme von mehreren farbigen Ringen umgeben (Hölse von Sonne und Mond). Was beobachtet man, wenn man blinzeln nach einer entfernten Lichtquelle sieht?

Grimaldi (1665) war der erste, der die Ablenkung des Lichtes durch Beugung beobachtete. Die Erklärung der Erscheinung auf Grund der Wellentheorie verdanken wir Fresnel (1815).

Aus den Beugungsversuchen geht hervor, daß das Licht sich nicht unter allen Umständen geradlinig ausbreitet und daß es Lichtstrahlen im geometrischen Sinne nicht gibt. Denn durch Blenden läßt sich ein Lichtbündel niemals so einschnüren, daß nur ein mathematischer Lichtstrahl übrigbliebe. Wie weit es berechtigt ist, von einer geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes und von Lichtstrahlen zu sprechen, folgt aus § 100.

3. Polarisation.

§ 209. § 209. Polarisation durch Reflexion und Brechung. Die Erscheinungen der Interferenz und Beugung des natürlichen Lichtes lassen es unentschieden, ob die Lichtwellen longitudinale oder transversale sind. Erst die Tatsache, daß es Strahlen gibt, bei denen eine Drehung um die Strahlenrichtung als Achse eine Änderung der Lichtwirkung zur Folge hat, zwingt zu der Annahme transversaler Licht-

wellen (Fresnel 1821). Licht, das eine gewisse Seitlichkeit zeigt, heißt polarisiert.

Trifft ein gewöhnlicher Lichtstrahl auf eine Spiegelglasplatte unter einem Einfallswinkel von etwa 55° , und dreht man die Platte um die Strahlenrichtung als Achse, wobei der Einfallswinkel stets derselbe bleibt, so wird das Licht in allen Lagen des Spiegels gleich gut zurückgeworfen. Der einfallende Strahl verhält sich hiernach rings um seine Fortpflanzungsrichtung völlig gleichmäßig. Wird aber der zurückgeworfene Strahl AB (Fig. 276) von einer zweiten Glasplatte S_1 reflektiert, und dreht man diese auf die angegebene Weise, so wird AB nicht wieder in allen Lagen von S_1 gleich gut zurückgeworfen, sondern am besten, wenn der zweite Spiegel dem ersten parallel steht oder aus dieser Lage um 180° herausgedreht ist, dagegen fast gar nicht, wenn die Drehung 90° oder 270° beträgt. Das Gesichtsfeld ist also am hellsten, wenn die Reflexionsebenen beider Spiegel zusammenfallen, dunkel, wenn sie senkrecht aufeinander stehen (Mörrembergs Polarisationsapparat, Fig. 277).

Durch die Reflexion am ersten Spiegel hat demnach das Licht eine Veränderung erfahren, es zeigt nun eine gewisse Seitlichkeit, die es vorher nicht hatte. Diese Veränderung nennt man Polarisation.

Polarisation kann durch Reflexion an jedem durchsichtigen Körper hervorgerufen werden, am vollkommensten, wenn man den Einfallswinkel α so wählt, daß $\tan \alpha$ gleich dem Brechungsquotienten des Körpers ist (Brewster 1815). Für Glas beträgt dieser Winkel 55° — Die Polarisation durch Reflexion wurde von Malus (1808) entdeckt.

Fresnel erklärte die Erscheinung durch die Annahme, daß im natürlichen Licht die Schwingungen in allen möglichen durch den Strahl gelegten Ebenen, aber stets senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung vor sich gehen, während sie im polarisierten Licht nur senkrecht zur Reflexionsebene erfolgen. Diese Ebene heißt Polarisationsebene. Als Polarisator bezeichnet man den Spiegel, der das natürliche Licht polarisiert, als Analysator den Spiegel, durch den die Polarisation erkannt wird.

Nach § 10a kann man eine geradlinige Schwingung in zwei senkrecht zueinander gerichtete Komponenten von gleicher Phase zerlegen. Wenden wir dies auf die Schwingungen an, die die Punkte eines natürlichen Lichtstrahles ausführen, so erhalten wir zwei übereinanderliegende und senkrecht zueinander polarisierte Strahlen.

Fig. 276.

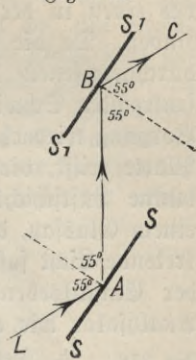
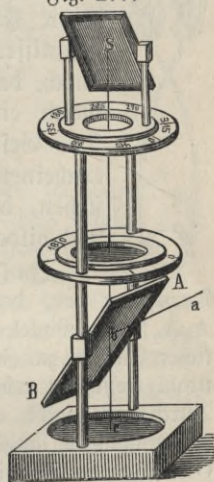


Fig. 277.



Einen Strahl, der unter 55° auf eine Glasplatte fällt, können wir uns durch zwei Strahlen ersetzt denken, von denen die Schwingungen des einen in der Einfallsebene, die des anderen senkrecht dazu stattfinden. Da die ersten nicht reflektiert werden, so müssen sie sich im durchgelassenen Lichte vorfinden, während die zur Einfallsebene senkrechten Schwingungen nur zum Teil durchgelassen werden. Dieser Vorgang wiederholt sich, wenn der austretende Strahl auf eine zweite Platte trifft, die man auf die erste gelegt hat, da hierbei stets eine dünne Luftschicht zwischen beiden Platten eingeschlossen wird. Bei einem Glasfaß, der etwa aus 20 Platten besteht, ist deshalb das austretende Licht fast vollständig so polarisiert, daß die Schwingungen in der Einfallsebene erfolgen. Ein solcher Glasfaß kann sowohl als Analytator wie als Polarizator dienen.

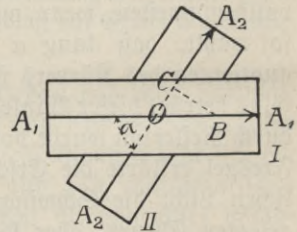
Fig. 278



Der einfachste Polarisationsapparat ist die Turmalinzange (Fig. 278). Sie besteht aus zwei Turmalinplatten, deren Flächen parallel der kristallographischen Hauptachse geschliffen sind. Eine derartige Platte läßt nur Licht hindurch, das parallel der Hauptachse schwingt, wovon man sich durch einen Spiegel- oder Glasfaß-Analytator überzeugt. Das Gesichtsfeld einer Turmalinzange muß also am hellsten erscheinen, wenn die Hauptachsen beider Platten parallel stehen, dagegen völlig dunkel, wenn sie einen Winkel von 90° bilden.

In Fig. 279 stellen I und II die beiden hintereinander gestellten Turmaline vor, deren Hauptachsen A_1A_1 und A_2A_2 einen Winkel α bilden mögen. Ein natürlicher, senkrecht zur Zeichenebene verlaufender Lichtstrahl treffe die erste Platte in O. Bei seinem Durchgange wird er so polarisiert, daß seine Schwingungen längs A_1A_1 mit einer Amplitude OB erfolgen. Da die zweite Platte nur Schwingungen in der Richtung A_2A_2 hindurchläßt, so tritt der Strahl aus II mit einer Schwingungsamplitude $OC = OB \cos \alpha$ aus.

Fig. 279.



§ 210.

§ 210. **Doppelbrechung.** Alle durchsichtigen Kristalle, die nicht dem regulären System angehören, zeigen Doppelbrechung, d. h. ein Lichtstrahl spaltet sich bei seinem Eintritt im allgemeinen in zwei Strahlen von verschiedener Richtung. Die Erscheinung wurde zuerst am Kalkspat von Bartholinus 1669 beobachtet und von Huygens genau untersucht.

Der Kalkspat kristallisiert im hexagonalen System und ist nach drei Richtungen spaltbar, so daß man leicht ein Rhomboeder (Fig. 280) herstellen kann. Die Verbindungslinie der beiden Ecken M und P, an denen die Kanten drei gleich große, stumpfe Winkel bilden, gibt die Richtung der kristallographischen Hauptachse an, die man auch als optische Achse bezeichnet.

Jeder parallel dieser Richtung geführte ebene Schnitt, z. B. MNPQ, heißt ein Hauptschnitt. Einer Geraden im Kristall gehört die Ebene als Hauptschnitt zu, die man parallel der Achsenrichtung durch die Gerade legen kann.

Läßt man einen Lichtstrahl AB (Fig. 281) senkrecht auf eine Rhomboederfläche MQ fallen, so treten an der gegenüberliegenden Fläche zwei getrennte, in der Ebene des Hauptschnittes MNPQ verlaufende Strahlen von gleicher Intensität parallel der ursprünglichen Richtung aus. Von diesen zeigt der eine *Bo* keine seitliche Verschiebung, er durchsetzt also den Kristall ohne Brechung und heißt der ordentliche Strahl. Der andere hat trotz des senkrechten Einfalls eine Brechung nach *e* erfahren und heißt der außerordentliche Strahl.

Fig. 280.

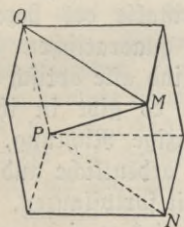
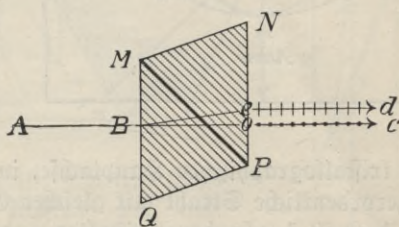


Fig. 281.



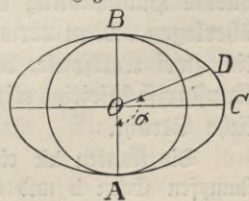
Bei schräg einfallendem Licht werden beide Strahlen im Kristall gebrochen. Während aber der ordentliche das Snelliussche Gesetz befolgt, d. h. stets in der Einfallsebene bleibt und einen konstanten Brechungsquotienten n_o besitzt, der für einfaches gelbes Licht 1,658 ist, liegt der außerordentlich gebrochene Strahl im allgemeinen nicht in der Einfallsebene, und sein Brechungsquotient n_e ändert sich mit der Richtung gegen die Hauptachse von 1,486 bis 1,658. Den kleinsten Wert erreicht n_e , so oft der außerordentliche Strahl den Kristall senkrecht zur Hauptachse durchsetzt, und den größten Wert gleich n_o , so oft der Strahl sich längs der Hauptachse fortpflanzt. Ein Kristall, an den zwei Flächen senkrecht zur Hauptachse angeschliffen sind, zeigt deshalb keine Doppelbrechung, wenn Licht senkrecht auf eine dieser Flächen fällt.

Huygens hatte erkannt, daß der Brechungsquotient des außerordentlichen Strahles, der mit der Hauptachse den Winkel α bildet, sich stets in folgender Weise finden läßt: Man zeichne eine Ellipse mit den Halbachsen $OA = \frac{1}{1,658}$

und $OC = \frac{1}{1,486}$ und ziehe den Halbmesser OD, der mit OA den Winkel α

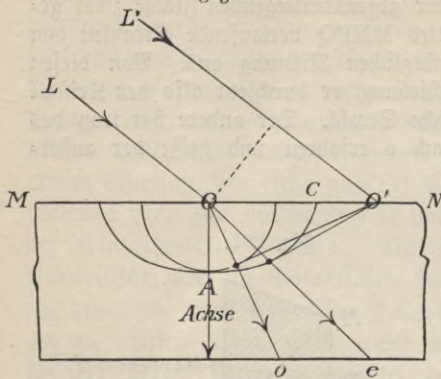
bildet, dann gibt die Länge von OD den reziproken Wert des gesuchten Brechungsquotienten an (Fig. 282). Nun verhalten sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten zweier Strahlen, also auch die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege, umgekehrt wie ihre Brechungsquotienten (§ 205₃). Gehen demnach von einem Punkte O innerhalb eines Kalkspates Lichtwellen aus, so stellt für einen bestimmten Zeitpunkt die

Fig. 282.



Kugel um O mit OA als Radius die Wellenfläche des ordentlichen Strahles dar und das Ellipsoid, das durch Rotation der Ellipse um AB entsteht, die Wellenfläche des außerordentlichen Strahles. Hiernach kann man immer auf

Fig. 283.



Grund des Huygens'schen Prinzips (§ 100 und 101b) den Gang des ordentlichen und des außerordentlichen Strahles konstruieren. In Fig. 283 ist dies für den Fall ausgeführt, daß ein paralleles Strahlenbündel LL' schräg auf eine Kalkspatplatte MN trifft, die senkrecht zur optischen Achse OA geschliffen ist.

Wie der Kalkspat verhalten sich alle Kristalle des hexagonalen und quadratischen Systems. Sie sind alle optisch einachsig, d. h. es gibt in ihnen nur eine einzige Richtung, die

der kristallographischen Hauptachse, in der sich der ordentliche und der außerordentliche Strahl mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen. Bei den doppelt brechenden Kristallen anderer Systeme sind zwei derartige Richtungen vorhanden, doch befolgt im allgemeinen keiner der beiden Strahlen das Snellius'sche Gesetz.

§ 211. § 211. **Polarisation durch Doppelbrechung.** Die beiden Strahlen, in die ein doppeltbrechender Kristall einen natürlichen Lichtstrahl zerlegt, sind bei ihrem Austritt stets vollkommen polarisiert, und zwar so, daß ihre Schwingungsrichtungen einen rechten Winkel bilden.

Man bedecke bei dem Versuch Fig. 281 die hintere Kalkspatfläche mit einem durchlochtem Blatt Papier, so daß nur einer der beiden Strahlen austreten kann, und lasse diesen auf eine Turmalinplatte fallen. Liegt die optische Achse des Turmalins senkrecht zum Hauptschnitt $MNPQ$ des Kalkspates, so wird nur der ordentliche Strahl oO durchgelassen, liegt sie in der Hauptschnittebene, nur der außerordentliche ed . Die Schwingungen des ordentlichen Strahles sind demnach senkrecht zum Hauptschnitt, seiner Polarisations-ebene, gerichtet, während die des außerordentlichen Strahles ed in der Hauptschnittebene, senkrecht zu ed , erfolgen, wie dies in der Fig. 281 angedeutet ist.

Zur Herstellung und Untersuchung polarisierten Lichtes ist der Kalkspat in bezug auf Helligkeit, vollkommene Polarisierung und bequeme Handhabung den Spiegeln, Glasflächen und Turmalinen weit überlegen. Man verwendet deshalb als Polarisationsapparat gewöhnlich zwei Kalkspate, bei denen der eine Strahl durch einen besonderen Kunstgriff beseitigt wird. Im Nicol'schen Prisma ist dies der ordentliche Strahl.

Die Kanten kk eines natürlichen Kalkspates (Fig. 284), die von den stumpfen Ecken b und c ausgehen, bilden mit den Endflächen FF einen

Winkel von 71° . Diesen Winkel bringt man durch Abschleifen auf 68° , zersägt den Kristall, so daß die Schnittebene ss senkrecht auf den angeschliffenen Flächen und dem durch kk gelegten Hauptschnitt steht, und kittet die polierten Schnittflächen mittelst Kanadabalsam wieder zusammen.

Ein Lichtstrahl am (Fig. 285), der parallel kk auf die obere Fläche fällt, spaltet sich in den ordentlichen Strahl my und den außerordentlichen mx . An der Mittschicht, deren Brechungsquotient 1,549 beträgt, wird my ($n_o = 1,658$) total reflektiert und von der geschwärzten Seitenfläche absorbiert. Der außerordentliche Strahl mx ($n'_o = 1,515$) durchsetzt die Schicht, da für ihn Kalkspat optisch dünner ist, und tritt längs np , parallel der ursprünglichen Richtung am , aus. Die Schwingungsebene ist durch die Strahlenrichtung und die kurze Diagonale der Endfläche bestimmt.

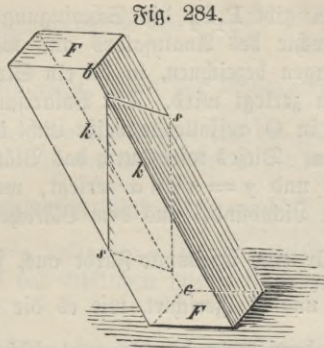
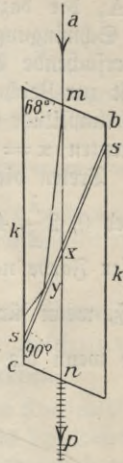


Fig. 284.

Fig. 285.



Bei einer nicht zu dünnen Turmalinplatte, die parallel zur Hauptachse geschliffen ist, wird der ordentliche Strahl durch Absorption vernichtet und nur der außerordentliche, parallel zur Hauptachse schwingende Strahl durchgelassen.

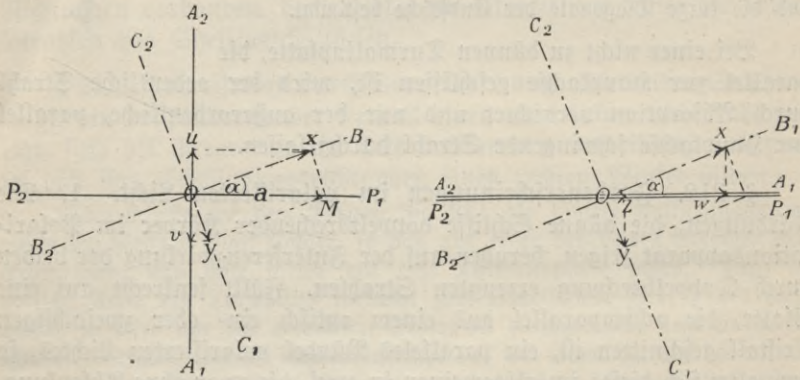
§ 212. **Farbenercheinungen im polarisierten Licht.** 1. Die § 212. Färbungen, die dünne Schiffe doppelbrechender Körper im Polarisationsapparat zeigen, beruhen auf der Interferenzwirkung der beiden durch Doppelbrechung erzeugten Strahlen. Fällt senkrecht auf eine Platte, die achsenparallel aus einem optisch ein- oder zweiachsigem Kristall geschnitten ist, ein paralleles Bündel polarisierten Lichtes, so zerspaltet sich dieses im allgemeinen in zwei, die zwar ohne Ablenkung, doch mit verschiedener Geschwindigkeit die Platte durchlaufen und dadurch einen gewissen Gangunterschied erfahren, der von der Plattendicke und der Farbe des angewendeten Lichtes abhängt. Da beide Bündel senkrecht zueinander polarisiert sind, so interferieren sie zunächst nicht, obgleich sie übereinander liegen. Erst dadurch, daß der Analysator ihre Schwingungen auf eine einzige Ebene zurückführt, erlangen sie Interferenzfähigkeit, und je nach dem Gangunterschiede wird dann bei Anwendung weißen Lichtes eine bestimmte Farbe, oder auch mehrere, ausgelöscht. Die Platte erscheint deshalb gefärbt. Eine bemerkbare Färbung tritt nicht auf, wenn natürliches Licht auf die Platte fällt und hierauf den Analysator durchsetzt. Die Schwingungen der beiden

Lichtbündel sind dann unabhängig voneinander (inkohärent) wie die Strahlen zweier selbständigen Lichtquellen.

Zur Herstellung geeigneter dünner Blättchen benutzt man gewöhnlich kristallisierten Gips oder Glimmer, da beide sehr vollkommen in der erforderlichen Richtung spaltbar sind.

a) In Fig. 286 a gibt P_1P_2 die Schwingungsebene des Polarifators, A_1A_2 die dazu senkrecht des Analysators an, während B_1B_2 und C_1C_2 die Schwingungsrichtungen bezeichnen, in die ein Strahlenbündel durch das zu untersuchende Blättchen zerlegt wird. Der Polarifator verwandelt das senkrecht zur Zeichenebene in O auffallende weiße Licht in linear polarisiertes von der Amplitude $OM = a$. Dieses wird durch das Blättchen in die beiden Komponenten $x = a \cos \alpha$ und $y = a \sin \alpha$ zerlegt, wenn Winkel $B_1OP_1 = \alpha$ ist. Treten die beiden Lichtbündel aus dem Blättchen mit einem Gangunterschied $0, 2\frac{\lambda}{2}, 4\frac{\lambda}{2} \dots$ für eine bestimmte Farbe aus, so sind die Schwingungen dieser Farbe nach B_1 und C_1 gerichtet, wie es die Figur angibt. Dagegen muß, wenn für eine andere Farbe der Gangunterschied $\frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2} \dots$ beträgt und wenn die x Komponente nach B_1 gerichtet ist, die y Komponente in die

Fig. 286 a und b.



Richtung OC_2 fallen. Für beide Farben läßt der Analysator von der x Komponente nur Licht hindurch mit der Amplitude $u = x \sin \alpha = a \sin \alpha \cos \alpha = \frac{a}{2} \sin 2\alpha$ und von der y Komponente nur Licht mit der Amplitude $v = y \cos \alpha =$

$a \sin \alpha \cos \alpha = \frac{a}{2} \sin 2\alpha$. Während aber im ersten Falle, wie die Figur zeigt,

u und v entgegengesetzt gerichtet sind und sich vollständig aufheben, muß im zweiten Falle Verstärkung stattfinden, da u und v dann gleich gerichtet sind.

Die Amplitüden u und v erreichen ihren größten Wert $\frac{a}{2}$ für $\alpha = 45^\circ$.

Deshalb erscheint das Blättchen in vier Stellungen am lebhaftesten gefärbt.

Für $\alpha = 0^\circ$ oder 90° wird u und v gleich Null. Das Blättchen ist dann wirkungslos und das Gesichtsfeld dunkel.

b) Stehen die Schwingungsebenen von Polarisator und Analysator parallel (Fig. 286b), so findet man, entsprechend wie unter a), für die Amplituden der zur Interferenz gelangenden Strahlen $w = a \cos^2 \alpha$ und $z = a \sin^2 \alpha$. Bei einem Gangunterschiede von $0, 2\frac{\lambda}{2}, 4\frac{\lambda}{2} \dots$ sind w und z gleich gerichtet, dagegen entgegengesetzt, wenn der Gangunterschied $\frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2} \dots$ beträgt. Dreht man daher den Analysator aus der gekreuzten in die parallele Stellung, so muß die Färbung des Blättchens in die komplementäre übergehen. Die vollkommenste Interferenz erfolgt für $\alpha = 45^\circ$, da dann $w = z = \frac{a}{2}$ ist. Für $\alpha = 0$ ist $w = a$ und $z = 0$, für $\alpha = 90^\circ$ ist $w = 0$ und $z = a$. In diesen Stellungen ist das Blättchen wieder wirkungslos und das Gesichtsfeld hell.

2. Unter den optisch einachsigen Kristallen zeigt der Quarz die bemerkenswerte Eigentümlichkeit, die Schwingungsebene polarisierten Lichtes, das ihn in der Achsenrichtung durchsetzt, zu drehen.

Bringt man eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Kalkspatplatte zwischen zwei Nicol's, so wird bei Anwendung parallelen Lichtes das Gesichtsfeld nicht geändert. Eine in gleicher Weise geschliffene Quarzplatte dagegen erscheint bei jeder Stellung der Nicol's gefärbt, wenn der Versuch mit weißem Licht angestellt wird. Eine Drehung der Platte in ihrer Ebene ist wirkungslos. Dreht man aber einen der Nicol's, so ändert sich die Farbe in der Reihenfolge von Rot bis Violett. Bei gewissen Quarzen muß man den Analysator rechts herum drehen, um diese Farbenfolge zu beobachten, bei anderen links herum.

Beleuchtet man mit homogenem Licht und befindet sich die Quarzplatte zwischen gekreuzten Nicol's, so tritt Auslöschung erst ein, wenn man den Analysator um einen bestimmten Winkel dreht. Der Analysator kann aber nur Licht auslöschen, dessen Schwingungsebene auf der eigenen senkrecht steht. Der Versuch beweist also, daß das den Polarisator verlassende Licht durch den Quarz eine Drehung seiner Schwingungsebene, mithin auch der hierzu senkrechten Polarisationssebene, um jenen Winkel erfahren hat. Die Drehung ist proportional der Plattendicke und beträgt auf 1 mm für rotes Licht etwa 16° , für Natriumlicht $21,7^\circ$.

Die Eigenschaft, die Polarisationssebene zu drehen, zeigen außer dem Quarz viele Flüssigkeiten, z. B. wässrige Zuckerslösungen. Die Größe der Drehung hängt von dem Zuckergehalt ab. Saccharimeter sind Apparate, mit denen man den Drehungswinkel genau messen und so den Zuckergehalt einer Lösung bestimmen kann.

Sehr geringe Drehungen der Polarisationssebene lassen sich mit einer Doppelplatte nachweisen, die man durch Nebeneinanderkitten eines rechts und links drehenden Quarzes von 3,75 mm Dicke erhält. Jede solche Platte dreht gelbes Licht um 90° , so daß bei parallel gestellten Nicol's aus weißem

Licht das Gelb ausgelöscht wird und beide Gesichtsfelder in der gleichen purpurviolettten Übergangsfarbe erscheinen. Bei einer geringen Drehung des Analysators färbt sich die eine Hälfte rötlich, die andere bläulich.

4. Emission und Absorption.

§ 213. § 213. **Lichtquellen.** Das Leuchten unserer künstlichen Lichtquellen beruht in fast allen Fällen auf einer hohen Erhitzung fester Körper. Bei den mit Flamme verbrennenden Stoffen wie Holz, Steinkohle, Wachs, Öle, Fette, Leuchtgas usw. liefert der Verbrennungsprozeß die nötige Wärme. Das Leuchten geht von den glühenden, festen Kohlenstoffteilchen aus, die in der Flamme schweben. Fehlen solche unverbrannte Teilchen, so leuchtet auch im allgemeinen eine Flamme nicht, wie z. B. die Flamme des Bunsenbrenners und die des Knallgasgebläses. Dadurch, daß man in diese sehr heißen Flammen einen unschmelzbaren Körper bis zur Weißglut erhitzt, wird ein Teil der Wärmeenergie in Licht umgesetzt (Gasglühlicht, Drummondsches Kalklicht).

Auch in unseren elektrischen Glüh- und Bogenlampen ist die Lichtentwicklung durch die hohe Temperatur bedingt, auf die der Leuchtkörper durch den elektrischen Strom gebracht wird.

Die Helligkeit dieser sogenannten Temperaturstrahler steigt außerordentlich rasch mit der Temperatur der Leuchtkörper an, und zwar wächst die Intensität der kürzeren Lichtwellen schneller als die der längeren.

Zur Demonstration legt man eine etwa 50 Volt-Glühlampe nach Vorschaltung von Widerstand an eine beträchtlich höhere Spannung an und schaltet allmählich Widerstand aus, bis der Kohlefaden zersprakt.

Im Gegensatz zu den Temperaturstrahlern bezeichnet man das Leuchten gewisser Körper ohne wesentlichen Einfluß der Temperatur als Lumineszenz. Hierzu gehören das Licht der Leuchtkäfer, das Meeresleuchten, die Fluoreszenz und Phosphoreszenz, die durch elektrische Entladungen in luftverdünnten Röhren erzeugten Lichterscheinungen. Auf Lumineszenz scheint auch das farbige Licht zu beruhen, das bei der Verdampfung von Metallsalzen in der Bunsenflamme oder dem elektrischen Lichtbogen ausgestrahlt wird (Brehmerlampen).

§ 214. § 214. **Absorption.** Wenn Licht auf einen Körper trifft, so ist stets die Intensität des reflektierten und durchgelassenen Lichtes zusammengenommen kleiner als die des auffallenden, und zwar um den Teil, den der Körper absorbiert und der sich erfahrungsgemäß meist in Wärme umsetzt.

Die Absorptionsfähigkeit vieler Körper hängt von der Wellenlänge des Lichtes ab.

a) Ein durch Kupferoxydul gefärbtes Glas sieht im durchscheinenden Lichte rot aus, weil es alle anderen Strahlen fast vollständig

verschluckt. Welche Strahlen ein durchsichtiger Körper absorbiert, verrät das Prisma (s. § 216₂).

b) Weißes Licht, das auf einen durchsichtigen Körper fällt, wird zum Teil an der Oberfläche reflektiert, zum Teil dringt es bis zu einer geringen Tiefe ein, wobei gewisse Strahlenarten absorbiert werden. Der diffus zurückgeworfene Rest gibt dem Körper seine Farbe. Diese ändert sich deshalb mit der Natur des auffallenden Lichtes. Ein rotes Tuch sieht im grünen Teil des Spektrums schwarz aus. Mischt man farbige Pulver oder Flüssigkeiten, so zeigt die Mischung die Farbe, die die obersten Schichten gemeinsam durchlassen und dann zurückwerfen. Aus diesem Grunde erscheint das Gemisch eines gelben und blauen Farbstoffes grün (s. § 188).

§ 215. **Strahlende Energie.** Ein leuchtender Körper strahlt be- § 215.
ständig Energie in Form von Ätherwellen aus. Unser Auge ist nur für Wellenlängen von etwa 0,00081 bis 0,00036 mm empfindlich. Doch auch unsichtbare Strahlen gehen von einer Lichtquelle aus. Die ultraroten Strahlen, deren Wellenlänge größer als die des äußersten Rot sind, hat W. Herschel (1800) im Sonnenspektrum entdeckt. Strahlen von noch kleinerer Wellenlänge als die des äußersten Violett wurden zuerst von Ritter (1801) nachgewiesen. Die langwelligen Strahlen machen sich besonders durch ihre Wärmewirkung, die kurzwelligen durch chemische Wirkungen bemerkbar (doch s. § 217). Das bis jetzt erforschte Strahlungsgebiet eines leuchtenden Körpers umfaßt die Wellenlängen von 0,061 bis 0,0001 mm (etwa 9 Oktaven). Alle diese Strahlen pflanzen sich mit Lichtgeschwindigkeit fort, sie befolgen dieselben Gesetze der Reflexion, Brechung, Interferenz, Beugung, Polarisation und Absorption wie die sichtbaren Strahlen, unterscheiden sich also ihrem Wesen nach nicht vom Licht.

Treffen Ätherwellen auf einen sie absorbierenden Körper, so verwandelt sich die strahlende Energie gewöhnlich in Wärmeenergie. Bei jedem Strahlungsvorgang findet somit eine Energieübertragung statt. Nun sendet jeder Körper, auch wenn er nicht leuchtet, zum mindesten ultrarote Ätherwellen aus. Da andererseits jeder Körper von seiner Umgebung wieder Energie zugestrahlt erhält, so vollzieht sich auf diese Weise ein Temperatúrausgleich (Prevozt 1809).

Das größte Absorptionsvermögen besitzen die schwarzen Körper, besonders Lampenruß und Platinmoor. Deshalb beruht man zum Nachweis der ultraroten Strahlung die Oberfläche eines Körpers und bestimmt die durch Absorption der auffallenden Strahlen bewirkte Temperaturerhöhung. Diese kann man direkt ablesen, wenn man wie Herschel ein empfindliches Quecksilberthermometer oder wie Leslie ein Differentialthermometer (Fig. 287) benutzt. — Bei der viel empfindlicheren Thermo säule (§ 336) ruft die Erwärmung erst einen thermoelektrischen Strom hervor, der durch ein Spiegelgalvanometer gemessen wird. — Das Bolometer besteht aus sehr dünnen

Platinstreifen (Fig. 288), die den einen Zweig einer Wheatstoneschen Brücke (S 293,) bilden. Mit der Erwärmung der Streifen steigt ihr elektrischer Widerstand, und das in der Brücke liegende Galvanometer zeigt einen Strom an. — Eine scheinbar direkte Umsetzung von Strahlungsenergie in mechanische findet bei dem Crookes'schen Radiometer (Fig. 289) statt.

Fig. 287.

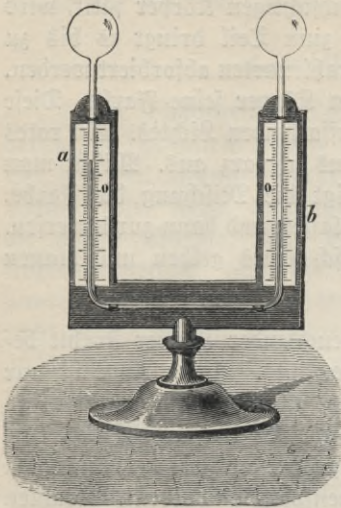
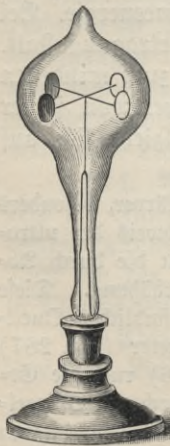


Fig. 288.



Fig. 289.



Für alle Temperaturstrahler hat Kirchhoff auf theoretischem Wege folgendes Grundgesetz gefunden:

Das Verhältnis der Emission und Absorption bei gleicher Temperatur und Wellenlänge ist konstant, und zwar gleich der Emission des absolut schwarzen Körpers.

In der Natur gibt es keinen Körper, der alle ihn treffenden Strahlen absorbiert, also weder Strahlen reflektiert noch durchläßt, d. h. absolut schwarz ist. Künstlich kann man eine vollkommene Absorption dadurch erzielen, daß man die Strahlen in einen Hohlraum durch eine enge Öffnung der Wand eintreten läßt. Da jede der zahllosen Reflexionen im Innern mit einer teilweisen Absorption verbunden ist, so setzt sich die eingedrungene Strahlung nahezu vollständig in Wärmeenergie um, falls die Wandung für die benutzten Ätherwellen undurchlässig ist.

Umgekehrt verhält sich auch ein derartiger Hohlkörper, wenn man ihn von außen auf einer überall gleichmäßigen Temperatur erhält, wie ein absolut schwarzer Körper in bezug auf die aus der Öffnung austretende Strahlung. Auf diese Weise ist es zuerst Lummer, W. Wien und Pringsheim

gefunden, folgende theoretisch gefundenen Strahlungsgesetze für den absolut schwarzen Körper experimentell zu bestätigen:

1. Die gesamte Strahlungsenergie ist der 4. Potenz der absoluten Temperatur proportional.

2. Das Produkt aus der absoluten Temperatur und der Wellenlänge, bei der die ausgestrahlte Energie ihren größten Wert erreicht, ist konstant.

3. Die maximale Energie ist der 5. Potenz der absoluten Temperatur proportional.

Hiernach wächst z. B. bei einer Steigerung der abs. Temperatur von 1000° auf 2000° die gesamte Strahlungsenergie auf das $2^4 = 16$ fache, die maximale Energie auf das $2^5 = 32$ fache. Da die Konstante des zweiten Gesetzes nach Lummer-Pringsheim den Wert 2940 hat, wenn man die Wellenlänge in Tausendstel mm (1μ) mißt, so verschiebt sich bei der angenommenen Erhitzung die maximale Energie von der Wellenlänge $2,94 \mu$ bis $1,47 \mu$ und würde bei 5880° abs. vom gelbgrünen Teil ($\lambda = 0,5 \mu$) ausgestrahlt werden, für den unser Auge am empfindlichsten ist. Gerade in diesem Teile liegt das Energiemaximum der Sonnenstrahlung, wie Langley durch Messungen am normalen Sonnenspektrum (Beugungsspektrum § 208 b) nachgewiesen hat. Nimmt man an, daß die Sonne zu den Temperaturstrahlern gehört, so ergibt sich hieraus für die Sonnentemperatur ein oberer Wert von etwa 6000° abs. Aus der Solarkonstante (§ 137₁₁) hat man 6500° abs. gefunden.

§ 216. Die **Spektralanalyse** sucht die Aufgabe zu lösen, aus den § 216. Strahlenarten, die ein Körper ausstrahlt oder durchläßt, die Natur dieses Körpers festzustellen. Man beschränkt sich dabei meistens auf die Untersuchung der sichtbaren Strahlung, die man vermittelst eines Prismas in ein Spektrum zerlegt.

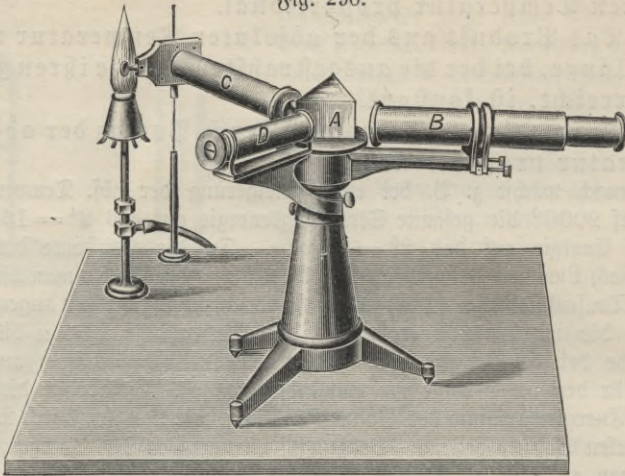
1. Die **Emissionspektren** weißglühender fester und flüssiger Körper sind mit geringen Ausnahmen kontinuierlich und unterscheiden sich nur wenig voneinander, so daß man aus ihnen keinen sicheren Schluß auf die chemische Beschaffenheit des leuchtenden Körpers ziehen kann. Durchaus abweichend hiervon verhalten sich leuchtende Gase und Dämpfe, die im allgemeinen ein diskontinuierliches, aus einzelnen Linien oder Banden bestehendes Spektrum geben (s. § 187₂).

Die Entdecker der Spektralanalyse Kirchhoff und Bunsen (1860) fanden, daß die Metallsalze der Alkalien und alkalischen Erden, wenn man sie verdampft, ein Linienspektrum liefern, das für alle Salze desselben Metalles das gleiche ist. So ist für die Natriumsalze die gelbe D-Linie, für die Kaliumsalze eine Linie im äußersten Rot und eine im Violett, für die Lithiumsalze eine glänzende rote und eine schwache orange Linie usw. charakteristisch (s. die Spektraltafel). Spätere Versuche haben ergeben, daß wahrscheinlich zu jedem elementaren oder zusammengesetzten Stoff ein besonderes Emissionspektrum gehört.

Die Empfindlichkeit der spektralen Untersuchungsmethode übertrifft weit die der chemischen Analyse. Nach Kirchhoff genügen z. B.

0,3 Milliontel Na zur Hervorrufung der gelben Linie. Deshalb ist es auch auf diesem Wege gelungen, eine Anzahl neuer Elemente zu

Fig. 290.

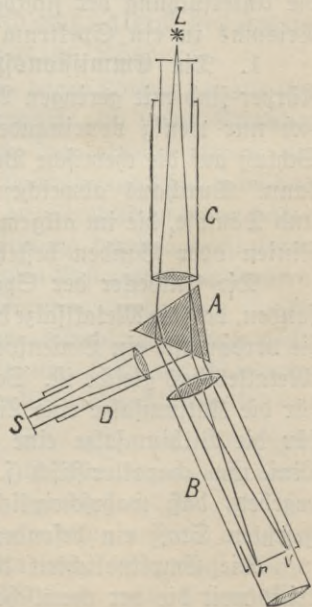


entdecken (Bärium, Rubidium, Thallium, Indium, Gallium). Zur Beobachtung dient meistens der Kirchhoff-Bunsensche Spektralapparat in der von Steinheil verbesserten Form (Fig. 290 u. 291).

Das zu untersuchende Licht tritt durch einen regulierbaren Spalt in das Rohr C. Eine achromatische Sammellinse am anderen Rohrende macht die Strahlen parallel, die nun durch das Prisma A zerlegt werden und hierauf in das auf Unendlich eingestellte Fernrohr B gelangen. Das in der Brennebene des Objektivs entstehende Spektrum $r \dots v$ (Fig. 291) wird durch das Okular als Lupe betrachtet. Am äußeren Ende eines dritten Rohres D ist eine Glasstaka, am inneren Ende eine Sammellinse angebracht. Die von einem Punkt der beleuchteten Staka herkommenden Strahlen verlassen als paralleles Bündel diese Linse und werden von der zugewandten Prismenfläche ins Fernrohr reflektiert, so daß der Beobachter gleichzeitig mit dem Spektrum das scharfe Bild der Staka erblickt.

Die flüchtigeren Metallsalze, wie die der Alkalien, lassen sich in der nicht leuchtenden Bunsenflamme verdampfen. Die weniger flüchtigen Salze der meisten Schwermetalle und diese selbst werden im Knallgasgebläse, im elek-

Fig. 291.



trischen Lichtbogen oder vermittelt des Induktionsfunken verdampt. Zur Untersuchung des Lichtes, das Gase z. B. H, N usw. unter geringen Drucken ausstrahlen, wenn elektrische Entladungen hindurchgehen, benutzt man die Geißlerschen Spektralröhren (Fig. 292).

Fig. 292.

2. **Absorptionspektren.** Das kontinuierliche Spektrum eines weißglühenden Körpers erfährt stets eine Veränderung durch Absorption, wenn man zwischen Lichtquelle und Spalt des Spektralapparates einen durchsichtigen Körper bringt. Viele Stoffe löschen gewisse farbige Strahlen vollständig aus oder schwächen sie in einem solchen Grade, daß das Spektrum von mehr oder weniger dunklen Streifen durchzogen ist. Die Lage, Zahl und Deutlichkeit dieser Streifen hängt von der chemischen Natur des absorbierenden Körpers, der Dicke der durchstrahlten Schicht und der Konzentration des wirksamen Stoffes ab.

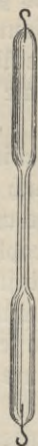
Sehr deutliche dunkle Streifen oder Bänder zeigen sich bei Lösungen von übermangansaurem Kalium, Cofin, Blut, bei den Didymialzen, bei den rotbraunen Dämpfen der salpetrigen Säure, dem violetten Joddampf (s. die Spektraltafel).

Von besonderer Wichtigkeit sind die Absorptionspektren leuchtender Gase, da sie zu einer Erklärung der Fraunhoferschen Linien (§ 187.) geführt haben, die grundlegend für unsere Ansichten über die Beschaffenheit der Sonne und Fixsterne geworden ist.

Läßt man das Licht eines weißglühenden Körpers durch eine weniger heiße Natriumflamme gehen, so erscheint im Spektrum genau da, wo man im Sonnenspektrum die Fraunhofersche D-Linie beobachtet, eine dunkle Linie, an deren Stelle die gelbe Natriumlinie tritt, sobald man die weiße Lichtquelle abblendet.

Nach Kirchhoff absorbiert ein Körper bei irgend einer Temperatur gerade die Strahlen, die er bei gleicher Temperatur selbst auswendet (§ 215). Gelber Natriumdampf strahlt vorzugsweise gelbes Licht aus, dessen Wellenlänge der D-Linie entspricht. Von dem weißen Licht, das den Dampf durchsetzt, wird also nur diese bestimmte Wellenart stark absorbiert. Die Umgebung der D-Linie im Spektrum erhält somit das ungeschwächte, sehr helle Licht von etwas größerer und kleinerer Wellenlänge, das der weißglühende Körper auswendet, während nach jener Stelle selbst nur das von der Natriumflamme ausgestrahlte und das von ihr durchgelassene Licht gleicher Wellenlänge gelangt. Ist die erstere Lichtwirkung stärker als die beiden anderen zusammen, so muß die D-Linie dunkel erscheinen. Erfahrungsgemäß tritt dies ein, wenn die Temperatur der Natriumflamme erheblich niedriger ist als die des weißglühenden Körpers.

In ähnlicher Weise wie die gelbe Natriumlinie lassen sich auch die Emissionslinien vieler anderen Metalle umkehren.



Hieraus und aus der Tatsache, daß eine große Zahl der Fraunhofer'schen Linien mit den hellen Emissionslinien sehr vieler irdischen Stoffe genau zusammenfallen, schloß Kirchhoff, daß die gleichen Stoffe als glühende Gase oder Dämpfe in der Atmosphäre des weißglühenden Sonnenkerns vorhanden sind. Hiernach sind die Fraunhofer'schen Linien die Umkehrungen der hellen Emissionslinien, die für die leuchtenden Gase der sogenannten Chromosphäre der Sonne charakteristisch sind.

§ 217. § 217. **Chemische Wirkungen.** Wenn ein Körper Ätherwellen absorbiert, so setzt sich nicht immer die absorbierte Energie lediglich oder auch nur zum größten Teil in Wärme um. Bereits in § 203 wurden die chemischen Wirkungen des Lichtes besprochen, auf denen die Photographie beruht. Von weit größerer Bedeutung sind die chemischen Einflüsse, die das Licht auf das Leben und Wachstum der Pflanzen ausübt. Der Pflanzenkörper baut sich in der Hauptsache aus Kohlenwasserstoffen auf. Der hierzu nötige Kohlenstoff stammt aus der Kohlenäure der Atmosphäre, der Wasserstoff aus dem Wasser des Erdbodens. Das von den grünen Pflanzenteilen absorbierte Licht veranlaßt besonders durch seine roten und gelben Strahlen eine Zersetzung von Kohlenäure und Wasser. Der dabei frei werdende Sauerstoff wird in die Atmosphäre ausgeschieden (s. Anhang „Chemie“ § 66).

Welche Ätherwellen besonders chemisch wirksam sind, hängt von der Natur des absorbierenden Körpers ab. Es scheint, daß bei den Reduktionsvorgängen besonders die violetten und ultravioletten Strahlen, bei den Oxydationen die weniger brechbaren Strahlen beteiligt sind.

§ 218. § 218. **Fluoreszenz und Phosphoreszenz.** 1. Eine sehr merkwürdige Verwandlung von strahlender Energie zeigt sich bei einer Reihe von Stoffen dadurch, daß sich die von ihnen absorbierte Energie in Licht von anderer Wellenlänge umsetzt, als die auffallende Strahlung enthält. Dauert das so hervorgerufene Selbstleuchten nur so lange, als der Körper bestrahlt wird, so bezeichnet man die Erscheinung als Fluoreszenz. Sie wurde zuerst von Brewster am Flußspat (Fluorkalzium) beobachtet.

Petroleum, das im durchscheinenden Lichte farblos oder schwach gelblich aussieht, zeigt im auffallenden Lichte eine bläuliche Färbung. In gleicher Weise verhält sich eine wässrige Lösung von schwefelsaurem Chinin und ein wässriger Auszug von Kastanienrinde. Verdünnte Lösungen von Fluoreszeinatron und Cochin fluoreszieren grün, eine alkoholische Lösung von Chlorophyll blutrot, Uranglas grün.

Am deutlichsten wird die Erscheinung hervorgerufen, wenn man Sonnenlicht oder das Licht einer Bogenlampe durch eine Sammellinse konzentriert und den Lichtkegel in eine fluoreszenzfähige Flüssigkeit eintreten läßt.

Nur solche Strahlen sind in der Lage, Fluoreszenz zu erregen, die stark absorbiert werden. Denn geht Licht durch zwei hintereinander gestellte Gläser, die beide die gleiche Flüssigkeit, z. B. Chininlösung, enthalten, so

fluoresziert nur die erste Flüssigkeit. Sie muß also alle wirksamen Strahlen absorbiert haben.

Entwirft man ein kontinuierliches Spektrum und läßt es auf eine Chininlösung fallen, so gehen die roten, gelben, grünen und blauen Strahlen wie durch reines Wasser hindurch. Erst im violetten Teile erscheint in der Flüssigkeit das himmelblaue Fluoreszenzlicht und erstreckt sich von da noch weit über das sichtbare Spektrum hinaus ins Ultraviolett. Das blaue Fluoreszenzlicht selbst ist nicht homogen, wie das Spektroskop zeigt, sondern besteht aus sehr verschiedenfarbigen Strahlen, die aber alle eine größere Wellenlänge haben als die erregenden Strahlen. — Erzeugt man vermittelst des Lichtbogens das Linienspektrum eines Metallsalzes und fängt es auf einem Baryumplatinzylinder auf, so kann man im Ultraviolett eine größere Zahl von Linien beobachten, die auf einem weißen Schirme unsichtbar sind.

2. Die **Phosphoreszenz** unterscheidet sich dadurch von der Fluoreszenz, daß ein Körper auch dann noch leuchtet, wenn er der erregenden Strahlung nicht mehr ausgesetzt ist.

Ein solches Nachleuchten nach vorheriger Bestrahlung, z. B. mit Sonnenlicht, kann man am Diamanten und am Flußspat beobachten. Am schönsten sieht man die Erscheinung bei den künstlich hergestellten Vologneser Leuchtsteinen, die aus Schwefelverbindungen des Kalziums, Baryums und Strontiums bestehen. Die Balmainische Leuchtfarbe enthält hauptsächlich Schwefelkalzium mit einer geringen Beimengung von Wismut.

Fünfter Abschnitt: Magnetismus und Elektrizität.

Teil I: Magnetismus.

§ 219. § 219. **Natürliche Magnete.** Es finden sich in der Erde Eisenerze (Fe_3O_4), die zuweilen die Eigenschaft haben, kleine Eisen- oder Stahlstücke anzuziehen. Man nennt sie Magnetsteine oder natürliche Magnete. Wälzt man einen solchen Stein in Eisenfeilspänen, so bleibt ein Teil von diesen in Büscheln an der Oberfläche haften. Beim Herausziehen bemerkt man, daß besonders an zwei entgegengesetzten Stellen die Späne am dichtesten hängen (Polflächen). Derartige Steine waren schon im Altertum bekannt, doch erst seit Gilbert (1600) besitzen wir eine genauere Kenntnis ihrer Eigenschaften.

§ 220. § 220. **Stahl und Eisen.** Aus Roheisen, das 2—6 % Kohlenstoff enthält, stellt man weiches Schmiedeeisen her, indem man durch geeignete Prozesse den Kohlenstoffgehalt unter $\frac{2}{3}$ % herabdrückt. Eisen mit $\frac{2}{3}$ bis 2 % Kohlenstoff wird Stahl genannt. Dieser ist wesentlich härter als Schmiedeeisen. Durch Erhitzen bis zur Rotglut und mehr oder weniger plötzliches Abkühlen läßt sich die Härte des Stahls in weiten Grenzen abändern.

§ 221. § 221. **Künstliche Magnete.** Ein Stahlstab erhält durch wiederholtes, gleichgerichtetes Streichen an einer der Polflächen eines Magnetsteins die Fähigkeit, Eisen anzuziehen. Ein solcher Stab, in Eisenfeilspäne gelegt, zeigt sehr deutlich, daß die stärkste Anziehung nach den Enden zu stattfindet, während die

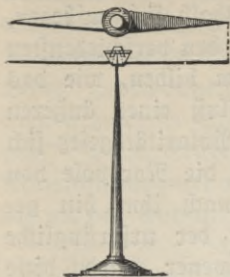
Fig. 293.



Mitte unmagnetisch zu sein scheint (Fig. 293). Die beiden Stellen stärkster Wirkung nennt man die Pole, die Mitte des Stabes die Indifferenzzone.

§ 222. § 222. **Richtung eines beweglichen Magneten.** Ein auf einem Stück Kork schwimmender Magnetstab stellt sich so ein, daß der eine Pol annähernd nach Norden, der andere nach Süden zeigt.

Fig. 294.



Diese zur Feststellung der Nord-Südrichtung für die Schifffahrt äußerst wichtige Eigenschaft wurde im Abendlande erst ums Jahr 1000 n. Chr. bekannt, während die Chinesen sie bereits lange vorher benutzt haben sollen.

Ein leichter, frei drehbarer Magnet heißt eine Magnetnadel. Die Fig. 294 zeigt eine Vorrichtung, die eine möglichst freie Drehung in wagerechter Ebene gestattet (Kompaß). Das nach Norden weisende Ende heißt der Nordpol, das andere der Südpol der Nadel.

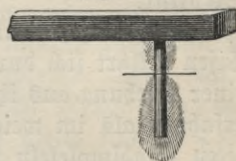
§ 223. **Gesetz der Polarität.** Nähert man den Polen einer § 223. Kompaßnadel abwechselnd den Nord- oder den Südpol eines Magneten, so macht man die Beobachtung:

Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Diese Wirkung wird nur wenig geschwächt, wenn man ein Blatt Papier, eine Glasplatte, ein Brett, eine Messingscheibe zwischen die Pole bringt.

§ 224. **Magnetismus von Stahl und Eisen.** Ein Stück § 224. weiches Eisen, das man an einen Magnetpol hängt oder auch nur in seine Nähe bringt, zeigt die Eigenschaften eines Magneten, es zieht z. B. Eisenfeilspäne an (Fig. 295). Je weicher das Eisen ist, desto rascher und stärker wird es magnetisiert. Sobald man es aber vom Pol entfernt, verschwindet fast vollständig sein Magnetismus. Ein Stück Stahl dagegen, etwa eine Nähnadel, wird unter gleichen Bedingungen weit schwächer magnetisch, bleibt aber auch nach Entfernung vom Magnetpole ein Magnet, und zwar ist das Ende, das dem Pole zugewendet war, entgegengesetzt, das andere gleichnamig magnetisiert.

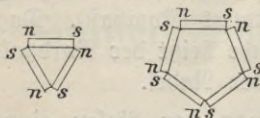
Fig. 295.



§ 225. **Elementarmagnete.** Ein Magnet verliert nichts von § 225. seiner Kraft, wenn man ihn zum Magnetisieren von Stahl benutzt. Diese Erscheinung widerspricht der Annahme, daß Nord- und Südmagnetismus zwei Substanzen wären, die vom Magneten auf den Stahlstab übergingen. Zerbricht man einen Magneten, z. B. eine magnetisierte Stricknadel, an der Indifferenzstelle oder auch anderswo in zwei Teile, so sind diese wiederum vollständige Magnete, deren Pole in derselben Richtung liegen wie die des ganzen Magneten. Das zeigt sich stets, wie weit man auch die Teilung fortsetzt. Es ist unmöglich, einen Magneten mit nur einem Pole herzustellen. Wir müssen uns also vorstellen, daß jedes kleinste Teilchen eines Magneten einen Nord- und einen Südpol enthält. Es drängt sich ferner die Vermutung

auf, daß alle Molekeln bereits im unmagnetischen Stahl oder Eisen Magnete sind, deren Wirkungen nach außen nur deshalb sich aufheben, weil sie entweder ungeordnet mit ihren Polen nach den verschiedensten Richtungen liegen oder in sich geschlossene Ketten bilden, wie das z. B. Fig. 296 veranschaulicht. Durch den Einfluß eines äußeren Nordpols werden die Elementarmagnete nach dem Polaritätsgesetz sich

Fig. 296.



so zu drehen suchen, daß die Nordpole von ihm fort, die Südpole nach ihm hin gerichtet sind. Je kräftiger der ursprüngliche Pol ist, desto vollkommener wird diese Gleichrichtung eintreten, desto stärker wird ein Stab magnetisiert werden. Dabei muß man sich allmählich einer Grenze, der magnetischen Sättigung, nähern. Wir können den Vorgang nachahmen, wenn wir mit einem kräftigen Pole an der Außenwand eines mit Eisenfeilspänen gefüllten Reagenzglases entlang streichen. Die Spänchen drehen sich in die Längsrichtung des Glases, und die vorher unmagnetische Eisenmasse wird zu einem vollständigen Magneten. Hebt man durch Schütteln die Gleichrichtung der Spänchen auf, so verschwinden auch die magnetischen Wirkungen. — Man tauche die Pole eines kleinen Hufeisenmagneten in Eisenpulver und leite mit Hilfe eines Streichholzes die Verbrennung ein. Die zusammengebackene Eisenmasse ist ein Magnet geworden, und man erkennt deutlich seine Struktur.

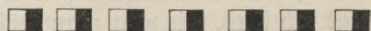
Die Verschiedenheit im magnetischen Verhalten von Stahl und Eisen erklärt sich durch die Annahme, daß die Molekeln im Stahl bei einer Drehung aus ihrer Gleichgewichtslage einen größeren Widerstand erfahren als im weichen Eisen. Deshalb behalten die einmal gerichteten Stahlmolekeln ihre neue Lage auch dann noch bei, wenn keine äußere magnetisierende Kraft mehr auf sie wirkt. Ein magnetisiertes Stahlstück ist ein permanenter Magnet. Es verliert jedoch seinen Magnetismus, wenn es durch Stoß oder Schlag heftig erschüttert oder bis zur Rotglut erhitzt wird.

Weiches Eisen zeigt sich kräftig magnetisiert, solange es unter dem Einfluß einer magnetischen Kraft steht. Diesem Einfluß entzogen, drehen sich die gerichteten Molekeln um so vollkommener wieder in die ursprüngliche Lage, je weicher das Eisen ist. Nur geringe Spuren von Magnetismus bleiben zurück (Remanenz).

§ 226. § 226. Verteilung des freien Magnetismus in einem Stahl-

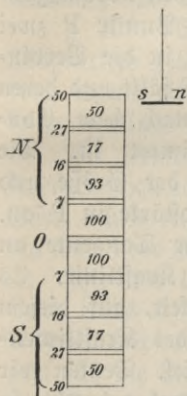
stabe. Bestände ein Magnet nur aus einer einzigen geradlinigen Reihe polarisierter Molekeln (Fig. 297), so müßten sich die Wirkungen zweier aneinander gelagerten Pole nach außen vollständig

Fig. 297.



neutralisieren. Nur an den Enden könnte sich freier Nord- und Südmagnetismus zeigen. Führt man aber eine kurze, frei bewegliche Magnetnadel an einem Stabmagneten entlang, so scheint die ganze eine Hälfte nordmagnetisch, die andere südmagnetisch zu sein, allerdings in abnehmender Stärke, wenn man von den Enden nach der Mitte zu geht. Diese Erscheinung erklärt sich durch die Annahme, daß die Molekularmagnete nach der Mitte hin vollständiger gleichgerichtet sind als an den Enden. In Fig. 298 ist eine derartige Anordnung schematisch angegeben. Dabei wurde angenommen, daß in den beiden mittleren Schichten 100%, in den benachbarten der Reihe nach nur 93, 77, 50% Molekeln gleichgerichtet sind.

Fig. 298.



§ 227. Magnetische Kraft. Coulombsches § 227.

Gesetz. Bei einem dünnen, gleichmäßig magnetisierten Stahldraht liegen die Pole fast an den Enden. Wir hängen einen derartigen, etwa 30 cm langen, sehr harten Draht vertikal an dem einen Arm einer Wage auf und setzen ihn durch Auflegen von Gewichten auf der anderen Seite der Wage ins Gleichgewicht. Nähern wir dem unteren Pole den gleichnamigen oder entgegengesetzten Pol eines zweiten ganz gleichen Magneten, so können wir die Abstoßung oder Anziehung der einander zu-

gewandten Pole durch die Gewichtsstücke messen, die wieder das Gleichgewicht herstellen, denn die Wirkungen der beiden anderen Pole können bei genügender Länge der Magnete vernachlässigt werden. Man sagt, ein Pol besitzt die Stärke 1 oder auch die magnetische Menge 1, wenn die abstoßende oder anziehende Kraft auf einen gleich starken Pol in der Entfernung von 1 cm 1 Dyn beträgt. Hiernach hat ein Pol die Stärke m_1 , wenn er auf den 1 cm entfernten Einheitspol mit einer Kraft von m_1 Dyn wirkt. Zwei Pole von den Stärken m_1 und m_2 üben aufeinander bei 1 cm Abstand die Kraft $m_1 \cdot m_2$ Dyn aus. Vergrößern wir die Entfernung der beiden Pole, so nimmt die Kraftäußerung rasch ab. Durch den angegebenen Versuch mit der Wage läßt sich angenähert das von Coulomb gefundene Gesetz nachweisen:

Die Wechselwirkungen zweier Pole verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate ihrer Entfernungen.

Die mechanische Kraftäußerung zweier Pole von den Stärken m_1 und m_2 beträgt demnach in der Entfernung von r cm

$$K = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \text{ Dyn.}$$

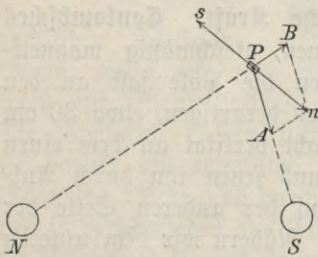
Diese Gleichung gilt streng genommen nur dann, wenn die Pole punktförmig und isoliert sind, zwei Bedingungen, die sich experimentell nicht genau erfüllen lassen. Trotzdem hat das Coulombsche Gesetz eine

fundamentale Bedeutung, da es die Möglichkeit bietet, das weniger einfache Gesetz der Wechselwirkung von Magneten aufzufinden, dessen Richtigkeit sich dann durch direkte Beobachtung prüfen läßt. (§ 232.)

§ 228.

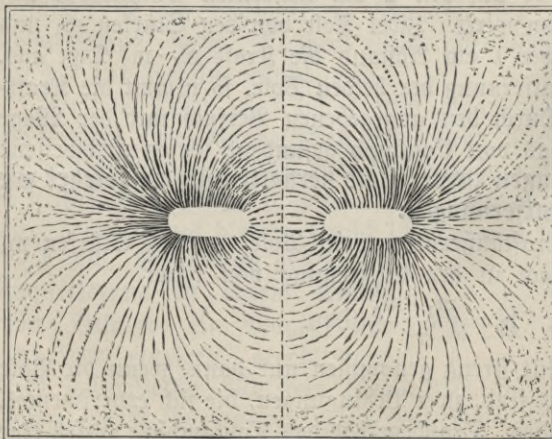
§ 228. **Magnetfeld und Kraftlinien.** Der Raum, in dem magnetische Kräfte wirksam sind, heißt ein Magnetfeld. Die Feldstärke (Intensität) an den verschiedenen Stellen wird durch die Kraftäußerung gemessen, die ein nordmagnetischer Einheitspol erfährt. Eine Linie, die in jedem Punkte die Richtung der magnetischen Kraft angibt, nennt man Kraftlinie. Im Felde, das von einem Nordpol N und einem Südpol S (Fig. 299) hervorgerufen wird, wirken auf den nordmagne-

Fig. 299.



titischen Einheitspol im Punkte P zwei Kräfte, deren Richtung in die Verbindungslinien PN und PS fällt und deren Größe PA und PB nach dem Coulombschen Gesetz bestimmt ist. Die Resultierende Pn gibt der Größe und Richtung nach die Feldstärke in P an. Pn ist die geometrische Tangente an die durch P gehende Kraftlinie. Es bietet keine Schwierigkeit, auf diesem Wege eine Zeichnung des Kraftlinienfeldes herzustellen. Rascher führen Versuche zum Ziel. Denken wir uns zunächst nach P einen süd magnetischen Einheitspol gebracht, so würde auf ihn eine Pn gleiche, aber entgegengesetzte Kraft Ps wirken. Deshalb muß sich eine sehr kurze, frei bewegliche Magnetnadel in P in die Richtung sPn einstellen. Diese Richtung, nach der der Nordpol der kleinen Nadel zeigt, gibt die Richtung der Kraftlinien des Feldes an. Hiernach lassen sich die in einer Ebene verlaufenden Kraftlinien experi-

Fig. 300.



mentell darstellen, wenn wir in das Magnetfeld eine horizontal gerichtete Glasplatte bringen und diese mit Eisenspänen bestreuen. Jedes Spänchen verhält sich dann wie eine sehr kleine Magnetnadel (§ 224) und erlangt durch leichtes Erschüttern der Unterlage eine genügende Beweg-

lichkeit, um sich in die Richtung der Kraftlinien zu stellen. In Fig. 300 ist das Kraftfeld der beiden ungleichnamigen Pole eines Hufeisenmagneten dargestellt. Die Kraftlinien verbinden die beiden Polflächen. An diesen, wo die Feldstärke am größten ist, drängen sie sich am meisten zusammen; sie konvergieren also nach der Richtung, nach der die Intensität des Feldes wächst. Ihre Dichtigkeit nimmt ab, wo die Feldstärke abnimmt; hier divergieren sie. Da, wo sie fast parallel verlaufen, ist auch die Feldstärke nahezu konstant.

Ein Feld, in dem sich die magnetische Kraft weder ihrer Größe noch Richtung nach ändert, heißt homogen.

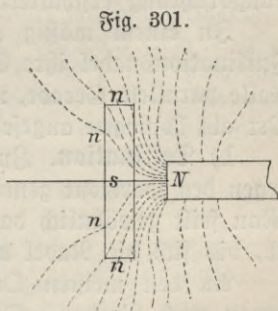
§ 229. **Eisen im Magnetfelde.** Ein Stück Eisen, in ein § 229. Magnetfeld gebracht, beeinflusst sofort die Struktur des Feldes, während irgend ein anderer Körper, z. B. ein Stück Holz oder Messing, keine merkliche Wirkung auszuüben scheint (s. § 309).

Die Kraftlinien werden nach dem Eisen hingezogen und durchsetzen es scheinbar in großer Zahl, so daß sich die Vorstellung aufdrängt, Eisen müsse ein weit besserer Leiter für magnetische Kraftlinien sein als Luft oder Holz oder irgend ein anderer Stoff.

Wie wir bereits wissen, wird das einem Nordpole zugewandte Ende eines Eisenstücks zum Südpol, das abgewandte zum Nordpol. Nehmen wir an, die Kraftlinien gingen stets vom Nordpol aus, so ergibt sich die Regel:

Da, wo Kraftlinien in Eisen eintreten, entsteht ein Südpol, wo sie austreten, ein Nordpol.

Halten wir eine Eisenplatte quer vor einen Nordpol N, so rufen die in der Mitte eintretenden Kraftlinien einen Südpol s hervor, an den Endflächen, wo sie austreten, zwei Nordpole n (Fig. 301). In dem Raume zwischen N und s sind die Kraftlinien dichter als ohne Eisenplatte. Hier verstärkt das Eisen die magnetische Wirkung von N. Der Raum hinter der Platte ist so gut wie frei von Kraftlinien, und eine dort aufgestellte kleine Magnetnadel wird von dem Pole N nur schwach beeinflusst (Schirmwirkung). Diese Erscheinung zeigt sich noch deutlicher, wenn man statt der Eisenplatte einen Hohlzylinder benutzt. (S. § 327.)

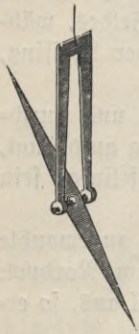


Legt man an die Pole eines Hufeisenmagneten ein Stück Schmiedeeisen, einen sogenannten Anker, so treten nur sehr wenige Kraftlinien in den Luftraum aus, die magnetischen Wirkungen nach außen verschwinden, und wir können annehmen, daß die Kraftlinien fast vollständig im Anker verlaufen. Der Magnet trägt jetzt ein etwa viermal so großes Gewicht als ein Pol allein.

§ 230. § 230. Das magnetische Feld der Erde. a) Inklination.

Ein unmagnetischer Stahlstab, der genau in seinem Schwerpunkt an einem Faden aufgehängt wird, schwebt horizontal. Sobald man ihn magnetisiert, stellt er sich in die Nord-Südrichtung. Dabei sinkt auf der nördlichen Erdhälfte das Nordende, auf der südlichen das Südende nach unten, und die Längsachse des Stabes bildet mit dem Horizont einen Winkel, der um so größer ist, in je höheren Breiten man den Versuch anstellt. In Deutschland beträgt dieser Winkel, die Inklination, gegenwärtig etwa 65° , in der Nähe des Äquators ist er Null. Die Fig. 302 zeigt eine für den Versuch brauchbare Vorrichtung (Inklinationsnadel).

Fig. 302.



Man beobachtet ganz ähnliche Erscheinungen, wenn man unter eine kurze Magnetnadel einen langen Magneten hält: Die Nadel stellt sich in die Richtung des Magneten und neigt sich bald mit dem einen, bald mit dem anderen Ende dem Magneten zu, je nachdem man sie von der Indifferenzstelle nach dem einen oder anderen Pole hinführt, während sie in der Mitte über ihm wagerecht steht. Es liegt deshalb die Vermutung nahe, daß die Erde selbst ein großer Magnet ist, dessen Südpol im Norden und dessen Nordpol im Süden liegt.

Diese Ansicht wird dadurch bestätigt, daß ein Stab aus weichem Eisen, den man in die Richtung der Inklinationsnadel hält, selbst zum Magneten wird. Das untere Ende erweist sich bei uns als ein Nordpol. Härtere Eisenstäbe werden in geeigneter Lage durch den Einfluß des Erdmagnetismus zu permanenten Magneten, besonders dann, wenn man sie durch einen Schlag auf das eine Ende in ihrer Längsrichtung erschüttert.

In einem mäßig ausgedehnten Beobachtungsraum ändert die Inklinationsnadel ihre Stellung nicht, die Kraftlinien sind in diesem Falle parallele Gerade, und das Magnetfeld der Erde kann für einen Ort als homogen angesehen werden.

b) **Deklination.** Zur Bestimmung der Nord-Südrichtung ist die gegen den Horizont geneigte Lage einer Inklinationsnadel unbequem. Man feilt gewöhnlich das eine Ende, bei uns das Nordende, so weit ab, bis sich die Nadel wagerecht stellt.

An den meisten Orten der Erde zeigt die Magnetnadel nicht genau nach Norden. Die durch die Nadelrichtung gelegte Vertikalebene, der magnetische Meridian, bildet mit dem geographischen Meridian einen Winkel, den man die Deklination nennt. Die Deklination ist östlich oder westlich, je nachdem der Nordpol der Nadel nach Osten oder Westen abweicht. Die Kenntnis der Nadelabweichung ist besonders für die Schifffahrt wichtig. Man hat deshalb Karten entworfen, auf denen die Orte gleicher Deklination durch Linien verbunden sind

(Isogonen). Linien, die alle Orte gleicher Inklination verbinden, heißen Isoklinen. Ein drittes Kurvensystem sind die Linien gleicher Intensität, die Isodynamen.

§ 231. Magnetstab im Felde der Erde. Auf einen Magnet- § 231.
stab NS, der sich in beliebiger Lage im magnetischen Felde der Erde von der Stärke J befindet, wirken zwei gleiche, parallele, aber entgegengesetzt gerichtete Kräftesysteme (Fig. 303). In den Punkten 1, 2 . . . , die die Mengen $m_1, m_2 \dots$ von freiem Nordmagnetismus enthalten mögen, greifen die parallelen Kräfte $m_1 J, m_2 J \dots$ an. Ihre Gesamtwirkung läßt sich durch die Resultierende J ($m_1 + m_2 + \dots$) ersetzen, deren Angriffspunkt der Mittelpunkt N jener Kräfte ist (s. § 26). Für das Kräftesystem, das auf die Punkte mit freiem Südmagnetismus wirkt, ist S der Mittelpunkt. Die beiden Punkte N und S, in denen wir uns den gesamten freien Nord- und Südmagnetismus des Stabes konzentriert denken können, sind die Pole des Magneten. Ihre Verbindungslinie heißt die magnetische Achse. Die Stärke jedes Poles ist $m_1 + m_2 + \dots = \Sigma m$. Das Kräftepaar, das in N und S angreift, kann nur eine drehende, aber keine fortschreitende Bewegung veranlassen. Es dreht einen frei beweglichen Magnetstab in die Richtung der Kraftlinien.



Ist der Magnet nur in horizontaler Ebene frei drehbar (Fig. 304), so zerlegen wir die in N und S angreifenden Kräfte $J\Sigma m$ horizontal und vertikal. Wenn i den Neigungswinkel (Inklination) angibt, den die Kraftlinien des Feldes mit dem Horizont bilden, so sind die horizontalen Komponenten $H\Sigma m = J \cos i \Sigma m$. Nur diese kommen hier bei einer Drehung in Betracht. Sie wirken auf den um einen Winkel α aus dem magnetischen Meridian abgelenkten Magnetstab (Fig. 305) mit dem Drehmoment $H \cdot \Sigma m \cdot AN = H \cdot \Sigma m \cdot l \sin \alpha$, wenn wir mit l den Polabstand NS bezeichnen. Das Produkt $l\Sigma m$ aus dem Polabstand

Fig. 304.

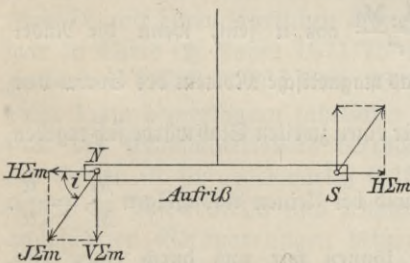
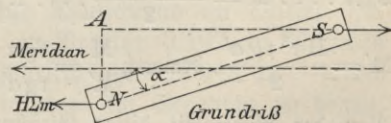


Fig. 305.

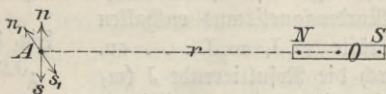


und der Polstärke heißt das magnetische Moment (M) des Stabes.

§ 232. Bestimmung des magnetischen Moments. a) Methode der § 232.
Ablenkung: Man befestigt den zu untersuchenden Magnetstab NS (Fig. 306) senkrecht zum magnetischen Meridian. Nach A in der Verlängerung von

NS wird eine kleine Kompaßnadel gebracht, die sich unter dem alleinigen Einfluß des Erdmagnetismus in die Richtung ns einstellen würde. Durch den Magneten wird sie aus dieser Lage um den Winkel α abgelenkt. Es seien m und m_1 die Polstärken von Magnetstab und Nadel, r die Entfernung ihrer Mitten A und O , ferner die Polabstände $NS=l$ und $ns=\lambda$.

Fig. 306.



Wenn λ sehr klein gegen r ist, so kann man $Nn = NA$ und $Sn = SA$ setzen. Als Gesamtwirkung der Pole N und S auf n ergibt sich dann nach dem Coulombschen Gesetz die abstoßende Kraft

$$K = \frac{m m_1}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{m m_1}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = \frac{2 m m_1 \cdot l \cdot r}{\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2} =$$

$$\frac{2 m m_1 \cdot l}{r^3 \left(1 - \frac{l^2}{4r^2}\right)^2} \text{ und bei Vernachlässigung von } \frac{l^2}{4r^2} \text{ gegen } 1$$

$$K = \frac{2 m m_1 \cdot l}{r^3} = \frac{2 M \cdot m_1}{r^3} \text{ Dyn.}$$

Mit der gleichen Kraft wird der Südpol s angezogen. Die Nadel erhält also in der Lage $n_1 s_1$ durch den Magnetstab das Drehungsmoment

$$K \cdot \lambda \cos \alpha = \frac{2 M \cdot m_1 \lambda}{r^3} \cos \alpha = \frac{2 M \cdot M_1}{r^3} \cos \alpha \quad (\text{Fig. 307}).$$

In der entgegengesetzten Richtung sucht die horizontale Komponente H des Erdmagnetismus die Nadel zu drehen. Das hierdurch verursachte Drehungsmoment $M_1 \cdot H \sin \alpha$ muß gleich $\frac{2 M \cdot M_1}{r^3} \cos \alpha$ sein, wenn die Nadel im Gleichgewicht ist. Wir finden so für das magnetische Moment des Stabes den Wert

$$\text{Wert} \dots M = \frac{H \cdot r^3 \cdot \text{tg} \alpha}{2} \dots \text{I. Für einen zweiten Stab würde sich ergeben}$$

$$M' = \frac{H r^3 \text{tg} \alpha'}{2}, \text{ demnach } \frac{M}{M'} = \frac{\text{tg} \alpha}{\text{tg} \alpha'}, \text{ und bei kleinen Ausschlägen } \frac{M}{M'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Von der Richtigkeit dieser Gleichung können wir uns durch einen einfachen Versuch überzeugen. Wir bestimmen die Ablenkung α , die der Magnetstab NS der Kompaßnadel ns in der Lage Fig. 306 erteilt. Hierauf setzen wir an NS einen zweiten, ganz gleichen Magnetstab an, wie das die

Fig. 307.

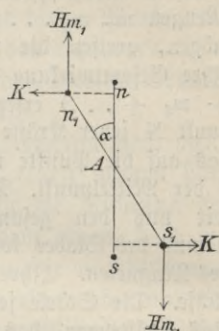


Fig. 308.

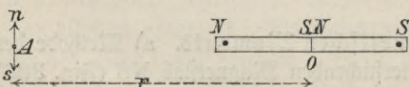


Fig. 308 angibt, und beobachten nun die doppelte Ablenkung 2α . Da die einanderstößenden Pole ihre Wirkung aufheben, die äußeren Pole aber den doppelten Abstand haben wie beim ersten Versuch, so müssen sich die Momente wie 2 zu 1 verhalten.

Die Gleichung $\frac{M}{M'} = \frac{a}{a'}$ ermöglicht nur den Vergleich zweier magnetischen Momente. Um M in absoluten Einheiten zu messen, müssen wir außer der Gleichung I noch eine zweite Beziehung zwischen M und H kennen.

b) Methode der Schwingung: Wir hängen den Magnetstab NS an einem Faden so auf, daß er sich in horizontaler Ebene frei drehen kann, lenken ihn aus dem magnetischen Meridian um einen kleinen Winkel ab und lassen ihn los. Er schwingt dann unter dem Einfluß des Erdmagnetismus nach demselben Gesetz wie ein physisches Pendel unter dem Einfluß der Schwere, da in beiden Fällen ein Drehmoment wirkt, das dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional ist (s. § 45 und § 231). Für kleine Schwingungswellen ist deshalb die Schwingungsdauer des Magnetstabes

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{T_0}{H \cdot \Sigma m l}} = 2\pi \sqrt{\frac{T_0}{H \cdot M}} \quad \dots \dots \dots \text{II.}$$

wo T_0 das auf die Drehachse bezogene Trägheitsmoment bedeutet. Aus den Gleichungen I und II ergibt sich

$$1. M = \frac{\pi}{t} \sqrt{2 T_0 \cdot r^3 \operatorname{tg} \alpha},$$

$$2. H = \frac{2\pi}{t} \sqrt{\frac{2 T_0}{r^3 \operatorname{tg} \alpha}}.$$

§ 233. **Variationen des Erdmagnetismus.** Die erdmagne- § 233.
tische Kraft ist für ein und denselben Ort weder der Größe noch der Richtung nach konstant. So war zu Paris die Deklination: 1580 11,05 östl., 1663 0°, 1814 22,06 westl., 1890 15,07 westl. Berlin hat jetzt (1908) eine westliche Deklination von etwa 9,02, Breslau von etwa 7°, mit einer jährlichen Abnahme von fast 0,01. Die Inklination war zu Paris im Jahre 1671 75° und hat seitdem immer langsam abgenommen (1780 71,08, 1885 65,03); in Berlin ist sie jetzt 66,03 mit einer kaum bemerkbaren jährlichen Abnahme. Die horizontale Intensität des Erdmagnetismus beträgt für Deutschland im Mittel 0,2. In Berlin ist sie gegenwärtig 0,189, in Breslau 0,197, in München 0,206, in Wien 0,209 und nimmt jährlich um 0,00015 zu. — Die angeführten Veränderungen heißen säkulare im Gegensatz zu denen, die im Laufe jedes Tages stattfinden. Bei uns hat die Deklinationssnadel ihre mittlere Richtung morgens um 10 und abends um 6 Uhr. Ihr Nordende weicht mittags zwischen 1 und 2 Uhr am meisten nach Westen ab, und zwar im Sommer um 7', im Winter um 5'.

Die wissenschaftlichen Methoden zur Erforschung des Erdmagnetismus verdanken wir Gauß (1832).

§ 234. § 234. Dimensionsformeln der absoluten magnetischen Einheiten. Nach dem Coulombschen Gesetz stoßen sich zwei gleichnamige Pole von der Stärke m in der Entfernung von r cm mit der Kraft $K = \frac{m^2}{r^2}$

Dyn ab, also ist die Polstärke $m = r \sqrt{K} \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$. Für das magnetische Moment folgt $M = ml \left[\text{cm}^{\frac{5}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$. Die bestmagnetisierten Stahlstäbe besitzen nach W. Weber ein durchschnittliches Moment von 40 [CGS] Einheiten pro Gramm. Das durch elektrische Ströme erreichbare Maximum der Magnetisierung beträgt 200 [CGS] Einheiten pro Gramm nach Waltenhofen.

Die Kraftäußerung, die ein magnetisches Feld von der Intensität J auf einen Pol von der Stärke m ausübt, ist $k = m \cdot J$ Dyn, demnach $J = \frac{k}{m} \left[\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$.

Teil II: Elektrostatik.

§ 235. § 235. Historische Grundversuche. Viele Körper erhalten durch Reiben die Fähigkeit, leichte Körperchen anzuziehen. Bereits 600 v. Chr. war von den Griechen diese merkwürdige Erscheinung am Bernstein (Elektron) beobachtet worden. Gilbert (1600) erkannte zuerst, daß auch bei anderen Körpern, z. B. Glas, Harzen, Schwefel, sobald sie gerieben wurden, jene Anziehungskräfte auftreten, die er

Fig. 309.

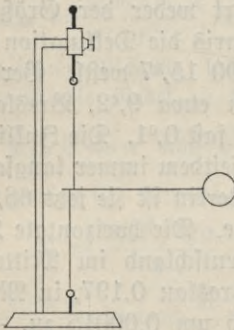
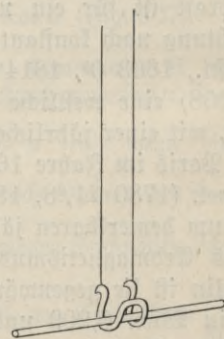


Fig. 310.



deshalb elektrische Kräfte nannte. Zu ihrem Nachweis benutzt man Holundermarkkugeln oder auch kleine Hohlzylinder aus Metallpapier, die an Fäden aufgehängt werden (elektrisches Pendel). Empfindlicher ist das Horizontalpendel Fig. 309. Zur Untersuchung von Stäben ist die Aufhängevorrichtung Fig. 310 sehr bequem. Legen wir einen geriebenen Hartgummistab in den Doppelhaken und nähern

unfere Hand dem geriebenen Ende, so beobachteten wir die zuerst von Boyle (1675) erwähnte Erscheinung, daß auch ein unelektrischer Körper einen elektrischen anzieht. — Otto von Guericke (1672) bemerkte, daß bei dem gewöhnlichen Versuch der Anziehung eine Abstoßung folgt. Um stärkere Wirkungen zu erzielen, bediente er sich einer Schwefelkugel, die er durch eine Kurbel in Rotation versetzte und mit der flachen Hand rieb. Von der so elektrisch gemachten Kugel sprangen knisternd kleine Funken auf genäherte Körper über, und im Dunkeln nahm er wahr, daß sie Licht ausstrahlte.

§ 236. **Leiter und Isolatoren.** Als Gray (1729) Reibungs- § 236. versuche mit einer Glasröhre machte, an deren einem Ende zufällig ein Kork saß, fiel ihm auf, daß der Kork leichte Körperchen anzog, also durch das Reiben der Röhre elektrisch geworden war. Auch einem Holzstäbchen, das er durch den Kork steckte, teilte sich der elektrische Zustand des Glases mit. Versuche, die er hierauf mit Drähten, Hanfschnüren, Seidenfäden usw. anstellte, brachten ihm die Erkenntnis, daß gewisse Körper, wie die Metalle, feuchte Hanfschnüre, der menschliche Körper, den elektrischen Zustand sehr gut fortleiteten, andere dagegen, wie Seide, Glas, Harze, so gut wie gar nicht. Hierdurch erklärte sich auch der Umstand, daß man bisher Metalle, die man in der Hand hielt, durch Reiben nicht elektrisch machen konnte. Bei einem Glasstab haftet der elektrische Zustand nur an den Stellen, die gerieben werden, bei einem Metallstabe verbreitet er sich über die ganze Oberfläche und wird durch die Hand zur Erde abgeleitet.

Alle Körper, auch Metalle, werden durch Reiben elektrisch, wenn man sie an einem Glasgriff hält oder an einem Seidenbändchen aufhängt. Die gewöhnlichen gelben Zigarrenbändchen sind hierzu recht geeignet. (Versuche: Man reibe Speckstein, einen Apfel, eine Zitrone mit einem Katzenfell.)

Die besten Elektrizitätsleiter (Konduktoren) sind die Metalle, Holzkohle, Graphit, außerdem viele Flüssigkeiten, z. B. verdünnte Säuren, in Wasser gelöste Salze, gewöhnliches Wasser, verdünnte oder stark erhitzte Gase, Flammen. Auch der menschliche Körper und die Erde gehören hierzu. Als schlechte Leiter (Isolatoren) erweisen sich Glas, Porzellan, alle Harze, Öle, Paraffin, Schwefel, tierische Haare, Seide.

Halbleiter sind trockenes Holz, Papier, Baumwolle, Fischbein.

Einen Körper von allen guten Leitern oder Halbleitern trennen, heißt ihn isolieren. Glas isoliert schlecht in feuchter Luft, da es sich mit einem dünnen, unsichtbaren Wasserhäutchen überzieht. Man entfernt die Wasserschicht durch Erwärmen mit einer nicht rußenden Flamme. Gefirnitztes Glas ist weit weniger hygroskopisch.

§ 237. **Zwei Arten von Elektrizität.** Wird eine mit Seide § 237. geriebene Glasröhre in den Doppelhaken der Aufhängevorrichtung Fig. 310 gelegt, so wird sie von jeder anderen mit Seide geriebenen Glasröhre abgestoßen. Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn man statt

der Glasröhren zwei Siegellackstangen oder Hartgummistäbe benutzt. Dagegen ziehen sich eine geriebene Glasröhre und eine geriebene Siegellackstange gegenseitig an. Dufay (1735), der diese Beobachtungen zuerst machte, folgerte hieraus:

1. Es gibt zwei verschiedene Arten Elektrizität.

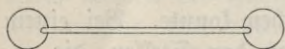
2. Gleichnamige Elektrizitäten stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Nach Dufay nannte man die beiden Elektrizitäten Glas- und Harzelektrizität. Da man aber gefunden hat, daß in einem und demselben Körper durch Anwendung verschiedener Reibzeuge sich sowohl die Glas- wie die Harzelektrizität erregen läßt, so hat man diese Namen aufgegeben und nennt nach Lichtenberg (1777) die in Glas durch Seide erregte Elektrizität positiv und die in Harz durch Seide erregte Elektrizität negativ.

So oft zwei ungleichartige Körper miteinander gerieben werden, zeigt sich der eine stets positiv, der andere negativ elektrisch.

Versuche: An den Enden eines dünnen Hartgummirohrs sind mit Siegellack zwei kreisrunde Platten aus Glas und Hartgummi gefittet. Ein zweites Rohr mit zwei gleich großen Holzbrettchen versehen, von denen das eine mit amalgamiertem Leder, das andere mit Katzenfell beklebt ist. Die Glasplatte wird mit dem amalgamierten Leder, die Hartgummiplatte mit dem Katzenfell gerieben.

Fig. 310a.



Hierauf legt man eins der Rohre in den Doppelhaken Fig. 310 und nähert das eine oder das andere Ende des zweiten Rohres.

Von den Körpern: Raubtierfell, Glas mit glatter Oberfläche, Wolle, mattes Glas, Seide, Metalle, Harze, Hartgummi, Leder mit Zinn-Zink-Amalgam, Speckstein, wird jeder, mit einem folgenden gerieben, positiv, und mit einem voranstehenden gerieben, negativ elektrisch.

Versuch: Man stellt einen Menschen auf einen Schemel mit Glasfüßen oder läßt ihn Gummischuhe anziehen. Reibt man seine Kleider mit Katzenfell, so wird er negativ, kämmt man ihn mit einem Hartgummikamme, so wird er positiv elektrisch.

§ 238. § 238. Das **Blattelektroskop** dient dazu, das Vorhandensein elektrischer Zustände nachzuweisen. Es besteht aus einem Metallstabe, der gewöhnlich am unteren Ende zwei Streifen aus Blattgold oder

Fig. 311.

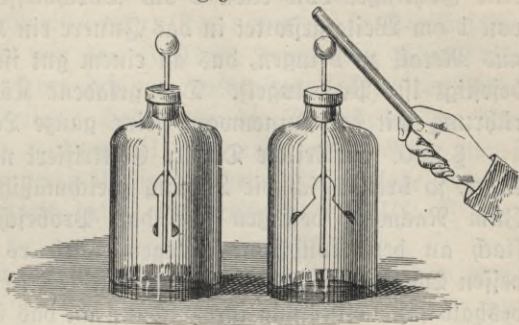


Aluminium, oben einen Metallknopf trägt. Zum Schutz gegen Luftströmungen sind die Blättchen von einem Glasgefäß umgeben, durch dessen Hals der Metallstab isoliert hindurchgeführt ist (Fig. 311). Haltbarer und für die meisten Versuche genügend empfindlich sind die von Kolbe¹⁾ angegebenen Elektroskope, bei denen Blättchen aus buntem Seidenpapier benutzt werden (Fig. 312).

¹⁾ Kolbe, Einführung in die Elektrizitätslehre. Berlin 1893.

Durch Berührung des Metallknopfes mit einem elektrischen Körper werden die Blättchen gleichnamig elektrisch und stoßen sich ab. Man sagt: das Elektroskop ist geladen, indem man sich vorstellt, daß durch die Berührung ein gewisses Etwas, was man Elektrizität nennt, von dem elektrischen Körper auf den Metallstab und die Blättchen übergeht. Durch Zuführung einer neuen, gleichnamigen Ladung wird der Ausschlag vergrößert; er geht zurück, wenn die neue Ladung ungleichnamig ist. Auf diese Weise läßt sich erkennen, ob ein Körper + oder — geladen ist.

Fig. 312.



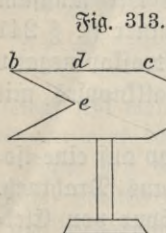
Sicherer ist das Verfahren, das auf folgender Beobachtung beruht: Nähern wir einem + geladenen Elektroskop einen + elektrischen Körper, so spreizen die Blättchen weiter auseinander; nähern wir langsam einen — geladenen Körper, so wird der Ausschlag kleiner (s. § 241 und 242). Das Umgekehrte zeigt sich, wenn wir das Elektroskop negativ geladen haben, was z. B. durch Peitschen des Metallknopfes mit einem starken Haarpinsel geschehen kann.

§ 239. **Sitz der Ladung.** Man stelle ein Elektroskop auf eine iso- § 239.
lierte Metallplatte und überdecke es mit einer Haube aus Drahtnetz. Ladet man die Haube, so zeigt das Elektroskop keine Spur von Elektrizität an, selbst wenn man seinen Knopf durch einen Draht leitend mit der Haube verbunden hat. Faraday (1839) stellte diesen Versuch in großem Maßstabe an. Er hing eine aus Latten gebaute Kammer, deren Wände mit Drahtgaze überzogen waren, an starken, seidenen Schnüren auf und begab sich mit einem empfindlichen Elektroskop in das Innere. Obgleich die Kammer hierauf so stark elektrisiert wurde, daß man von außen Funken aus ihr ziehen konnte, war im Innern an keiner Stelle die geringste elektrische Wirkung wahrzunehmen. Hieraus scheint hervorzugehen, daß der Sitz der elektrischen Ladung bei einem Leiter seine Oberfläche ist. Cavendish (1772) und Biot (1816) wiesen dies dadurch nach, daß sie eine geladene Metallkugel isoliert aufhingen und durch zwei hohle Halbkugeln umschlossen, die mit isolierenden Handgriffen versehen waren. Als die innere Kugel mit der äußeren zur Berührung gebracht und hierauf die Halbkugeln voneinander entfernt wurden, zeigte sich die innere Kugel unelektrisch. Ihre Ladung war auf die Halbkugeln übergegangen. — Hiernach ist es für die Elektrifizierung eines Konduktors gleichgültig, ob er hohl oder massiv

ist. Ein mit Stanniol belegter Pappzylinder leistet dasselbe wie ein metallischer Vollzylinder von gleichen Abmessungen.

Der Versuch mit den Halbkugeln zeigt uns auch, wie wir eine Ladung eines kleinen Körpers vollständig auf ein Elektroskop übertragen können. Statt des Knopfes schrauben wir auf die Metallstange eine Hohlkugel von etwa 5 cm Durchmesser. Eine runde Öffnung von 1 cm Weite gestattet in das Innere ein Kügelchen oder Scheibchen aus Metall zu bringen, das an einem gut isolierenden, langen Halter befestigt ist (Probekugel). Das geladene Kügelchen gibt bei der Berührung mit der Innenwand seine ganze Ladung ab.

§ 240. § 240. **Elektrische Dichte.** Elektrifiziert man eine isolierte Metallkugel, so breitet sich die Ladung gleichmäßig auf der Oberfläche aus. Zum Nachweis benutzen wir das Probekügelchen. Indem wir es flach an den Konduktor anlegen, wird es gleichsam ein Teil von dessen Oberfläche, während die bedeckte Stelle nun innerhalb liegt und deshalb fast vollständig ihre Ladung an das Scheibchen abgibt. Heben wir dieses ab und übertragen die aufgenommene Ladung auf ein empfindliches Elektroskop, so erhalten wir stets den gleichen Ausschlag, an welcher Stelle auch vorher die Kugel berührt wurde. Ist sie hohl

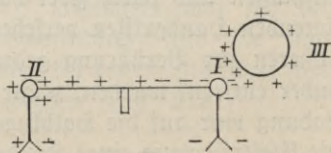


und mit einer Öffnung versehen, so können wir mit dem Probekügelchen auch die innere Oberfläche untersuchen und uns so überzeugen, daß sich dort keine Spur von freier, d. h. ableitbarer Elektrizität befindet (Versuch von Coulomb). Prüfen wir auf dieselbe Weise einen Konduktor von der Form Fig. 313, so sind die Ausschläge sehr verschieden. Die stärkste Wirkung ergibt sich nach einer Berührung des

Punktes a. Die Ausschläge werden kleiner, wenn man das Scheibchen der Reihe nach an die Punkte b, c, d anlegt. Die Ladung des Konduktors erweist sich also dort am dichtesten, wo seine Oberfläche eine Spitze, d. i. eine Stelle größter Krümmung hat, und scheint in dem Maße abzunehmen, wie die Krümmung geringer wird. Im tiefsten Punkte e des Hohlraums läßt sich auch hier freie Elektrizität nicht nachweisen. — In der angegebenen Art verteilt sich stets eine Ladung auf den Konduktor, wie stark wir ihn auch elektrifizieren. Das Verhältnis der elektrischen Dichten bleibt dasselbe.

§ 241. § 241. **Elektrifizierung durch Induktion.** Wir verbinden zwei gleiche Elektroskope (Fig. 314) durch einen Metalldraht, an dem sich ein isolierender Handgriff befindet, und nähern dem Knopf von I den positiv geladenen Konduktor III. Es zeigt sich dann bei

Fig. 314.



beiden Elektroskopen ein Ausschlag. Wir untersuchen die Art der Ladung mit einem Probefleischchen und finden I negativ, II positiv geladen. Legen wir das Fleischchen an verschiedene Punkte des Verbindungsdrahtes an und gehen dabei in der Richtung von II nach I, so können wir eine allmählich bis Null abnehmende positive Ladung des Drahtes, hierauf eine rasch anwachsende negative konstatieren. Die Indifferenzstelle, wo sich keine Ladung nachweisen läßt, liegt näher an I. Die Erscheinung verschwindet, sobald wir den Influenz erregenden Körper III genügend entfernen, und kehrt sich um, wenn wir III in der Nähe des Knopfes von II aufstellen. Heben wir die Drahtbrücke an dem isolierenden Handgriff ab, während III sich noch in der Nähe von I befindet, und entfernen dann erst III, so sind beide Elektroskope dauernd geladen, und zwar I negativ, also entgegengesetzt wie III, II aber positiv.

(Man wiederhole den Versuch mit dem negativ geladenen Konduktor III.)

Berühren wir bei der Versuchsanordnung Fig. 314 den Knopf von I oder II oder irgend eine Stelle des Verbindungsdrahtes mit dem Finger und entfernen zuerst den Finger, hierauf den positiven Konduktor III, so divergieren die Blättchen beider Elektroskope mit negativer Elektrizität. Davon macht man Anwendung, um ein Elektroskop durch Influenz ungleichnamig zu laden. (Erkl. in § 242.)

§ 242. Die **Symmersche Hypothese**. Um die zahlreichen Beobachtungstatsachen besser übersehen und anschaulicher beschreiben zu können, vergleicht man die elektrischen Erscheinungen mit ähnlichen, aber leichter verständlichen Naturvorgängen, die hierzu um so geeigneter sind, je weiter die beobachtete Übereinstimmung reicht. So ist man zu einer einheitlichen Darstellung zuerst dadurch gelangt, daß man das Verhalten bewegter Flüssigkeiten zur Erklärung elektrischer Vorgänge herbeizog. Die Hypothese der elektrischen Fluida besitzt auch heute noch ihren Wert, denn sie ermöglicht für einen großen Kreis von Erscheinungen eine einfache und für den Anfang auch ausreichende Klarstellung. Allerdings müssen wir uns stets bewußt bleiben, daß die benutzten Hilfsvorstellungen keine ausgemachte Wahrheit bedeuten, sondern nur bildlich zu verstehen sind.

Nach Symmer (1759) sind die positive und negative Elektrizität zwei gewichtslose Flüssigkeiten, deren Teilchen sich abstoßen oder anziehen, je nachdem sie von derselben oder der entgegengesetzten Art sind. Jeder neutrale Körper enthält die Fluida gemischt in gleicher Menge.

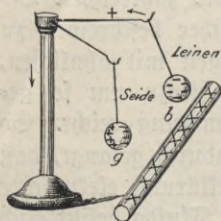
Durch Reibung zweier verschiedenartiger Körper treten an den Berührungsf lächen elektromotorische Kräfte auf, die eine Trennung der Elektrizitäten zu bewirken suchen, so daß sich an dem Reibzeug

überwiegend die eine, an dem geriebenen Körper die andere ansammelt. Hierbei wird Elektrizität weder erzeugt noch vernichtet, es findet nur eine andere Verteilung statt. In einem Isolator sind die Fluida nicht frei beweglich, deshalb erscheint er nur an den Stellen elektrisch, wo er gerieben wird, oder wo er durch Berührung freie Elektrizität von einem bereits elektrischen Körper erhält. Ein isolierter Konduktor wird durch Reibung oder Berührung gleichzeitig überall elektrisch, da sich in ihm die Fluida fast ohne Widerstand ausbreiten können.

Nähern wir einer isolierten Metallmasse einen positiv elektrischen Glasstab, so wird die negative Elektrizität des Konduktors angezogen, seine positive abgestoßen. Das dem Glasstabe zugewandte Ende wird also ungleichnamig, das abgewandte gleichnamig elektrisch erscheinen. Nach Entfernung des Glasstabes mischen sich die getrennten Fluida wieder vollkommen, und der Konduktor ist unelektrisch. Dieses Zusammenfließen wird verhindert, wenn man einen Konduktor benutzt, der aus zwei leicht trennbaren Teilen besteht, und die Trennung vornimmt, ehe der Glasstab entfernt wird. Dann muß der anfänglich dem Stabe näher gelegene Teil dauernd negativ, der andere positiv elektrisch sein.

Ein leicht beweglicher Konduktor, z. B. eine an einem Seidenfaden aufgehängte Holundermarkkugel (Fig. 315), bewegt sich nach dem Glasstabe hin, da die Anziehung zwischen der positiven Elektrizität des Stabes und der ihr näheren negativen Influenzelektrizität der Kugel die Abstoßung der positiven Elektrizitäten überwiegt. Sobald die Kugel den Stab berührt, gleicht sie ihre $-E$ mit einer gleichen Menge $+E$ des Stabes aus und wird, da sie nun positiv wie dieser geladen ist, abgestoßen. Aus je besser leitendem Stoff die Kugel besteht, desto stärker ist die Influenzwirkung und demnach auch die Anziehung und Abstoßung. Ein Kügelchen aus Schellack wird fast gar nicht angezogen.

Fig. 315.



Warum wird eine Holundermarkkugel, die an einem leinenen Faden hängt, aus größerer Entfernung angezogen als eine gleiche, an Seide aufgehängene Kugel?

Jeder Ladung und Entladung durch Berührung geht eine Influenzwirkung voraus. Nähern wir z. B. einer $+$ geladenen Kugel einen Fingerknöchel, so wird dieser, da unser Körper mit der Erde einen einzigen Konduktor bildet, durch Influenz $-$ geladen. Mit zunehmender Annäherung wächst diese Ladung, bis sie sich mit der gleichen $+$ Ladung der Kugel gewöhnlich schon vor der Berührung in Gestalt eines die Luftschicht durchbrechenden Funkens ausgleicht.

Bei der Ladung eines Elektroskops durch Influenz ruft der über dem Knopf befindliche positiv=elektrische Glasstab zunächst die gewöhnliche Verteilung hervor. Durch Annäherung des Fingers wird auch unser Körper durch Influenz elektrisch, und die negative Ladung des Fingers vermindert die Wirkung des Glasstabes auf das Elektroskop, der Ausschlag der Blättchen geht deshalb zurück. Bei der Berührung fließt — E von dem Finger auf das Elektroskop über, da er wegen der Größe des ableitenden Körpers stärker als der Metallknopf durch Influenz geladen ist. Die Blättchen fallen deshalb ganz zusammen, um sofort mit einer negativen Ladung zu divergieren. Entfernen wir jetzt den Finger, so wirkt der Glasstab wieder in demselben Grade verteilend auf das Elektroskop wie anfangs, und die Blättchen können nun die Ladung —, 0 oder + zeigen, je nach der Menge der vorher vom Finger übergegangenen negativen Ladung. Zuletzt entfernen wir den Glasstab. Die bisher gebundene negative Ladung des Knopfes breitet sich dann auch über die Blättchen aus, und das Elektroskop ist ungleichnamig geladen.

Anmerkung. Vor Symmer hat Franklin (1751) eine Erklärung der elektrischen Erscheinungen auf die Hypothese gegründet, daß es nur ein einziges elektrisches Fluidum, das positive, gibt. Jeder Körper, der mehr davon enthält als die Umgebung, ist positiv elektrisch, wenn er weniger enthält, negativ. Diese Vorstellung entspricht der Ansicht, die wir über warme und kalte Körper haben. Die Kälte ist nicht etwas dem Wesen nach anderes als die Wärme. Ein Kilogramm Hg von -5° enthält nur weniger Wärme als ein Kilogramm Hg von $+5^{\circ}$. Wie in der Wärmelehre der Gefrierpunkt des Wassers willkürlich als Nullpunkt angenommen wird, so gilt in der Elektrizitätslehre der elektrische Zustand der Erde als ein solcher Nullpunkt. Ein Körper, der mit der Erde verbunden weder Elektrizität an diese abgibt, noch von ihr aufnimmt, ist unelektrisch. Ein neutraler Körper, der auf irgend eine Weise + elektrisch erregt wird, nimmt eine gewisse Menge des Fluidums auf; die gleiche Menge hat ein anderer Körper abgegeben und ist dadurch negativ elektrisch geworden.

§ 243. **Schirmwirkung.** Die Influenzerregung findet durch die § 243. Luft statt, die zu den Isolatoren gehört. (Siehe jedoch § 269.) Wir können bereits hieraus schließen, daß auch durch einen anderen Isolator die Influenzwirkung hindurchgehen wird. Es läßt sich dies leicht durch den Versuch bestätigen, wenn wir zwischen ein Elektroskop und den influenzerregenden Körper eine Scheibe aus Glas oder Hartgummi bringen. Eine genügend große Metallplatte hebt die Wirkung auf das Elektroskop vollständig auf, wenn sie zur Erde abgeleitet ist. Stellt man sie aber gut isoliert auf, so wird eine Influenzerregung des Elektroskops nicht verhindert. Erklärung: In beiden Fällen wird

die Metallplatte durch Verteilung elektrisch. Während aber im ersten Falle die gleichnamige Influenzelektrizität der dem Elektroskop zugewandten Seite zur Erde abfließt und die entgegengesetzte durch die Elektrizität des erregenden Körpers gebunden ist, wirkt im zweiten Falle die gleichnamige Ladung der Platte auf das Elektroskop.

§ 244. § 244. **Faradaysches Gefäß.** Ein isolierter Hohlkonduktor, etwa eine tiefe Blechbüchse, ist durch einen Draht mit dem Knopf eines Elektroskops verbunden. Bringen wir eine positiv geladene, an einem Seidenfaden hängende Metallkugel in das Gefäß, so divergieren die Blättchen mit positiver Ladung, da durch Influenz die Innenwand negativ, die Außenwand positiv erregt wird. Ist die Kugel tief genug eingeführt, so ändert sich der Ausschlag nicht, wenn wir sie hin- und herbewegen. Ziehen wir sie wieder heraus, ohne die Wandung zu berühren, so verschwindet der Ausschlag.

Wir senken sie abermals hinein, bis dieselbe größte Divergenz der Blättchen sich zeigt wie vorher, und lassen die Kugel das Gefäß berühren. Entfernen wir sie jetzt aus dem Innern, so hat das auf das Elektroskop gar keinen Einfluß. Die Kugel aber ist entladen, sie muß also ihre Elektrizität vollständig an das Gefäß abgegeben haben, und zwar an die Außenwand, denn im Innern läßt sich mit einem Probescheibchen keine Spur von Elektrizität nachweisen. Der Versuch zeigt, daß die durch Influenz erregte äußere Ladung gleich der der Kugel ist. Ebenso groß muß aber auch die innere Ladung gewesen sein, denn durch die Berührung ist sie von der positiven Ladung der Kugel vollständig neutralisiert worden. Der Versuch läßt ferner darauf schließen, daß jeder elektrische Körper, der in einem Zimmer frei aufgestellt ist, stets eine gleiche und entgegengesetzte Ladung der Wände hervorrufen muß.

Wie kann man das Faradaysche Gefäß durch einen positiv elektrischen Körper gleich stark negativ laden? Wie läßt sich zeigen, daß die durch Reibung erregten entgegengesetzten Ladungen gleich sind?

§ 245. § 245. **Elektrostatistischer Druck. Spitzenwirkung.** Jedes elektrische Teilchen eines geladenen Konduktors, auf dem die Elektrizität im Gleichgewicht ist, erfährt von allen übrigen eine Abstoßung, die in jedem Punkte senkrecht zur Oberfläche gerichtet sein muß. (Warum?) Diese Abstoßung wirkt wie ein Druck auf die umgebende Luft und ist dem Quadrat der Dichte proportional. Denn wäre es möglich, an irgend einer Stelle A die elektrische Ladung zu verdoppeln, ohne sie auf der übrigen Oberfläche zu verändern, so würde die auf A ausgeübte Abstoßung verdoppelt werden (§ 253). Da aber die Dichte in A nur dann zunimmt, wenn sie in demselben Verhältnis an jeder anderen Stelle wächst, so muß die in A wirkende Kraft viermal so groß werden, wenn man die Dichte verdoppelt.

Laden wir allmählich einen Konduktor mit Spitze, so erreicht

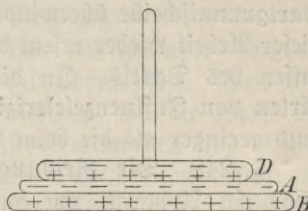
der elektrostatische Druck an dieser bald eine solche Größe, daß die in ihrer Nähe befindlichen und gleichnamig elektrifizierten Luft- und Staubteilchen abgeschleudert werden; andere nehmen ihren Platz ein, und der Konduktor entladet sich nach und nach, indem es den Anschein hat, als ob die Elektrizität an der Spitze ausströme. Das zischende Geräusch, das man hierbei hört, rührt von der entstehenden Luftströmung her, die sich durch eine Kerzenflamme sichtbar machen läßt (elektrischer Wind).

Man kann einen elektrischen Körper A auch dadurch entladen, daß man ihm einen unelektrischen Leiter B nähert, der mit einer Spitze versehen ist. Die ungleichnamige Influenzelektrizität von B wird durch den elektrischen Wind nach A geführt und neutralisiert hier einen Teil der Ladung. Ist B mit der Erde leitend verbunden, so wiederholt sich der Vorgang bis zur Entladung von A. Hat man B isoliert, so kann die gleichnamige Influenzelektrizität nicht abfließen, und B wird sich bis zu einem gewissen Grade gleichnamig laden. Es wird gleichsam durch die Spitze ein Teil der Elektrizität von A aufgesaugt.

Veruche: Man versehe den Knopf eines Elektrofops mit einer nach oben gerichteten Spitze und bewege einen geladenen Glasstab darüber hin. — Man zeige, daß Flammen und Wasserstrahlen, die leitend mit einem Konduktor verbunden sind, sich wie sehr gute Spitzen verhalten.

§ 246. **Der Elektrophor.** Die Gesetze der Influenzwirkung § 246. finden eine praktische Anwendung beim Elektrophor, dessen Erfindung wir Wilke (1762) und Volta (1775) verdanken. In der jetzt üblichen Ausführung besteht er aus einer runden Hartgummischeibe A, der eine metallene Form oder Platte B als Unterlage dient, und einem runden, mit Glasgriff versehenen Metalldeckel von etwas kleinerem Durchmesser (Fig. 316). Man macht die Hartgummischeibe durch Peitschen mit einem Fuchsschwanz — elektrisch und nähert in möglichst paralleler Lage zu A den Deckel D. Dieser wird durch Verteilung an der unteren Seite +, an der oberen — elektrisch. Berührt man D, so fließt die negative Ladung nach der Erde ab, und der Deckel erweist sich nach seiner Entfernung von A um so stärker + elektrisch, je näher wir ihn anfangs an A herangebracht haben. Nähert man jetzt D den Fingerknöchel, so springt ein Funke über, der Deckel ist entladen. Die stärkste Ladung von D erzielt man, wenn D auf A aufgesetzt wurde. Da die Platten niemals vollkommen eben sind, so findet eine Berührung nur in wenigen Punkten statt. Die direkt von A auf D übergehende negative Ladung ist deshalb so gering,

Fig. 316.



daß dieser Nachteil nicht in Betracht kommt gegenüber dem Vorteil, den die große Nähe der Platten verschafft. Die Form B hat den Zweck, die Ladung der Hartgummischeibe vor Verlust an die umgebende Luft zu schützen, wenn der Deckel nicht aufliegt. Da B nicht isoliert ist, so wird sie durch die negative Ladung von A durch Influenz positiv elektrisch. Nach dem Abheben des Deckels bindet die positive Elektrizität von B zum großen Teil die negative von A, so daß A lange Zeit seine Ladung behält.

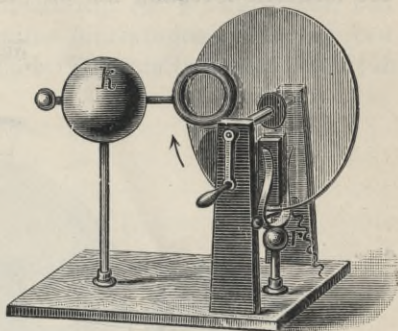
Man kann den entladenen Deckel immer wieder von neuem laden, wenn man ihn aufsetzt, ableitend berührt und aufhebt.

§ 247. § 247. **Der Elektrophor als Arbeitstransformator.** Wenn wir einen Glasstab durch Reiben elektrisch machen, so leisten wir dabei eine mechanische Arbeit. Der elektrisch gewordene Glasstab zieht unelektrische Körper an, und dadurch können wir einen Teil unserer Arbeit, allerdings nur einen sehr geringen, wiedergewinnen. Es liegt dies daran, daß durch das Reiben des Stabes auch eine andere, von uns nicht beabsichtigte Wirkung hervorgerufen wird: der Stab wird warm, der größte Teil unserer Arbeit setzt sich in Wärme um. Der Elektrophor ist bereits ein viel vorteilhafterer Transformator. Es genügt ein einmaliges Reiben der Hartgummischeibe, um fast unbegrenzte Ladungen des Deckels und damit eine fast unerschöpfliche Quelle elektrischer Arbeitsfähigkeit zu erhalten. Woher stammt diese Energie? Wenn wir den Deckel aufheben, müssen wir der Schwere entgegen eine Arbeit leisten. Diese kann jedoch nicht die gesuchte Ursache sein, da nachher der Deckel gesenkt wird und dadurch theoretisch die genau gleiche Arbeit wiedergewonnen werden könnte. In der Tat ist aber die zur Hebung des elektrisch geladenen Deckels nötige Arbeit größer als die allein zur Überwindung der Schwerkraft erforderliche, da wir außerdem die elektrische Anziehung von Deckel und Hartgummischeibe überwinden müssen. Allerdings wird auch ein Teil dieser Arbeit wieder ersetzt durch die elektrische Anziehung beim Herablassen des Deckels. In diesem Falle enthält aber der Deckel beide Arten von Influenzelektrizität, die Anziehung beim Aufsetzen ist deshalb geringer als die beim Abheben.

§ 248. § 248. **Die Reibungselektrifiziermaschine** ist wie der Elektrophor ein Apparat, um durch mechanische Arbeit elektrische Energie zu erhalten. Ihre primitivste Form, eine Schwefelkugel, die mit der Hand gerieben wurde, erwähnten wir bereits in § 235. Seitdem hat sie viele Umwandlungen durchgemacht und mannigfache Verbesserungen erfahren. Die Scheibenmaschine (Fig. 317), die gegenwärtig noch in Gebrauch ist, wurde von Planta (1760) eingeführt. Eine kreisrunde Scheibe aus hartem Glase sitzt auf einer isolierenden Achse, um die sie durch eine Kurbel gedreht werden kann. Das gleichfalls isolierte Reibzeug besteht aus zwei amalгамиerten Lederkissen, die durch

Federn von beiden Seiten an die Scheibe nur so stark angedrückt werden, daß eine gleichmäßige, gute Berührung stattfindet. Mit den Rissen ist ein isolierter Konduktor r leitend verbunden. Der große, auf hoher Glas Säule befestigte Konduktor K trägt einen Metallstab mit zwei Saugringen, die auf den inneren, der Scheibe zugewandten Seiten mit zahlreichen Metallspitzen versehen sind. Ehe man die Maschine in Gang setzt, verbindet man den Konduktor r und dadurch auch das Reibzeug leitend mit der Erde. (Warum?) Rotiert die Scheibe, so wird sie durch Reibung positiv, das Reibzeug negativ elektrisch. Die $-E$ fließt nach der Erde ab, die $+E$ haftet an der Scheibe

Fig. 317.



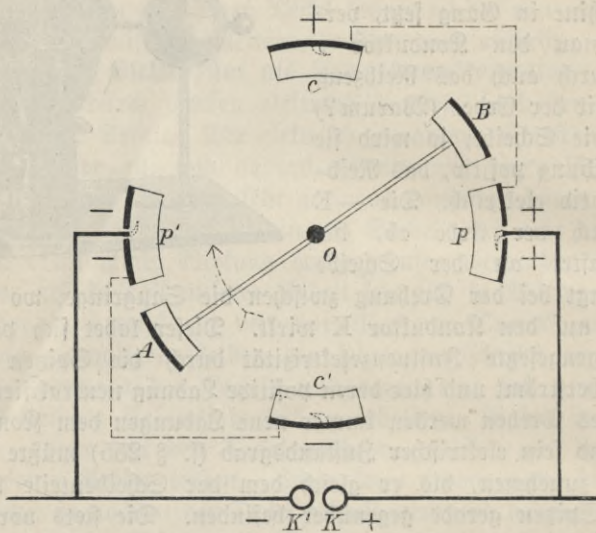
und gelangt bei der Drehung zwischen die Saugringe, wo sie durch Influenz auf den Konduktor K wirkt. Dieser ladet sich positiv, da die entgegengesetzte Influenz elektrizität durch die Spitzen auf die Scheibe überströmt und hier deren positive Ladung neutralisiert. Durch fortgesetztes Drehen werden immer neue Ladungen dem Konduktor K erteilt, und sein elektrischer Zustandsgrad (s. § 255) müßte eigentlich so lange zunehmen, bis er gleich dem der Scheibenteile wäre, die sich den Spitzen gerade gegenüber befinden. Die stets vorhandenen Verluste infolge mangelhafter Isolation bewirken, daß die maximale Ladung von K unter der theoretisch erreichbaren Grenze bleibt. Enthält die Luft wenig Feuchtigkeit, wie es bei uns im Winter bei trockenem Wetter der Fall ist, so kann man dem Konduktor einer mittleren Maschine leicht Funken bis 10 cm Länge entziehen.

Durch die Reibungsmaschinen wird nur ein geringer Bruchteil der aufgewandten Arbeit in elektrische Energie übergeführt. Weit günstiger wirken die sogenannten Influenzmaschinen, wie sie zuerst von Holz und Töpfer in sinnreicher Weise konstruiert worden sind (1865).

§ 249. Das **Multiplikationsprinzip**. Das bei den Influenzmaschinen benutzte Prinzip der sogenannten Multiplikation läßt sich leicht an dem in Fig. 318 schematisch dargestellten Apparate verständlich machen. Ein Glasstab, der um eine Achse O gedreht werden kann, trägt an seinen Enden zwei mit Stanniol bezogene Korke A und B . Die isoliert und fest aufgestellten vier Blechrohre p , p' , c , c' sind passend aufgeschnitten, so daß sie die Rotation von AB nicht verhindern. Zwischen p und c , desgleichen p' und c' sind Leitungsdrähte angelegt. Durch eine Öffnung in der äußeren Wandung von p und p' ragt ein Treppenpinsel in das Innere. Der von p ist mit dem

Konduktor K, der von p' mit K' leitend verbunden. Die Metallpinjel innerhalb c und c' sind von den Röhren nicht isoliert. — Laden wir p' negativ, so wird, wenn bei einer Drehung in der Pfeilrichtung A in das Innere von p' und so in Berührung mit dem Metallpinjel gelangt, A durch Verteilung positiv und K' negativ elektrisch. Nach der weiteren Drehung um 90° kommt A in Kontakt mit dem Pinjel

Fig. 318.



von c und gibt seine $+$ -Ladung vollständig an c und p ab (§ 244). Wenn wir nochmals um 90° drehen, befindet sich A innerhalb von p . Dort wird A negativ und K positiv elektrisch. Gleichzeitig ist aber B innerhalb p' positiv, demnach K' stärker negativ geladen worden. Endlich gelangt A nach c' und B nach c . Dabei geht die $-E$ von A auf c' und p' , die $+E$ von B auf c und p über. So wachsen die Ladungen von p und p' , desgleichen die von K und K' bei fortgesetzter Drehung rasch an. Stehen K und K' nahe aneinander, dann gleichen sich ihre Ladungen durch überspringende Funken aus.

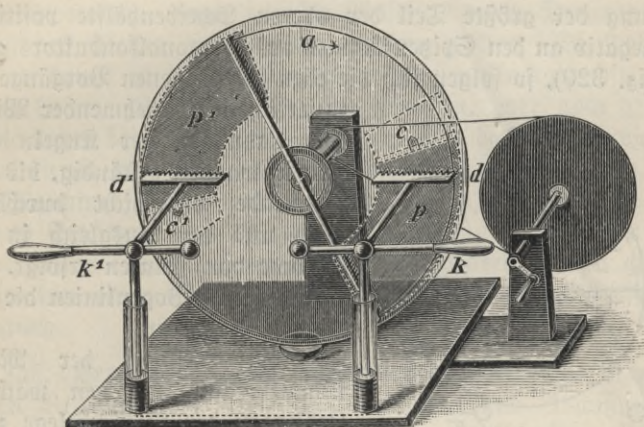
Wir hatten angenommen, daß zur Anregung des Apparates eine Ladung von außen nach p' gebracht wird. Es ist dies nicht nötig, sobald der elektrische Zustand von p c und p' c' aus irgend welchen Gründen nicht vollkommen gleich ist. Da eine derartige, sehr kleine Differenz fast immer zwischen isolierten Leitern besteht, in dem vorliegenden Falle sie auch durch eine ungleichmäßige Reibung der Pinjel verursacht wird, so gehört der Apparat zu den selbsterregenden.

§ 250.

§ 250. Die Holtzsche Influenzmaschine. Eine gefirniste Glas-scheibe a (Fig. 319), die durch Kurbel und Schnurlauf in rasche

Umdrehungen versetzt werden kann, hat vor sich die Saugspitzen (d , d') von zwei isolierten und verschiebbaren Konduktoren (k , k') und hinter sich eine sie etwas überragende, gleichfalls gefirnigte feste Glasscheibe, die den Saugspitzen gegenüber mit Ausschnitten (c , c') versehen ist. Unter dem rechten und über dem linken Ausschnitt sind auf der äußeren Seite der festen Scheibe Papierbelege (p , p') aufgeklebt, von denen Kartonspitzen in die Ausschnitte hineinragen. Ein an den Enden mit Spizen besetzter Messingstab (Diagonalkonduktor) läßt sich

Fig. 319.



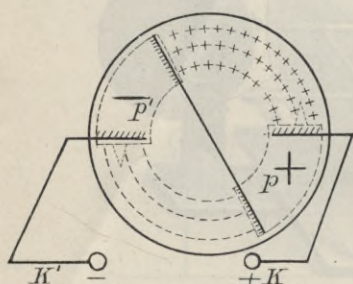
auf der Vorderseite der beweglichen Scheibe durch einen Stift in der Mitte aufstecken. Wir drehen ihn so, daß seine Spizen den oberen Rändern der Papierbelege gegenüberstehen. — Die Maschine läßt sich am leichtesten anregen, wenn die Kugeln des Hauptkonduktors k , k' auseinandergezogen und die kleinen Verstärkungsflaschen (§ 266) entfernt sind. Es genügt, einem der Papierbelege anfangs eine schwache Ladung zu erteilen. Wir legen z. B. an p' eine negativ elektrisierte Hartgummiplatte an und drehen die Maschine langsam den Kartonspitzen entgegen. Bereits nach wenigen Umdrehungen bewegt sich die Maschine merklich schwerer, wir hören ein zischendes Geräusch, und zwischen den Kugeln des Hauptkonduktors geht ein kontinuierlicher Funkenstrom über.

Erklärung: Die negative Anfangsladung der linken Belegung p' erregt durch Verteilung den Diagonalkonduktor. Von seinen Spizen führt der elektrische Wind links $+E$, rechts $-E$ nach der beweglichen Scheibe. Unter dem Einfluß der $-E$ ladet sich die rechte Belegung p durch Influenz positiv.

Die rotierende Scheibe führt ihre positive Ladung an die Kartonspitze von p , die negative an die von p' heran. Dadurch werden die

bereits vorhandenen Ladungen beider Belege durch Influenz verstärkt, indem gleichzeitig ein Teil der Scheibenladung neutralisiert wird. Sobald der positive Rest an den Spizenkamm d des Hauptkonduktors k gelangt, ladet sich dessen Kugel positiv, während negative Elektrizität aus den Spizen auf die Scheibe strömt und sich mit der dort noch vorhandenen positiven Elektrizität ausgleicht. In entsprechender Weise wirkt gleichzeitig die negative Restladung der Scheibe auf den Konduktor k' . Seine Kugel erhält eine negative Ladung, und positive Elektrizität fließt aus den Spizen d' auf die Scheibe ab, wo sie die negative Restladung neutralisiert. Da bereits bei der ersten halben Umdrehung der größte Teil der oberen Scheibenhälfte positiv, der untere negativ an den Spizenkammern des Diagonalkonduktors geladen wird (Fig. 320), so folgen sich die eben beschriebenen Vorgänge kontinuierlich mit zunehmender Wirkung.

Fig. 320.



Die Ladungen der Kugeln von k und k' wachsen beständig, bis die sie trennende Luftschicht durchbrochen wird und der Ausgleich in einem Strome von Funken erfolgt, die in rötlichblauen Bogenlinien die beiden Kugeln verbinden.

Die Leistung der Maschine nimmt rasch mit den wachsenden Ladungen der Papierbelege zu und erreicht bald einen größten Wert,

der von der Isolationsfähigkeit der beweglichen Scheibe abhängt.

Sobald der Funkenstrom einsetzt, übernimmt der gleichsam nun geschlossene Hauptkonduktor auch teilweise die Funktionen des Diagonalkonduktors. Dieser bildet dann nur eine Art Nebenschluß. Dreht man ihn ein wenig über die Ränder der Papierbelege hinaus, so wird der Funkenstrom lebhafter. (Warum?) —

Die Maschine läßt sich auch ohne Diagonalkonduktor in Tätigkeit setzen. Doch muß man die Kugeln von k und k' anfangs bis zur Berührung zusammenschieben und erst auseinanderziehen, wenn die Maschine angeregt ist. Es tritt aber dabei der Übelstand auf, daß bei zu großer Entfernung der Kugeln die Maschine plötzlich versagt und von neuem geladen werden muß.

Man vergleiche die Holtzsche Maschine ohne den Diagonalkonduktor mit dem Apparat des § 249 und berücksichtige, daß die Gefäße p und e durch die Belegung p , die Gefäße p' und e' durch die Belegung p' ersetzt sind. Die Wirkung der Pinsel wird durch die Kartonspizen und die Spizen der Saugkämme hervorgebracht. Die rotierende Scheibe übernimmt die Rolle der Überträger A und B .

§ 251. § 251. Die Holtzsche Maschine als Arbeitstransformator. Wenn die Maschine nicht geladen ist, so haben wir bei der Drehung der

Scheibe nur die geringen Reibungswiderstände zu überwinden, und die Bewegung setzt sich deshalb auch noch einige Zeit nach Loslassen der Kurbel fort. Die geladene Maschine kommt weit schneller zum Stillstand, wenn wir sie nach Erreichung der gleichen Drehgeschwindigkeit sich selbst überlassen. Der Grund liegt in den elektrischen Anziehungen und Abstoßungen, die im zweiten Falle auftreten. Die + elektrische obere Scheibenhälfte (Fig. 320) wird von der — geladenen Belegung p' angezogen, von + p abgestoßen; die — elektrische untere Scheibenhälfte erfährt von — p' eine Abstoßung, von + p eine Anziehung. Diese vier Wirkungen unterstützen sich also gegenseitig und müssen überwunden werden, wenn wir die Maschine durch Drehung in der Richtung des Pfeiles in Tätigkeit erhalten wollen. Die dabei aufgewendete Arbeit ist die Quelle der elektrischen Energie, die uns die Maschine liefert. Leiten wir der stillstehenden, aber noch geladenen Maschine rechts bei k positive Elektrizität, links bei k' gleich viel negative Elektrizität von außen zu, etwa mit Hilfe einer zweiten, gleichartigen Maschine, so beginnt sich die Scheibe nach Abnahme des Schnurlaufs und Erteilung eines kleinen Antriebes in der Richtung der Kartonspitzen immer rascher und rascher zu drehen. Wir gewinnen so bereits hier einen Einblick in das Prinzip der elektrischen Arbeitsübertragung.

§ 252. **Versuche mit der Elektrifiziermaschine.** Die bereits an § 252. geführten Versuche über elektrische Anziehung und Abstoßung, über Influenz, über Spitzen- und Funkenentladung lassen sich mit den beträchtlichen Ladungen, die uns die Elektrifiziermaschinen liefern, bequemer und in größerem Maßstabe anstellen, als dies bisher möglich war.

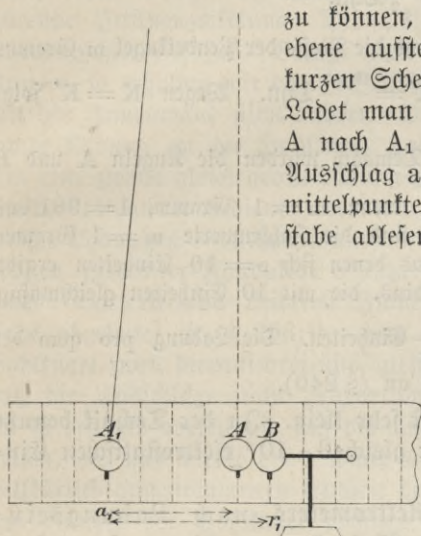
1. An das eine Ende eines dicken Metalldrahtes ist eine Blechscheibe gelötet, an die schmale Streifen aus Seidenpapier geklebt sind. Das andere Ende wird durch einen Kork gesteckt, der in die obere Öffnung des Konduktors paßt. Die gleichnamig geladenen Streifen stoßen sich ab und gehen schirmartig auseinander. Von der genäherten Hand werden sie angezogen. (Papierbüschel.) 2. In einen Glaszylinder, der mit Metallboden und abnehmbarem Metalldeckel versehen ist, werden Holundermarkkugeln gebracht. Verbindet man den Deckel durch einen Draht mit dem Konduktor, den Boden mit der Erde, so springen die Kügelchen zwischen Boden und Deckel lebhaft hin und her. (Korkkugeltanz.) 3. Das elektrische Glockenspiel. 4. Man nähert eine in der Hand gehaltene Nadel dem Konduktor oder befestige auf ihm eine Spitze, ein Stück glimmenden Zunders, eine kleine brennende Kerze. Es lassen sich dann dem Konduktor größere Funken nicht mehr entziehen. 5. Man befestige horizontal an dem Konduktor mit etwas Wachs einen spitz zugeseilten Nagel. Eine Kerzenflamme wird durch den elektrischen Wind zur Seite geblasen. 6. Das elektrische Flugrädchen. 7. In einem Zylinderglase stehen sich zwei Saugkämme gegenüber, deren metallische Zuleitungen durch die Wandung geführt sind. Bläst man das Glas voll Tabakrauch und verbindet die Kämme mit dem positiven und dem negativen

Konduktor, so genügen wenige Umdrehungen der Maschine, um das Gefäß klar zu machen. 8. Die Erscheinung des positiven Büschellichtes und des negativen Glimmlichtes sieht man am schönsten an der Holz'schen Maschine. Da, wo $+E$ von den Kammern auf die Scheibe strömt, bemerkt man im Dunkeln blaue Lichtbüschel, die sich der Drehungsrichtung entgegen ausbreiten. An den Kammspitzen, wo $-E$ ausströmt, treten Lichtpunkte auf. Läßt man den Funkenstrom der Maschine nicht zwischen Kugeln, sondern stumpfen Spitzen übergehen, so erscheint am positiven Konduktor ein kurzer Lichtfaden, der sich doldenartig verästelt, am negativen Konduktor zeigt sich ein glimmender Lichtpunkt. 9. Die Funkenentladung tritt ein, wenn man dem Konduktor einen abgerundeten Leiter nähert. Der Weg, den der Funke in der Luft nimmt, zeigt meistens die verästelte Form des Blitzes. Die Farbe hängt von dem Stoff der Metalle ab, zwischen denen der Funke überspringt, und von der Natur des Gases, in dem sich die Entladung vollzieht. Das Funkenpektrum zeigt die den Metallen und dem Gase eigentümlichen Linien. Jedenfalls werden also kleine Teilchen der Elektroden durch die Entladung losgerissen und verdampfen. — Die hohe Temperatur und kurze Dauer des Funkens verursacht eine starke und plötzliche Ausdehnung der durchschlagenen Luftmasse. Die umgebende Luft wird hierdurch kräftig zusammengedrückt, und die so erzeugte Verdichtungswelle wird von unserem Ohr als scharfer Knall wahrgenommen. 10. Ein Kartenblatt wird von einem kräftigen Funken durchschlagen. Die Ränder sind nach beiden Seiten ausgezogen. 11. Blizröhre und Bliztaste. 12. Man beleuchte eine rasch rotierende Farbenscheibe durch den elektrischen Funken. Die Scheibe scheint stillzustehen, da die Dauer des Funkens so kurz ist, daß sich die Scheibe in dieser Zeit nicht merklich weiter dreht. 13. Man lasse auf ein Metallschälchen, das Äther enthält, einen Funken überschlagen. Der Äther entzündet sich. 14. Man stelle einen Bunsenbrenner isoliert auf, verbinde ihn durch einen Draht mit dem Konduktor und lasse Leuchtgas ausströmen. Nähert man der Brenneröffnung den Finger, so entzündet der überspringende Funke das Gas. 15. Ein passendes Gemisch von Leuchtgas und Luft wird zur Explosion gebracht, sobald der Funke hindurchschlägt. (Elektrische Pistole.) 16. Man wiederhole einen Teil der angegebenen Versuche, indem man zwischen Maschinenkonduktor und Apparat einen isoliert aufgestellten Menschen einschaltet. —

§ 253. § 253. Elektrische Kraft. Coulombsches Gesetz. Auf einer metallenen Hohlkugel breitet sich jede elektrische Ladung gleichmäßig aus (§ 240). Bringen wir eine unelektrische Probekugel in das Innere, so wird jedes Teilchen $+e$ der Ladung, für sich allein genommen, die Probekugel durch Influenz elektrifizieren, und bei der Berührung müßte sie positiv geladen werden. Da dies nach den Versuchen des § 239 und 244 nicht der Fall ist, so müssen sich die Influenzwirkungen sämtlicher Ladungen e auf die Probekugel gegenseitig aufheben. Das ist aber nur möglich, wenn sich die wechselseitigen Kraftäußerungen zweier punktförmigen elektrischen Mengen umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen verhalten (§ 54a). Dieses Grundgesetz, das sich so als notwendige Folge leicht anzustellender Versuche

ergibt, hat Coulomb (1785) auf direktem Wege mit der Torsionswaage bestätigt. (Siehe die entsprechenden Versuche von Cavendish § 56.) Zu Demonstrationszwecken ist das Verfahren von Ødström geeigneter¹⁾. Eine leicht vergoldete Kugel A aus Kork oder Holundermark ist an zwei langen Seidenfäden doppelt aufgehängt (Fig. 321). In der Gleichgewichtslage berührt sie eine gleich große isolierte Metallkugel B.

Fig. 321.



Um die Entfernung der Mittelpunkte scharf auf einer Millimeterteilung ablesen zu können, die man senkrecht zur Fadenebene aufstellt, ist jede Kugel mit einem kurzen Schellackstäbchen als Index versehen. Ladet man A und B gleichnamig, so wird A nach A_1 abgestoßen, und man kann den Ausschlag a_1 und den Abstand r_1 der Kugelmittelpunkte von B und A_1 auf dem Maßstabe ablesen. Die Pendelkugel wird in der neuen Gleichgewichtslage durch 2 Kräfte festgehalten: Die herabtreibende Komponente K' der Schwere, die proportional a_1 ist (§ 44), und die abstoßende Kraft K , die von den elektrischen Ladungen in der Entfernung r_1 aufeinander ausgeübt wird. Da beide Kraft-

richtungen fast genau in einer

Geraden liegen, so können wir $K = K'$ setzen, also K durch den Ausschlag a_1 messen. Entfernen wir B von der Pendelkugel parallel dem Maßstabe, so sinkt das Pendel, und wir erhalten die Ausschläge $a_2, a_3, a_4 \dots$, und für die Abstände der Kugelmittelpunkte die Werte $r_2, r_3, r_4 \dots$. Der Versuch ergibt, daß $a_1 r_1^2 = a_2 r_2^2 = a_3 r_3^2 = \dots$ ist. Es verhalten sich die abstoßenden Kräfte gleichnamiger Ladungen also umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen. Durch Berührung der Standkugel B mit einer ganz gleichen läßt sich die Ladung von B auf die Hälfte, ein Viertel usw. bringen. Die Ausschläge zeigen dann, daß die elektrischen Kräfte direkt proportional den Ladungen sind.

Als Einheit der elektrostatischen Ladung wird die angesehen, die auf eine gleich große in der Entfernung von 1 cm die Kraft von 1 Dyn ausübt.

¹⁾ Eine für Projektion geeignete Anordnung hat Noack angegeben. *Wijsjesche Zeitschrift für phys. u. chem. Unterricht*. VI. Jahrg. S. 224.

Die Ladungen e und e_1 wirken also in der Entfernung von r cm mit der Kraft $K = \frac{e e_1}{r^2}$ Dyn.

Es seien die Kugeln A und B obiger Vorrichtung gleichnamig mit je e Einheiten geladen. Nachdem die Pendelkugel abgestoßen worden ist, rücken wir B in die Stellung A, dann gibt die Entfernung der Kugelmittelpunkte (r cm) zugleich die Ablenkung an, und die abstoßende Kraft ist

$$K = \frac{e^2}{r^2} \text{ Dyn.}$$

Beträgt die Länge des Pendels l cm und die Masse der Pendelkugel m Gramm, so ist die Schwerkraftskomponente $K' = \frac{m g r}{l}$ Dyn. Wegen $K = K'$ folgt

$\frac{e^2}{r^2} = \frac{m g r}{l}$, also $e = r \sqrt{\frac{m g r}{l}}$. Demnach würden die Kugeln A und B mit je einer Einheit geladen sein, wenn $m = 1$ Gramm, $l = 981$ cm, $r = 1$ cm ist. Für einen geladenen Versuch sind die Zahlenwerte $m = 1$ Gramm, $l = 265$ cm, $r = 3$ cm geeignet, aus denen sich $e = 10$ Einheiten ergibt.

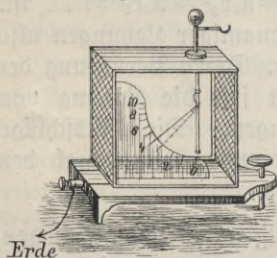
Bei einer Kugel von 5 cm Radius, die mit 10 Einheiten gleichmäßig geladen ist, kommen auf 1 qcm $\frac{1}{10\pi}$ Einheiten. Die Ladung pro qcm der Oberfläche gibt die elektrische Dichte an (§ 240).

Die elektrostatistische Einheit ist sehr klein. In der Technik benutzt man als Einheit 1 Coulomb, der gleich $3 \cdot 10^9$ elektrostatistischen Einheiten ist.

§ 254.

§ 254. **Eichung eines Elektrometers** nach Ladungseinheiten. Soll ein Elektroskop als Meßinstrument dienen, so muß es zunächst mit einer Skala, z. B. einer Gradeinteilung, versehen sein, an der man den Ausschlag der Blättchen ablesen kann. Da ferner jeder in der Nähe befindliche elektrische Körper oder auch unelektrische

Fig. 322.



Leiter die Divergenz der Blättchen durch Influenz verändert, so müssen wir das Instrument entfernt von allen solchen Körpern aufstellen, die eine Störung hervorrufen können. Die gewöhnlichen Elektroskope haben eine Schutzhülle aus Glas. Dieses wird aus irgend welchen Ursachen häufig mehr oder weniger elektrisch und beeinflusst dann den Versuch in empfindlicher und nicht kontrollierbarer Weise. Deshalb muß man bei Messungen eine Schutzhülle benutzen, die sich

stets in gleicher Weise elektrisch verhält. Man erreicht diesen Zweck durch metallische Schutzhüllen, die leitend mit der Erde verbunden werden. Ein billiges und recht empfindliches Instrument, das nach diesen Gesichtspunkten von Kolbe konstruiert wurde, ist das Elektrometer

Fig. 322. Die vordere und hintere Glaswand sind bei genaueren Messungen mit Drahtnetz zu bedecken. Um den Ausschlag des schmalen Aluminiumblättchens weithin sichtbar zu machen, benutzt man eine Projektionsvorrichtung. Es empfiehlt sich, die Gradskala auf Pausleinwand zu zeichnen und mit durchgehendem Licht zu projizieren. Eine isolierte Hohlkugel von etwa 5 cm Radius, die oben eine Öffnung hat, wird $1-1\frac{1}{2}$ m vom Meßinstrument aufgestellt und mit dessen Knopf durch einen Draht verbunden. Der große Abstand verhindert eine störende Influenzwirkung. Die Hohlkugel vertritt die Stelle eines Faradayschen Gefäßes. Bringt man eine geladene Probekugel in das Innere, so erhalten wir einen Ausschlag, der sich bei einer Berührung mit der Innenwand nicht ändert. Die Probekugel gibt dann ihre gesamte Ladung an die Hohlkugel und das Elektrometer ab (§ 244). Um eine zweite gleich große Ladung zuzuführen, müssen wir uns einer Elektrizitätsquelle bedienen, der wir durch die Probekugel wiederholt gleiche Ladungen entziehen können. Als solche läßt sich allenfalls ein großer, geladener Konduktor benutzen. Konstanter ist eine mäßig geladene Batterie von Leidener Flaschen, deren äußere Belegung zur Erde abgeleitet ist (§ 266)¹⁾. Wir erteilen der jedesmal entladenen Hohlkugel zwei, hierauf drei usw. gleich große Ladungen und bemerken, daß die Ausschläge nicht proportional wachsen, sondern langsamer. Es ist deshalb vorteilhaft, auf die angegebene Weise eine Skala herzustellen, die uns direkt die Ladung eines Körpers als Vielfaches der willkürlich angenommenen Einheit bestimmen läßt, sobald wir ihn in das Innere der Hohlkugel bringen.

§ 255. **Grad des elektrischen Zustandes.** Zur Untersuchung § 255. eines elektrischen Leiters mit dem geeichten Elektrometer verbinden wir den Knopf mit einer kleinen Probekugel durch einen Draht und berühren mit dieser den genügend entfernt aufgestellten Leiter, z. B. den Regelfonduktor Fig. 313, den wir vorher positiv elektrisch gemacht haben. Der Ausschlag läßt erkennen, daß den Draht entlang eine gewisse Ladung nach dem Elektrometer abgestoßen worden ist. Es könnte scheinen, daß der Ausschlag den elektrostatischen Druck (§ 245) oder auch die Dichte (§ 240) an der Berührungsstelle mißt. Dann würde er sich ändern müssen, wenn wir die Probekugel an andere Punkte anlegen. Er bleibt aber genau derselbe, wohin wir auch diese auf der Oberfläche verschieben, und ändert sich auch dann nicht, wenn wir die Kugel in das Innere einführen oder dort die Wand berühren.

Wir nennen die Ursache des Elektrometersauschlags den elektrischen Zustand des Leiters²⁾.

¹⁾ Ezymansti, Zeitschr. für phys. u. chemisch. Unterricht. IV. Jahrg. S. 12.

²⁾ Postle, Zeitschr. für phys. u. chemisch. Unterricht. III. Jahrg. S. 161.

Wie der Versuch gezeigt hat, ist dieser Zustand für alle Punkte auf der Oberfläche und im Innern der gleiche. Die bei der Eichung mit der 5 cm-Kugel erhaltenen Ausschläge bezeichnen wir als Zustandsgrade. Wenn irgend ein Leiter, der mit dem Elektrometer durch einen langen Draht verbunden wird, den Ausschlag n hervorruft, so sagen wir, er besitzt den elektrischen Zustandsgrad n , d. h. den gleichen Zustand, wie eine mit dem Elektrometer verbundene 5 cm-Kugel, der n Ladungseinheiten zugeführt worden sind. Für diese Kugel waren die Zustandsgrade den Ladungsgraden proportional. Es fragt sich, ob dies auch für andere Konduktoren zutrifft. Zunächst ermitteln wir, wieviel Ladungseinheiten dem neuen Konduktor zuzuführen sind, damit das Elektrometer den Zustandsgrad 1 anzeigt. Ist C die Anzahl dieser Ladungen, so bewirken $2C$, $3C$. . . nC Ladungseinheiten stets die Ausschläge 2, 3, . . . n . Ladungsgrade und Zustandsgrade sind also proportionale Größen.

§ 256. § 256. Kapazität. Die für jeden Leiter charakteristische Zahl C , die angibt, wieviel Ladungseinheiten erforderlich sind, um den elektrischen Zustandsgrad von Null auf 1 zu erhöhen, nennt man die Kapazität des Leiters.

Wenn bei einem zylindrischen Hohlgefäß die eingegossene Flüssigkeitsmenge von C Litern das Niveau um 1 cm erhöht, so steigt dieses um Z cm, wenn wir $E = C \cdot Z$ Liter zufüllen. In ähnlicher Weise wird der elektrische Zustand eines Leiters um Z Grade gehoben, wenn man ihm $E = C \cdot Z$ Ladungseinheiten zuführt. Den Wasserstand in einem Blechgasometer erkennen wir an einem damit kommunizierenden Glasrohre. Ist dieses durch einen Hahn von dem Gefäß abgesperrt und zunächst leer, so sinkt bei Öffnung des Hahnes das Niveau ein wenig im Gasometer. Wir beobachten demnach einen etwas kleineren Wasserstand, als er vor Öffnung des Hahnes war. Auch der elektrische Zustand eines Konduktors erfährt durch die Verbindung mit dem Elektrometer eine Verminderung, die jedoch unerheblich ist, sobald die Kapazität des Konduktors beträchtlich die der Meßvorrichtung übertrifft. (Welche entsprechenden Verhältnisse sind bei Temperaturbestimmungen zu beachten?)

Die Kapazität eines Leiters hängt zunächst von seiner Größe und Gestalt ab. Zieht man z. B. eine Metallkette, die in ein geladenes Faradaysches Gefäß versenkt wurde, an einem Seidenfaden empor, so geht der Ausschlag am Elektrometer zurück. Da die Ladung die gleiche bleibt, der Zustandsgrad aber sinkt, so muß die Kapazität mit zunehmender Oberfläche größer geworden sein. Die gleiche Erscheinung beobachtet man am elektrischen Rouleau, an zusammenschiebbaren Pappzylindern, die mit Stanniol beklebt sind, an geladenen Seifenblasen. In welcher Weise die Kapazität eines Leiters von dem umgebenden Medium und der Nähe anderer Leiter beeinflusst wird, ist im § 265 auseinandergesetzt.

§ 257. **Ausgleich von Zustandsgraden.** Verbindet man zwei § 257. oder mehrere Konduktoren von verschiedenen Zustandsgraden, so vollzieht sich der Ausgleich der Ladungen immer derartig, daß positive Elektrizität von den Stellen höheren nach den Stellen niedrigeren Zustandsgrades übergeht, bis auf dem ganzen Metallkörper der gleiche Zustandsgrad herrscht.

Um dies zu zeigen, verbindet man zwei isolierte Leiter, z. B. eine Kugel von 5 cm und eine von 10 cm Radius, mit je einem Elektrometer, ladet beide Kugeln auf verschiedene positive oder negative Zustandsgrade und legt hierauf einen mit isolierender Handhabe versehenen Draht an die Konduktoren.

§ 258. **Elektrisches Potential.** Nach dem Coulombschen Ge- § 258. setz stoßen sich zwei punktförmige, gleichnamige Ladungen e und e_1 in der Entfernung r mit der Kraft $K = k \frac{ee_1}{r^2}$ ab, zwei ungleichnamige Ladungen ziehen sich mit der gleichen Kraft an. Unterscheiden wir entgegengesetzte Ladungen durch das Vorzeichen, so sind abstoßende Kräfte als positiv, anziehende als negativ anzusehen. Die Ladungseinheit im elektrostatischen [CGS] System wird so gewählt, daß der Proportionalitätsfaktor $k=1$ ist (s. § 253). Obige Gleichung erhält dann die Form $K = \frac{ee_1}{r^2}$ Dyn.

Da für die Kraftäußerung elektrostatischer Ladungen dasselbe Gesetz gilt wie für die Gravitationswirkung von Massen, so können alle Sätze, die sich in der Mechanik als notwendige Folgen des Newtonschen Anziehungsgesetzes ergeben haben (s. § 54, 57, 58), auch auf elektrische Kräfte übertragen werden. Von grundlegender Wichtigkeit sind besonders die Folgerungen, die sich an den Begriff des Potentials knüpfen.

Wenn wir einen positiv geladenen Körper einem gleichnamig geladenen Konduktor nähern, so müssen wir eine Arbeit leisten, denn wir haben die Abstoßung der beiden Ladungen zu überwinden.

Die Arbeit, die zur Heranführung der positiven Ladungseinheit aus unendlicher Entfernung nach einer bestimmten Stelle des Raumes erforderlich ist, nennt man den Arbeitswert des elektrischen Potentials dieser Stelle.

Hierbei nimmt man an, daß jene Ladungseinheit in einem Punkte konzentriert ist und daß bei ihrer Bewegung die Anordnung der Ladung auf dem Konduktor durch Influenz nicht geändert wird.

Für den Arbeitswert des Gravitationspotentials hatten wir den Ausdruck $k \frac{E \cdot 1}{r}$ abgeleitet (§ 57). In gleicher Weise ergibt sich für

daß elektrische Potential der punktförmigen Ladung $+e$ auf die im Abstand r befindliche positive Ladungseinheit der Arbeitswert $\frac{e \cdot 1}{r}$.

Der Ausdruck $V = \frac{e}{r}$, der numerisch gleich $\frac{e \cdot 1}{r}$ ist, wird das elektrische Potential im Abstände r genannt. Sind $e_1, e_2, e_3 \dots$ die punktförmigen, positiven Ladungen eines beliebigen Konduktors oder auch Isolators und $r_1, r_2, r_3 \dots$ ihre Entfernungen von irgend einem Punkte P außerhalb, so hat das Potential im Punkte P den Wert

$$\frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_2} + \frac{e_3}{r_3} + \dots = \Sigma \frac{e}{r}.$$

Eine Ladung $+E$, die sich gleichmäßig auf einer Kugel ausbreitet hat, wirkt auf einen elektrischen Punkt außerhalb gerade so, als ob sie im Mittelpunkt konzentriert wäre (§ 54). Deshalb ist

$V = \frac{E}{r}$ auch das Potential eines kugelförmigen Leiters im Abstände r und $\frac{E}{R}$ sein Oberflächenpotential, wenn R den Radius bezeichnet.

Für $R=1$ und $E=1$ wird auch $\frac{E}{R} = 1$. Hieraus folgt:

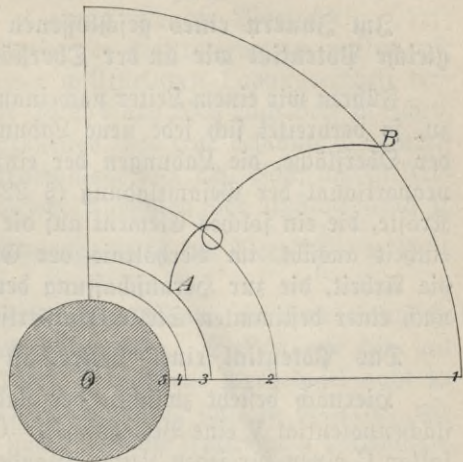
Das elektrostatische Oberflächenpotential 1 im [CGS] System besitzt eine Kugel vom Radius 1 cm, deren Ladung gleich der elektrostatischen Einheit ist.

$\frac{1}{300}$ dieser Potentialeinheit heißt 1 Volt. Um eine cm-Kugel auf das Potential 1 Volt zu laden, genügen also $\frac{1}{300}$ elektrostatische Ladungseinheiten oder $\frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$ Coulomb (s. § 253).

Führen wir einer cm-Kugel $+5$ elektrostatische Einheiten zu, so beträgt ihr Oberflächenpotential $+5$ [CGS] Einheiten. In den Entfernungen $1\frac{1}{4}, 1\frac{2}{3}, 2\frac{1}{2}, 5$ cm vom Mittelpunkt hat das Potential die Werte 4, 3, 2, 1. Die mit den Radien $1\frac{1}{4}, 1\frac{2}{3}, 2\frac{1}{2}, 5$ cm um den Mittelpunkt gelegten Kugelschalen (Fig. 323) sind Flächen gleichen Potentials. Bringen wir an die fest aufgestellte cm-Kugel eine punktförmige Ladung von $+e_1$ Einheiten heran, etwa von der Stelle B der Fläche 1 auf einem beliebigen Wege nach der Stelle A der Fläche 3, so müssen wir eine Arbeit leisten von $(1-3)e_1$ Erg, d. h. eine Arbeit, die gleich ist dem Produkt aus der herangeführten Ladung und der Potentialdifferenz für den Anfangs- und Endpunkt der Bewegung. Das Vorzeichen der Arbeit ist negativ, sie muß von außen dem System zugeführt werden und wird verbraucht, um die potentielle Energie der beiden Ladungen um $2e_1$ Erg zu erhöhen.

Nehmen wir an, der Träger der Ladung e_1 wäre ein isolierter Körper, der freie Beweglichkeit erlangt, sobald wir ihn nach A gebracht haben, so erhält er durch die elektrische Abstoßung eine Bewegungsenergie, die in dem Augenblick, wo er die Potentialfläche 1 passiert, gleich $(3-1)e_1$ Erg ist. Um den gleichen Betrag ist dann die potentielle Energie des Systems gesunken. Welche entsprechenden Folgerungen ergeben sich, wenn die cm-Kugel negativ geladen ist?

Fig. 323.



Geht auf irgend eine Weise die Ladungsmenge $+e_1$ von einem Ort mit dem unveränderlichen Potential V_1 nach einem anderen mit dem gleichfalls konstanten Potential V_2 über, so findet stets ein Arbeits- oder Energieumsatz von $(V_1 - V_2) e_1$ Erg statt, wenn V_1, V_2, e_1 im elektrostatischen System gemessen sind. (S. § 296.)

Bei Zugrundelegung der Einheiten Volt und Coulomb ist diese Arbeit $= \frac{1}{300} (V_1 - V_2) \cdot 3 \cdot 10^9 \cdot e_1 = 10^7 (V_1 - V_2) e_1$ Erg $= (V_1 - V_2) e_1$ Joule.

Hierbei ist es gleichgültig, in welcher Zeit sich der Übergang vollzieht. Geschieht er in einer Sekunde, so beträgt die Arbeit $(V_1 - V_2) e_1$ Watt (§ 22b). Je nachdem der Ausdruck einen positiven oder negativen Wert hat, gibt das System dabei Arbeit ab oder verbraucht Arbeit.

Da sich an jeden geladenen Konduktor, wie er auch gestaltet sein mag, eine positive Ladungsmenge von allen Seiten aus dem Unendlichen heranzuführen läßt, so müssen alle Punkte des Raumes von gleichem Potential auf einer den Konduktor einschließenden Fläche liegen. Durch die Bewegung einer Ladung auf einer solchen Fläche gleichen Potentials wird weder Arbeit gewonnen noch verbraucht. Es muß deshalb die Richtung der elektrischen Kraft für irgend einen Punkt senkrecht zu dem Element der Potentialfläche sein, die durch jenen Punkt geht. Nun ist bei einem Konduktor, dessen Ladung sich ins Gleichgewicht gesetzt hat, die elektrische Kraft überall senkrecht zur Oberfläche gerichtet, da sonst die in die Fläche fallende Kraftkomponente eine Ladungsverschiebung bewirken würde. Hieraus folgt:

Die Oberfläche eines Leiters ist eine Fläche gleichen Potentials.

Die Verschiebung einer Ladungsmenge von der Oberfläche nach dem Innern geschieht ohne Arbeitsaufwand, denn die Kraftwirkungen der Konduktorladung auf einen Punkt innerhalb heben sich gegenseitig auf (§ 54 a und § 239).

Im Innern eines geschlossenen Leiters herrscht überall das gleiche Potential wie an der Oberfläche.

Führen wir einem Leiter nacheinander die Ladungen $e, 2e, 3e \dots$ zu, so verbreitet sich jede neue Ladung stets in derselben Weise auf der Oberfläche, die Ladungen der einzelnen Flächenelemente wachsen proportional der Gesamtladung (§ 223). Demnach werden auch die Kräfte, die ein solches Element auf die außerhalb befindliche Ladungseinheit ausübt, im Verhältnis der Gesamtladung größer, also auch die Arbeit, die zur Heranschaffung der Einheit aus dem Unendlichen nach einer bestimmten Stelle erforderlich ist. Es ergibt sich somit:

Das Potential eines Leiters ist seiner Ladung proportional.

Hiernach besteht zwischen der Ladungsmenge E und dem Oberflächenpotential V eine Beziehung $E = C \cdot V$, wo der Proportionalitätsfaktor C einen für jeden Leiter besonderen Wert hat. Die physikalische Bedeutung von C geht daraus hervor, daß $C = E$ sein muß für $V = 1$. Man nennt die Ladungsmenge C , die das Oberflächenpotential eines Leiters von 0 auf 1 erhöht, seine Kapazität. (Vgl. § 256.) Bei einer Kugel mit dem Radius R , deren Ladung E gleichmäßig ausgebreitet ist, war $E = V \cdot R$, ihre Kapazität wird also durch den Radius gemessen, und im elektrostatischen [CGS] System hat eine Kugel von 1 cm Radius die Kapazität 1. Die Kapazität eines Leiters, dessen Potential um 1 Volt steigt, wenn ihm die Ladung 1 Coulomb zugeführt wird, heißt 1 Farad. Es ist ein Farad = $300 \cdot 3 \cdot 10^9 = 9 \cdot 10^{11}$ elektrostatischer Einheiten, ein Mikrofarad = 10^{-6} Farad = $9 \cdot 10^5$ solcher Einheiten. Eine Kugel von 9 km Radius besitzt somit die Kapazität von 1 Mikrofarad. Setzen wir den Erdradius gleich $\frac{2}{\pi} \cdot 10^4$ km, so finden wir für die Kapazität der Erde den Wert $\frac{2}{9\pi} \cdot 10^4 \sim 707$ Mikrofarad.

§ 259. § 259. **Potential und Zustandsgrad.** Für das Potential und den Zustandsgrad eines Leiters haben sich folgende gemeinsame Merkmale ergeben:

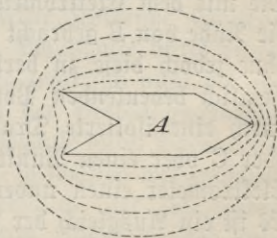
1. Beide Größen sind auf der Oberfläche und im Innern eines geschlossenen Leiters konstant.
2. Beide Größen sind proportional der Ladungsmenge.
3. Zwischen Punkten gleichen Potentials oder Zustandsgrades treten von selbst Ladungsverschiebungen nicht ein.

4. Ohne Einwirkungen äußerer Kräfte gehen positive Ladungen nur von Orten höheren nach Orten niederen Potentials oder Zustandsgrades über.

Aus 3. folgt, daß Körper gleichen Zustandsgrades auch gleiches Potential besitzen müssen, aus 2. ergibt sich die Möglichkeit, Oberflächenpotentiale in derselben Weise am Elektrometer zu messen wie Zustandsgrade. Um die nach einer willkürlichen Ladungseinheit hergestellte Skala der Zustandsgrade (§§ 254 und 255) nach Volt zu eichen, hat man nur den Ausschlag festzustellen, den eine bekannte Potentialdifferenz, etwa die einer Starkstromanlage von 220 Volt, am Elektrometer hervorruft. Gehört zu diesem Ausschlag der Zustandsgrad n , so folgt für einen beliebigen Zustandsgrad n_1 der Wert $\frac{220}{n} \cdot n_1$ Volt.

§ 260. Das elektrische Feld. Ein Raum, in dem elektrische Kräfte wirksam sind, heißt elektrisches Feld. Stellen wir die mit dem Elektrometer durch einen Draht verbundene Probekugel nicht zu weit entfernt von einem geladenen Konduktor auf, so bemerken wir einen Ausschlag, der zunimmt, sobald wir die Entfernung verringern, und der seinen größten Wert erreicht, wenn die Probekugel den Konduktor berührt. Während im letzten Falle der Ausschlag das Oberflächenpotential des Leiters anzeigt, mißt er vor der Berührung den elektrischen Zustand, also auch das Oberflächenpotential der Probekugel an der bestimmten Stelle des Raumes. Je kleiner die Probekugel ist, mit um so größerem Recht können wir sie als einen Punkt der dem Konduktor zugehörigen Potentialfläche ansehen, und um so genauer wird der Elektrometersauschlag das Potential an der betreffenden Stelle angeben. Man benutzt deshalb zur Untersuchung eines elektrischen Feldes statt einer Kugel besser eine feine metallische Spitze. Führen wir diese um den Konduktor herum, so hält es nicht schwer, solche Punkte aufzufinden, wo der Ausschlag der gleiche bleibt. Sie liegen alle auf einer den Konduktor einhüllenden Fläche. Ist der geladene Leiter eine Kugel, so sind diese Flächen gleichen Potentials in Übereinstimmung mit der Theorie (§ 258) konzentrische Kugelschalen. Bei einem anders geformten Konduktor geben sie um so genauer dessen Gestalt wieder, je näher sie seiner Oberfläche liegen, und gehen erst allmählich in größerer Entfernung in Kugelflächen über. Hierbei ist vorausgesetzt, daß andere Körper im elektrischen Felde nicht vorhanden sind. In Fig. 324 ist für den geladenen Doppelkegel A ein Durchschnitt der Potentialflächen gezeichnet. Die so erhaltenen Potentiallinien lassen sich mit den Niveau-

Fig. 324.



linien vergleichen, die man zur Darstellung der Höhen und Tiefen eines Geländes benutzt. Legt man z. B. durch einen Berg in gleichen Höhenabständen horizontale Ebenen und projiziert die Schnittkurven auf eine wagerechte Ebene, so ist die Steigung an jedem Punkte und in einer beliebigen Richtung umgekehrt proportional dem in jener Richtung gemessenen Abstände zweier benachbarten Niveaulinien. Da, wo die Kurven am dichtesten zusammenrücken, ist das Gefälle, also auch die Wucht herabstürzenden Wassers am größten.

Denkt man sich in einem elektrischen Felde eine Anzahl von Potentialflächen so gelegt, daß stets zwei benachbarte den gleichen, möglichst kleinen Potentialunterschied $V_1 - V_2$ haben, so verhalten sich die senkrechten Abstände zweier aufeinander folgenden Flächen umgekehrt wie die elektrischen Feldkräfte. Denn wir müssen, um die Ladungseinheit von einer Fläche nach der mit nächst höherem Potential zu verschieben, die Arbeit $V_1 - V_2 = K \cdot s$ leisten, wenn s den senkrechten Flächenabstand und K die längs der kleinen Strecke s als konstant anzusehende Kraft des Feldes bezeichnet. Die Linien, die senkrecht die Potentialflächen durchsetzen, geben in ihrem Verlauf von den höheren nach den niederen Potentialwerten die Kraftrichtung in jedem Punkte an und heißen deshalb Kraftlinien (s. § 58). Das Verhältnis $\frac{V_1 - V_2}{s}$

mißt das Potentialgefälle. Es ist, wie die Fig. 324 zeigt, da am größten, wo die Oberfläche des Konduktors am stärksten gekrümmt ist. In das Innere des links offenen Leiters biegen nur wenige Linien ein. Hier ist das Potential bereits in geringer Tiefe unveränderlich und gleich dem der Oberfläche, die elektrische Kraft also Null.

§ 261. § 261. **Leiter im Felde.** Man ladet eine große Konduktorkugel A positiv und stellt auf einer Seite derselben, etwa 0,5 und 1 m davon entfernt, zwei kleinere, isolierte Metallkugeln B und C auf. Die mit dem Elektrometer verbundene Probekugel P wird hierauf in die Nähe von B gebracht und allmählich nahe bis an C herangeschoben, ohne jedoch diese zu berühren. Dabei beobachtet man zunächst einen ziemlich bedeutenden Potentialabfall. Verbindet man nun B und C durch eine isolierte Drahtbrücke und berührt mit der Probekugel B oder C oder einen Punkt des Verbindungsdrahtes, so erhält man am Elektrometer einen unveränderlichen Ausschlag von mittlerer Größe. Es ist ein Ausgleich der Potentiale eingetreten, das von B ist gefallen, das von C ist gestiegen. Die Oberfläche: Kugel B — Draht — Kugel C ist eine Fläche gleichen Potentials geworden. Entfernen wir den Draht und hierauf den Konduktor A, so sind B und C durch Influenz geladen, und zwar B negativ, C positiv (vgl. § 241). Hieraus schließen wir, daß bei Anlegung der Drahtbrücke eine positive Ladungsmenge

von B nach C, also von der Stelle mit ursprünglich höherem nach der Stelle tieferen Potentials übergegangen ist.

§ 262. **übereinanderlagerung elektrischer Felder.** Zwei große § 262. Konduktoren A und B werden positiv geladen und möglichst weit entfernt voneinander aufgestellt, doch so, daß eine zwischen sie gebrachte Probepitze P im elektrischen Felde beider sich befindet. Vermittelt zwei zur Erde abgeleiteter Blechplatten halten wir zunächst die Wirkung von A und B auf P ab (§ 243). Wir entfernen hierauf den Schirm zwischen A und P. Das mit P verbundene Elektrometer zeigt nun einen Ausschlag, der das Potential a des Konduktors A an der Stelle P mißt. Bringen wir den Schirm an seinen Ort zurück, so verschwindet der Ausschlag. In entsprechender Weise wird das Potential b von B auf P bestimmt. Zuletzt entfernen wir beide Schirme und erhalten den Ausschlag $a + b$. Wir wiederholen die Versuche mit entgegengesetzten Ladungen. Sind die einzelnen Potentiale in P nun $+a$ und $-b$, so beträgt das Gesamtpotential $a - b$. Hiermit ist durch den Versuch das wichtige Gesetz bestätigt:

Das Potential mehrerer Ladungen auf einen Punkt im Raume ist gleich der algebraischen Summe der einzelnen Potentiale. (S. § 258.)

§ 263. Das Potential Null würde in einem Punkte vorhanden § 263. sein, von dem alle elektrischen Körper unendlich weit entfernt wären. Diese Bedingung läßt sich tatsächlich nicht erfüllen, da wir uns bei allen Versuchen in der Nähe eines sehr großen elektrischen Konduktors, der Erde, befinden. Dazu gehören auch alle mit ihr in leitender Verbindung stehenden Konduktoren, z. B. die Zimmerwände. Man kann deshalb nicht die absoluten Werte von Potentialen messen, sondern immer nur Potentialdifferenzen. Ein Elektroskop gibt nur dann einen Ausschlag, wenn die Blättchen ein anderes Potential besitzen als ihre Umgebung. Wir können das isoliert aufgestellte Kolbische Elektrometer, dessen Knopf wir mit der metallischen Schutzhülle durch einen Draht verbunden haben, noch so stark laden, es zeigt sich nicht die geringste Bewegung des Blättchens, auch wenn der Verbindungsdraht entfernt wird. Entziehen wir aber z. B. dem Gehäuse durch Berührung mit einer Probefugel einen Teil seiner Ladung, so schaffen wir zwischen ihm und dem Blättchen einen Potentialunterschied, der sich sofort durch einen Ausschlag bemerklich macht. Durch Ableitung des Gehäuses zur Erde wächst der Ausschlag und mißt nun die Potentialdifferenz zwischen Blättchen und Erde.

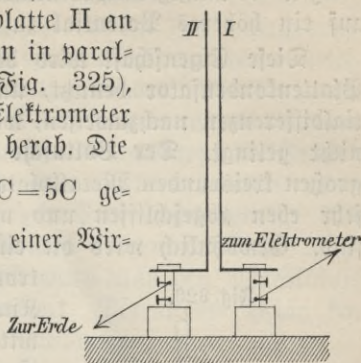
Man pflegt der Einfachheit wegen das elektrische Potential der Erde mit Null zu bezeichnen. Diese Festsetzung ist ebenso willkürlich wie die übliche Annahme des Nullpunktes bei Temperaturbestimmungen.

§ 264. § 264. **Elektrische Ladungsenergie.** Der Ausdruck $(V_1 - V_2)e_1$ (§ 258) für die Arbeitsleistung beim Übergang der Ladung e_1 von einem Ort mit dem Potential V_1 nach einem anderen mit dem Potential V_2 liefert, wenn $V_2 = 0$ ist, den Wert $V_1 e_1$. Es könnte scheinen, daß dies auch die elektrische Energie eines Konduktors ist, der durch die Ladung e_1 das Potential V_1 erhalten hat. In Wirklichkeit beträgt aber diese Energie nur $\frac{1}{2} V_1 \cdot e_1$. Bei Ableitung des Wertes $(V_1 - V_2)e_1$ hatten wir angenommen, daß die Potentiale V_1 und V_2 keine Veränderung durch den Übergang von e_1 erfahren. Diese Voraussetzung trifft bei elektrischen Strömen, wie wir später sehen werden, in vielen Fällen zu, nicht aber bei der Ladung oder Entladung eines Konduktors. Wir denken uns die Konduktorladung e_1 in n sehr kleine Teilchen zerlegt. Durch die Ableitung des ersten Teilchens zur Erde sinkt das Potential V_1 so wenig, daß die Arbeitsleistung nahezu $V_1 \cdot \frac{e_1}{n}$ beträgt. Je mehr Teilchen sich aber vom Konduktor entfernen, desto geringer wird die Leistung werden. Beim Übergang des letzten Teilchens fällt das Potential auf Null, und die Arbeitsleistung kann nur wenig von Null verschieden sein. Da das Potential gleichmäßig von V_1 bis Null gesunken ist, so muß die Gesamtarbeit gerade so groß sein, als ob sich der Übergang bei dem konstanten Potential $\frac{1}{2} V_1$ vollzogen hätte, also gleich $\frac{1}{2} V_1 \cdot e_1$.

§ 265. § 265. **Kondensatoren.** Die Ladungsansammlung auf einem Konduktor fällt um so beträchtlicher aus, je größer seine Kapazität und je höher das Potential ist, auf das wir ihn laden ($E = V \cdot C$). Welche Elektrizitätsquelle wir nun auch benutzen mögen, durch das bisherige Ladungsverfahren läßt sich ein Leiter stets nur auf ein Potential bringen, das im günstigsten Falle gleich dem der Quelle ist. Trennen wir ihn von dieser, so zeigen sich überdies bei hohem Potential bald erhebliche Ladungsverluste infolge mangelhafter Isolation. Um also größere Ladungsmengen für längere Zeit aufzuspeichern, bleibt nur das eine Mittel, Kondensatoren von großer Kapazität anzuwenden. Wie wir in § 256 gesehen haben, hängt die Kapazität eines Leiters zunächst von seiner Größe und Gestalt ab. Sie wird aber auch in hohem Grade durch die Anwesenheit anderer Leiter bedingt und ist deshalb für ein und denselben Körper keine unveränderliche Größe. Nähern wir z. B. unsere Hand dem Knopf eines geladenen Elektroskops, so geht mit zunehmender Annäherung der Ausschlag zurück, das Potential sinkt. Da die Ladungsmenge des Elektroskops keine Verminderung erfahren hat, so muß durch die Nähe der Hand seine Kapazität gewachsen sein. Die Wirkung wird verstärkt, wenn man die sich gegenüberstehenden Flächen vergrößert.

Zu diesem Zweck verbinden wir die isolierte Metallplatte I mit einem Elektrometer und erteilen ihr ein mittleres Potential V . Hierzu bedarf es einer Ladung $+E_1 = V \cdot C$, wenn C die Kapazität von Platte und Elektrometer ist. Wird nun die zur Erde abgeleitete Metallplatte II an I herangeschoben, bis sich beide Platten in paralleler Lage nahe gegenüberstehen (Fig. 325), so sinkt das Potential, wie das Elektrometer anzeigt, etwa auf den Wert $V' = 0,2V$ herab. Die Kapazität ist demnach auf $\frac{E_1}{V'} = \frac{V}{V'} C = 5C$ gewachsen. Der Grund ist jedenfalls in einer Wirkung der negativen Influenzladung E_2 der Platte II zu suchen. Diese Ladung ist nicht ableitbar, solange II nicht von I entfernt oder gleichzeitig auch I abgeleitet wird. Die Ladung $+E_1$ bindet gewissermaßen die Ladung $-E_2$, und umgekehrt wird auch $-E_2$ einen bestimmten Bruchteil von E_1 , etwa $x \cdot E_1$, binden, so daß sich auf Platte I + Elektrometer nur $E_1(1-x)$ freie Elektrizität befindet. Deshalb muß das neue Potential $V' = \frac{E_1(1-x)}{C} = V(1-x)$ sein. Da der Versuch $0,2V$ lieferte, so ergibt sich $x = 0,8$.

Fig. 325.



Die anfänglich vorhandene Kapazität C ist durch die Nähe der zur Erde abgeleiteten Platte II auf $\frac{V}{V'} C = 5C$ erhöht worden. Um nun I auf das Anfangspotential V zu bringen, ist die Gesamtladung $5E_1$ erforderlich. Entfernen wir dann die Platte II, so steigt das Potential auf $5V$.

Das Verhältnis der Potentiale $\frac{V}{V'}$ heißt die Verstärkungszahl. Bestimmt man diese Größe für mehrere kleine Entfernungen, so findet man, daß sie angenähert dem Plattenabstande umgekehrt proportional ist. Sie hängt ferner von der Natur des isolierenden Stoffes ab, der sich zwischen den Platten befindet. Wenn man statt der Luftschicht eine Glastafel benutzt, so erhält man bei gleichem Plattenabstande einen $D = 4$ bis 7 fachen Wert je nach der Glasorte. Man sagt, das spezifische Induktionsvermögen des Glases ist D mal so groß wie das der Luft. Für Glimmer ist $D = 5$, für Paraffin $= 2,3$. Die Größe D heißt die dielektrische Konstante der Substanz.

Zwei Metallflächen in paralleler Lage, die durch ein isolierendes Mittel getrennt sind und von denen die eine isoliert, die andere mit der Erde verbunden ist, nennt man einen Kondensator. Seine Kapazität

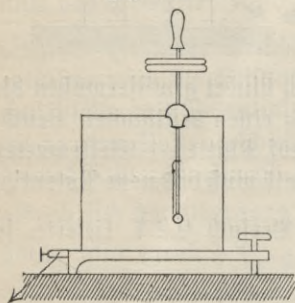
wird durch die Ladungsmenge gemessen, die man der isolierten Fläche mitteilen muß, um ihr Potential um die Einheit zu erhöhen.

Mit Hilfe eines Kondensators lassen sich nicht nur mächtige Ladungen bei mäßigem Potential ansammeln, er dient auch dazu, Leiter auf ein höheres Potential zu laden als das der Elektrizitätsquelle.

Diese Eigenschaft wird bei dem von Volta (1782) erfundenen Plattenkondensator benutzt, um sehr kleine Potentiale oder Potentialdifferenzen nachzuweisen, was mit den gewöhnlichen Elektroskopen nicht gelingt. Der **Volta'sche Kondensator** besteht aus zwei gleich großen kreisrunden Metallplatten, deren einander zugewandte Flächen sehr eben abgeschliffen und mit einer dünnen Firnissschicht bedeckt sind. Gewöhnlich wird die eine Platte auf ein empfindliches Elektrometer, z. B. das Kolbesche, statt des Knopfes aufgeschraubt und die andere, die mit einem isolierenden Handgriff versehen ist, darauf gesetzt (Fig. 326). Wegen des außerordentlich geringen Plattenabstandes ist die Verstärkungszahl beträchtlich. Zur Ladung verbindet man die untere Platte metallisch mit dem zu prüfenden Körper, leitet die obere durch eine kurze Berührung ab und hebt, nachdem die Zuleitung zur unteren Platte entfernt ist, die obere ab.

Betrug das Ladungspotential 1 Volt, und ist die Verstärkungszahl des Kondensators 200, so zeigt das Elektrometer nun 200 Volt an.

Fig. 326.



§ 266. § 266. **Leidener oder Kleiſt'sche Flasche.** Eine Vorrichtung zur Ansammlung großer Ladungsmengen hat Kleiſt (1745) durch einen Zufall entdeckt. Um Wasser in einer Flasche elektrisch zu machen, steckte er einen Nagel durch den verschließenden Kork, so daß die Spitze in die Flüssigkeit eintauchte, und ließ Funken von dem Konduktor einer Reibungsmaschine auf den Kopf des Nagels überspringen, wobei er die Flasche in der Hand hielt. Als er hierauf den Nagel mit der anderen Hand berührte, erhielt er einen heftigen Schlag. Einige Monate später machte Musschenbroek in Leiden eine ähnliche Entdeckung. Bei dem Kleiſt'schen Versuch bildete das Wasser die isolierte Leiterfläche, die Hand, die die Flasche hielt, die zur Erde abgeleitete Fläche, das Glas die isolierende Zwischenschicht.

Eine Erklärung der Erscheinung durch Influenzwirkung gelang zuerst Franklin (1747). Er benutzte eine Glastafel, die auf beiden Seiten in ihrer Mitte

Fig. 327.



mit Stanniol belegt war. Die Leidener Flasche ist nur eine andere Form der Franklinschen Tafel. Ein Glasgefäß (Fig. 327) ist innen und außen bis auf einen breiten, gefirnißten Rand mit Stanniol beklebt. Der innere Belag steht mit einem Metallstab in Verbindung, auf dessen oberes Ende eine Kugel aufgeschraubt ist. Ein Hartgummi-
deckel schützt das Innere vor Staub und feuchter Luft und dient gleichzeitig als isolierender Träger des Zuleitungsstabes. Die bequemste Art, eine einzelne Flasche zu laden, ist die, daß man den äußeren Belag mit einer Hand umfaßt und auf den Metallknopf die Funken des einen Konduktors einer Reibungs- oder Influenzmaschine übergehen läßt, deren anderer Konduktor zur Erde abgeleitet ist. Die anfangs sehr rasch überspringenden Funken folgen sich bald langsamer und setzen endlich ganz aus, selbst wenn man den Metallknopf dem Konduktor bis zur Berührung nähert. Der innere Belag hat dann das Potential des Konduktors angenommen.

Zur plötzlichen Entladung benutzt man gewöhnlich die Vorrichtung Fig. 328. Man legt die eine Kugel *a* an den äußeren Belag und nähert *b* dem Knopf der Flasche bis zur Schlagweite, die von dem Potentialunterschied der beiden Belege abhängt. Der Funke, der auf *b* überspringt, ist mässig, hell glänzend und laut (s. § 252, 9). Um die Entladung durch den menschlichen Körper zu leiten, berührt man mit der einen Hand den äußeren Belag, mit der anderen den Flaschenknopf. Der Entladungsschlag ruft eine krampfartige Zusammenziehung der Arm- und zuweilen auch der Brustmuskeln hervor, die sehr empfindlich und selbst gefährlich sein kann, so daß man stets nur eine kleine, mässig geladene Flasche bei diesem Versuch benutzen darf.

Fig. 328.

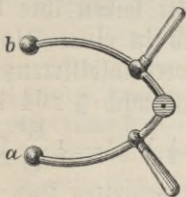
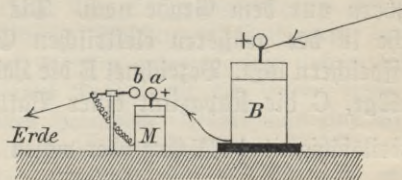


Fig. 329.



Verbindet man von mehreren Leidener Flaschen alle inneren Beläge unter sich und desgleichen alle äußeren (Parallelschaltung), so wirkt die so zusammengestellte Batterie wie eine einzige sehr große Flasche, deren Kapazität gleich ist der Summe der Kapazitäten der einzelnen Flaschen. Die Ladungsmenge, die einer derartigen Batterie zugeführt worden ist, läßt sich mit der Vaneschen Maßflasche bestimmen. Die Fig. 329 zeigt die Versuchsanordnung. *B* soll die isoliert aufgestellte Batterie, *M* die Maßflasche darstellen. Der äußere Belag von *B* ist

leitend mit dem Knopf von M verbunden. Wird also B z. B. positiv geladen, so fließt die abgestoßene positive Influenzelektrizität des äußeren Belages nicht wie bei dem gewöhnlichen Ladungsverfahren zur Erde ab, sondern nach dem inneren Belag der Maßflasche. Die äußere Belegung von M steht mit einem Funkenzieher in Verbindung, der zur Erde abgeleitet ist. Von der Länge der regulierbaren Funkenstrecke ab hängt es ab, bei welcher Ladungsmenge E eine Selbstentladung der Maßflasche eintritt. Haben die Kugeln a und b einen Durchmesser von 1 cm, so muß das Potential von a für eine Funkenlänge von 1 cm etwa 27 000 Volt betragen. Wenn während der Ladung von B n Funken zwischen a und b übersprungen sind, dann hat die Batterie angenähert die Elektrizitätsmenge nE aufgenommen.

Ganz allmählich läßt sich eine Flasche oder Batterie entladen, wenn man sie auf eine isolierende Unterlage stellt und abwechselnd die innere und äußere Belegung ableitend berührt. Der Vorgang findet seine Erklärung durch § 265.

Aufgabe. a) Wieviel elektrostatische Ladungseinheiten hat eine Batterie aufgenommen, wenn während der Ladung 10 Funkenübergänge an einer Maßflasche von 324 cm Kapazität gezählt wurden, deren Funkenpotential 27 000 Volt betrug? Welche elektrische Energie war in der Batterie gespeichert, und wie groß war ihre Kapazität, wenn nach der Ladung ein Potentialunterschied von 3000 Volt zwischen den Belägen gemessen wurde?

b) Man zeige, daß für einen Luftkondensator, dessen Beläge zwei konzentrische Kugelschalen von den Radien $R_1 = 9$ und $R_2 = 10$ cm sind, die Kapazität $C = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} = 90$ cm beträgt. Wie groß ist C, wenn $R_2 = \infty$ wird?

§ 267. § 267. Die Wirkungen der Flaschenentladung unterscheiden sich von denen eines gewöhnlichen Konduktors nicht dem Wesen, sondern nur dem Grade nach. Die stärkeren Effekte haben ihre Ursache in der größeren elektrischen Energie, die sich in einer Flasche aufspeichern läßt. Bezeichnet E die Ladung, V die Potentialdifferenz der Beläge, C die Kapazität einer Batterie, so beträgt nach § 264 ihre Arbeitsfähigkeit $\frac{1}{2} EV$ Erg oder wegen $E = VC$ auch $\frac{1}{2} V^2 C = \frac{1}{2} \frac{E^2}{C}$ Erg, wenn sämtliche Größen im elektrostatischen System gemessen sind.

1. Jede Entladung bewirkt eine Erwärmung des Leitungsweges. Man erklärt dies durch die Annahme, daß selbst in den besten Leitern ein Widerstand auftritt, ähnlich den Reibungswiderständen, die durch jede mechanische Bewegung eines Körpers hervorgerufen werden. Bei Überwindung des elektrischen Widerstandes setzt sich ein entsprechender Teil der potentiellen Energie in Wärme um. Da 10^7 Erg äquivalent 0,24 Grammkalorien sind, so können bei einer Batterieentladung höchstens $\frac{0,12}{10^7} \frac{E^2}{C}$ Grammkalorien entstehen. Diese Wärmemenge würde sich auf den ganzen Leitungsweg verteilen

und zwar, wie man annehmen darf, im Verhältnis der Widerstände der einzelnen Teile. Ist der Gesamtwiderstand W , der eines Leiterstücks w , so würden sich in diesem $\frac{0,12 w E^2}{10^7 W C}$ Grammkalorien entwickeln müssen. Dieses Resultat läßt sich durch den Versuch prüfen.

Indem Rieß (1837) die Erwärmung in verschiedenen Drähten maß, fand er den Widerstand proportional der Länge und umgekehrt proportional dem Querschnitt, ferner aber abhängig vom Stoff der Drähte (s. § 286).

Entladet man eine Batterie durch einen dünnen Draht, so lassen sich bei schwächeren Ladungen außer der Erwärmung auch mechanische Veränderungen beobachten. Der Draht wird zickzackförmig geknickt und zuweilen zerrissen. Durch stärkere Entladungen wird er glühend und kann zum Schmelzen und endlich zum Zerstäuben unter glänzender Lichterscheinung und heftigem Knall gebracht werden. Nach Rieß überstieg die Temperatur eines so geschmolzenen Platindrahtes nicht 250° , so daß die Ursache des elektrischen Schmelzens mehr in mechanischen als in Wärmewirkungen zu suchen ist.

2. Eine Umsezung in mechanische Energie läßt sich vermittelt eines Flugrädchens zeigen, das man mit dem Knopf einer geladenen Flasche verbindet, deren äußerer Belag abgeleitet ist. Eine größere Arbeitsleistung wird erhalten, wenn man die äußeren Beläge zweier Flaschen unter sich, die inneren mit den Konduktoren einer Influenzmaschine verbindet. Nimmt man nach der Ladung den Schnurlauf ab, so dreht sich die bewegliche Scheibe nach einem Anstoß in umgekehrter Richtung (§ 251).

Die Durchbohrung einer Glasplatte durch den elektrischen Funken gelingt am leichtesten, wenn man in der Mitte der nicht zu kleinen Platte einen Ring aus Stearin durch Austropfen herstellt und die Mitte der Platte zwischen die Konduktoren der Influenzmaschine bringt, die mit den gewöhnlichen Verstärkungsflaschen versehen ist.

3. Sehr lehrreich sind die Versuche über Strömungsvorgänge, die man mit Hilfe einer oder mehrerer Leidener Flaschen in Halbleitern hervorgerufen kann. Man ladet z. B. zwei Flaschen entgegengesetzt und verbindet hierauf die inneren Beläge durch zwei Drähte mit den Enden eines isolierten, etwa 2 m langen, 1 cm dicken Holzstabes. Führt man eine Probekugel, die mit einem Elektroskop in Verbindung steht, den Stab entlang, so bemerkt man, wie das Potential allmählich nach der Mitte zu abfällt und dort das Vorzeichen wechselt. Die Potentialdifferenz zwischen zwei gleichweit entfernten Punkten des Stabes bleibt merklich dieselbe. Längs der Zuführungsdrähte ist ein Potentialabfall nicht zu beobachten. (Warum?)

4. Befeuchtet man Fließpapier auf einer Glasplatte mit Stärkekleister, dem etwas Jodkaliumlösung zugefetzt ist, und führt zwei Drähte von den Konduktoren einer Influenzmaschine nach zwei Stellen des Papiers, so scheidet sich am positiven Pol Jod aus, wie man an der Blaufärbung erkennt. — Der phosphorartige Geruch, der z. B. während der Tätigkeit einer Influenzmaschine auffällt, rührt von einer Ozonisierung des Sauerstoffs der Luft her.

5. Man entlade eine Leidener Flasche unter Zwischenschaltung eines Halbleiters durch die Windungen eines Galvanometers. Die Magnetnadel wird abgelenkt.

6. Die Entstehung und Natur des elektrischen Funkens wurde bereits in § 252, 9 besprochen. Messungen über die Dauer des Flaschenfunken hat zuerst Wheatstone (1834) angestellt. Er beobachtete den horizontal überspringenden Funken in einem sehr rasch um eine horizontale Achse rotierenden Spiegel. Dabei erschien das Funkenbild in vertikaler Richtung verbreitert. Der Spiegel hatte sich also während der Funkendauer um einen meßbaren Winkel gedreht. Aus der Breite des Funkenbandes und der Drehgeschwindigkeit des Spiegels bestimmte er die Entladungszeit. Feddersen (1859) ließ einen Hohlspiegel rotieren und konnte so das reelle Funkenbild auf einer lichtempfindlichen Platte festhalten. Es zeigte sich, daß das Funkenband, wenn der Widerstand im Schließungsbogen sehr gering war, aus einer Anzahl heller Streifen bestand, woraus F. auf eine oszillatorische Entladung, d. h. einen wiederholten Hin- und Hergang der Elektrizität zwischen den Belägen schloß. Nach den Versuchen von F. hängt die Entladungsdauer wesentlich vom Widerstand des Schließungsbogens, ferner von der Schlagweite und der Größe der Belagoberfläche ab. Für eine Flasche von 0,22 qm Oberfläche betrug die Dauer einer oszillatorischen Entladung bei $4\frac{1}{2}$ mm Schlagweite 0,00009 Sek.

§ 268. § 268. **Einfluß des Dielektrikums.** Eine Leidener Flasche, die durch Anlegen des Ausladers an den äußeren Belag und den Knopf scheinbar vollständig entladen wird, zeigt nach einiger Zeit einen Rückstand, wie man an dem kleinen Funken erkennt, der bei abermaliger Verbindung der Beläge auftritt. Der Sitz dieser Restladung kann nur das Glas der Flasche sein. Daß auch die ursprüngliche Ladung hauptsächlich an dem Glase und nicht an den metallischen Flächen haftet, läßt sich an einer Flasche mit abnehmbaren Belägen nachweisen. Nach der Ladung entfernt man vorsichtig beide Beläge, die man hierauf durch Berührung mit der Hand vollständig entladen kann. Setzt man die Flasche wieder zusammen, so gibt sie einen kräftigen Entladungsfunken. — Die Zwischenschicht eines Kondensators hat also nicht lediglich den Zweck, die beiden Beläge voneinander zu isolieren, sie scheint vielmehr der eigentliche Träger der Ladung zu sein. Hieraus erklärt sich auch die Erscheinung, daß die Kapazität eines Kondensators sehr wesentlich durch die Art der Zwischenschicht bedingt wird (§ 265). Faraday hat zuerst die große Bedeutung des Isolators bei den Kondensatoren erkannt (1838). Indem er die hierbei gewonnenen Erfahrungen und Grundanschauungen nicht nur auf die elektrostatischen, sondern alle elektrischen und magnetischen Erscheinungen ausdehnte, ist er der Begründer der gegenwärtigen Ansichten über Elektrizität und Magnetismus geworden.

Die Oberfläche eines beliebigen Konduktors kann als der innere Belag, die ihm zugewandten Flächen der Gegenstände seiner Umgebung,

z. B. die Zimmerwände, als der äußere, zur Erde abgeleitete Belag eines Kondensators angesehen werden. Laden wir einen Konduktor, so ist nicht seine metallische Oberfläche, wie es den Anschein hat, der Sitz der Ladung, sondern das ihn umschließende, isolierende Medium. Dieses überträgt auch die Wirkungen der elektrischen Kräfte in die Ferne, und alle Erscheinungen im elektrischen Felde haben deshalb ihre Ursachen in Veränderungen des Mediums. Die Kraftlinien sind die Bahnen, in denen die elektrischen Kraftäußerungen sich durch den Isolator hindurch fortpflanzen. Dieser Eigenschaft wegen nannte Faraday die nichtleitenden Körper dielektrisch. Die sogenannten Leiter werden von den elektrischen Kräften nicht durchsetzt, wie man an ihrer Schirmwirkung erkennt (§ 243). Sie spielen also nur eine Art passiver Rolle und sind gleichsam als Lücken im elektrischen Felde anzusehen. Worin die Veränderungen bestehen, die ein Isolator erfährt, wenn er elektrische Energie aufnimmt oder abgibt, darüber bestehen bis jetzt nur Vermutungen. In einem elastischen Körper, durch den eine mechanische Energie übertragen wird, erleiden die einzelnen Teilchen Verschiebungen. Dadurch werden Spannungen in dem Körper hervorgerufen, die von einem Teilchen auf die benachbarten wirken und so eine Fortpflanzung der ursprünglichen Kraftäußerung ermöglichen. Ähnliche Verschiebungen der materiellen Teilchen finden wohl auch in einem Isolator statt, der elektrische Energie überträgt, doch sind sie mehr als Begleiterscheinungen aufzufassen, da sich auch elektrische Wirkungen ebenso wie die des Lichts und der strahlenden Wärme durch den luftleeren Raum ausbreiten. Als den eigentlichen Träger elektrischer Kraftäußerungen in die Ferne sieht man den Lichtäther an, von dem man annimmt, daß er alle Körper durchdringt, innerhalb derselben aber wegen ihres verschiedenen molekularen Aufbaues Veränderungen erfährt, die das Verhalten der Körper als gute oder schlechte Leiter bedingen.

§ 269. Erscheinungen im elektrischen Felde der Erde. Die § 269. elektrische Natur der Gewitter ist seit etwa zwei Jahrhunderten bekannt (Wall 1708). Winkler (1746) nennt den Blitz einen elektrischen Funken im großen Maßstabe. Versuche mit atmosphärischer Elektrizität hat zuerst Franklin vorgeschlagen (1749) und selbst mit Erfolg ausgeführt (1752), indem er einen Drachen, der mit einer Metallspitze versehen war, während eines Gewitters steigen ließ. Dem Ende der nachgewordenen Schnur konnte er Funken entziehen. Bald darauf bemerkten Le Monnier und andere, daß stets, auch bei wolkenlosem Himmel, die Luft elektrisch zu sein scheint. Im Zimmer gelingt der Nachweis nicht. (Warum?) Man muß ihn auf dem Dache eines Hauses oder auf einem freien Platze anstellen. Dabei verfährt man wie bei der Untersuchung eines künstlich hervorgerufenen elektrischen

Feldes (§ 260). Eine Metallspitze oder eine Kerzenflamme wird durch einen Draht mit dem Knopf eines Elektrometers verbunden, dessen Gehäuse zur Erde abgeleitet ist. Hebt man die an einer isolierenden Stange befestigte Kerze empor, so zeigt sich bei heiterem Wetter und nicht zu stark bewegter Luft das Elektrometer positiv geladen. Der Ausschlag wächst in der Nähe der Erdoberfläche mit zunehmender Höhe. Bei einer Erhebung um 1 m beträgt auf freiem Felde die Zunahme des Potentials, das Potentialgefälle, etwa 50—300 Volt, auf Bergspitzen beträchtlich mehr. In der Ebene verlaufen die Flächen gleichen Potentials horizontal. Im unebenen Gelände schließen sie sich den Bodenwellen an und drängen sich besonders über steil ansteigenden Höhen enger zusammen. Es entspricht dies genau dem Verlauf der Potentialflächen eines mit Ecken und Kanten versehenen Konduktors (Fig. 324). Die bisher erwähnten Beobachtungen lassen sich deshalb als Feldwirkungen der negativ geladenen Erde erklären (Ermann 1803). Besitzt die Erdoberfläche z. B. das Potential -10 , so wird ein Punkt P_1 in einer gewissen Höhe das Potential -8 haben, und das Elektrometer, dessen Knopf mit der Kerzenflamme in P_1 und dessen Gehäuse mit der Erde leitend verbunden ist, muß die Potentialdifferenz $-8 - (-10) = +2$ anzeigen, also relativ zur Erde positiv geladen erscheinen. Hebt man die Flamme nach dem höheren Punkte P_2 , dessen Potential -6 sein möge, dann wird der Ausschlag größer werden, da er nun den Potentialunterschied $-6 - (-10) = +4$ mißt. Aus der Annahme einer negativen Erdladung folgt demnach ein Wachsen des Potentials mit der Höhe, was auch die Beobachtungen bestätigen. Dagegen ist durch Ballonsfahrten festgestellt worden, daß in der freien Atmosphäre das Potentialgefälle in größeren Höhen weit rascher abnimmt, als nach der Ermannschen Hypothese zu erwarten ist. So fand Le Cadet (1897) das Potentialgefälle am Erdboden $+150$, in 1150 m Höhe $+42,6$ und in 4000 m Höhe $+13,4$ Volt. Hieraus muß man schließen, daß die Atmosphäre auch bei heiterem Wetter freie positive Ladungen enthält.

Jeder Konduktor, der mit der Luft in Berührung steht, verliert allmählich seine Ladung. Bei hohem Feuchtigkeitsgehalt der Luft beruht dies meist auf einer mangelhaften Isolation durch die Stützen, deren Oberfläche sich dann leicht mit einem dünnen Wasserhäutchen bedeckt. Von den hierdurch bewirkten Verlusten sind die zu unterscheiden, die durch Zerstreuung in die Luft veranlaßt werden. Man nahm früher an, daß ganz reine Luft ein vollkommener Isolator wäre. Ihre scheinbare Leitfähigkeit erklärte man durch eine Wirkung der Staub- und Wasserteilchen, die stets in ihr schweben. Indem die in der Nähe der Konduktorfläche befindlichen Teilchen der elektrischen Anziehung folgen, laden sie sich durch Berührung gleichnamig, werden abgestoßen und nehmen so einen Teil der Ladung mit sich fort.

Hiernach müßte der Verlust durch Zerstreuung um so geringer sein, je weniger die Luft fremde Beimengungen enthält und umgekehrt. Nach den Untersuchungen von Ekster und Geitel (1899) wächst aber die Leitfähigkeit mit der Reinheit der Luft, sie ist im Gebirge größer als in der Ebene, bei Nebelbildung beträchtlich geringer als bei durchsichtiger Luft. In einem geschlossenen Raume läßt sich durch Verbreitung von irgend welchem Rauch oder durch künstliche Nebelbildung die Leitfähigkeit fast vollständig aufheben.

Wie Linß nachgewiesen hat, beträgt der Ladungsverlust in freier, klarer Luft während 1 Minute etwa $\frac{1}{100}$ der ursprünglichen Ladung. Um also das Potential eines Konduktors konstant zu erhalten, muß man ihm in etwa 100 Minuten eine der Anfangsladung gleiche Elektrizitätsmenge zuführen. Demnach würde sich die bei heiterem Himmel vorhandene negative Ladung der Erdoberfläche binnen wenigen Stunden so stark durch Zerstreuung in die Atmosphäre vermindern, daß Potentialunterschiede von der beobachteten Größe unmöglich wären, wenn die Ladungsverluste nicht gleichzeitig wieder ersetzt würden. Es scheint, daß die Luft durch eine schwache Radioaktivität (§ 332) sich selbst ionisiert. Wegen der größeren Beweglichkeit der negativen Ionen wird nun die Erde von mehr negativen als positiven Ionen getroffen, sie wird sich also negativ aufladen, während in der Luft ein Überschuß von positiven Ionen zurückbleibt.

Bei Niederschlägen, oder wenn starke Winde die Atmosphäre mit Staub erfüllen, werden oft negative Ladungen der Luft beobachtet, die mit positiven abwechseln. Das Potentialgefälle ändert sich dann rasch und unregelmäßig zuweilen um 1000 Volt. Die Ladungen scheinen an den Wolken zu haften, aus denen der Regen oder Schnee fällt, denn die elektrischen Störungen hören auf, sobald die Wolken sich verzogen haben. Daß elektrische Ladungen an die Niederschlagsteilchen gebunden sind, hat man durch Beobachtung festgestellt.

Angeheure Potentialunterschiede müssen während eines Gewitters vorhanden sein, wo die Entladungen in Form kilometerlanger Blitze erfolgen. Es ist noch rätselhaft, durch welche physikalischen Prozesse die Ladungsmengen entstehen, die hierbei zum Ausgleich gelangen. Man sucht die Ursache in den Kondensationsvorgängen des atmosphärischen Wasserdampfes. Je plötzlicher sich diese vollziehen, desto heftiger sind die elektrischen Erscheinungen. Auch sind bisher niemals Linienblitze beobachtet worden, ohne daß gleichzeitig Niederschläge oder wenigstens Wolkenbildungen stattfanden. Durch den Versuch konnte eine Elektrizitätserregung durch Verdichtung von Wasserdampf noch nicht nachgewiesen werden.

Wie photographische Aufnahmen zeigen, ist der Linienblitz nie zickzackförmig. Er gleicht vielmehr einem Flußsystem mit umgekehrter

Bewegungsrichtung. Zwischen Wolken sollen blitzartige Entladungen bis 40 km Länge vorkommen. Die zur Erde fahrenden Blitze gehen meist von niedrig stehenden Gewitterwolken aus und sind deshalb selten länger als 2—3 km. Die Elektrizitätsmenge, die in einem Blitz sich entladet, schätzt man nach den ausgeübten Wärmewirkungen auf 60 bis 300 Coulomb.

Dem Knall, den wir bei Entladung einer Leidener Flasche hören, entspricht der Donner beim Blitz. Die längere Dauer erklärt sich aus der großen Länge des Blitzes. Der Schall gelangt von den einzelnen Punkten wegen der verschiedenen Entfernungen nicht zu gleicher Zeit an unser Ohr. Bei den nahen, zur Erde fahrenden Blitzen hört man meistens nur einen kurzen, knatternden Ton. Das Rollen des Donners beruht zum Teil auf der vielfachen Zurückwerfung des Schalles an der Erdoberfläche und den Wolken, zum Teil auf Interferenzwirkung.

Das Wetterleuchten wird verursacht, wenn die Blitze eines fernen, unter dem Horizont befindlichen Gewitters Wolken erleuchten, die über dem Horizont stehen. Die vielfach als besondere Entladungsformen aufgeführten Flächenblitze gehören wohl in dieselbe Klasse von Erscheinungen.

Die St.-Glasfeuer, die sich besonders an den Spitzen der Türme und Masten zeigen, sind Büschel- oder Glimentladungen der Erdboden-elektrizität.

§ 270. § 270. **Blitzableiter.** Der von Franklin erfundene Blitzableiter soll durch Spitzenwirkung den Potentialunterschied zwischen Gewitterwolke und Gebäude so weit herabsetzen, daß der Ausgleich durch einen Blitz möglichst verhindert wird. Gelingt dies nicht, was wohl häufig der Fall sein wird, so soll durch den Ableiter die Entladung unschädlich zur Erde geführt werden. Beide Wirkungen haben zur Voraussetzung eine gute metallische Verbindung der Auffangespitzen mit dem Erdboden. Gewöhnlich dient hierzu ein Drahtseil, von dem ein Ende an eine große Metallplatte angelötet ist, die bis in das Grundwasser versenkt sein muß. Damit keine gefährlichen Seitenentladungen nach guten Leitern im Innern des Hauses stattfinden, sind alle größeren Metallmassen, wie Gas- und Wasserleitung, an die zur Erde geführte Leitung anzuschließen.

Teil III: Strömende Elektrizität.

A. Stromerzeugung auf chemischem Wege.

§ 271. **Volta's Entdeckung.** Im Jahre 1789 machte Galvani, § 271. Professor der Medizin in Bologna, die Beobachtung, daß frisch enthäutete Froschschenkel, die er mittelst kupferner Haken an ein eisernes Gitter gehängt hatte, jedesmal in Zuckungen gerieten, wenn sie das Gitter berührten.

Die Tatsache, daß ein frisch präparierter Froschschenkel durch die Entladungen einer in der Nähe stehenden Elektrisiermaschine in Zuckungen versetzt wird, war schon früher bemerkt worden. Galvani vermutete deshalb, daß auch die von ihm beobachtete Erscheinung auf elektrischer Erregung beruhen müßte, und schrieb sie der in den Muskeln und Nerven selbst vorhandenen Elektrizität zu; er konnte jedoch diese Ansicht durch keinen anderen Versuch stützen.

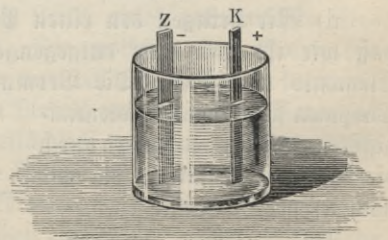
Eine richtige Erklärung gab bereits 1792 Volta, damals Professor der Physik in Pavia. Er zeigte mit Hilfe des von ihm erfundenen Kondensators (§ 265) und eines empfindlichen Elektroskops, daß zwei verschiedene Metalle, z. B. eine Zink- und eine Kupferplatte, zwischen die ein feuchtes Tuchläppchen gelegt war, stets entgegengesetzt elektrisch geladen wurden, und zwar das Zink negativ, das Kupfer positiv.

Am geeignetsten zur Anfeuchtung des Tuchläppchens fand Volta verdünnte Schwefelsäure, doch erwiesen sich auch andere verdünnte Säuren, ferner Laugen und Salzlösungen als wirksam. Von den verwendeten Metallen gaben die die besten Resultate, zwischen denen eine möglichst große Verschiedenheit in bezug auf ihre Verwandtschaft zum Sauerstoff besteht. Das schwerer oxydierbare Metall konnte auch durch einen nicht metallischen Leiter, der sich indifferent gegen die Flüssigkeit verhielt, wie z. B. Holzkohle, ersetzt werden.

Durch diese Entdeckung ist Volta der eigentliche Begründer der Lehre von der strömenden Elektrizität geworden, die man auch häufig Galvanismus nennt.

§ 272. **Das Volta-Element** besteht aus einer Zink- und einer Kupferplatte, die, ohne sich zu berühren, in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure tauchen (Fig. 330). Die hervorragenden Enden der Platten heißen die Pole. Werden diese durch einen Leiter, z. B. einen Draht, miteinander verbunden, so sagt man: das Element ist geschlossen. Solange dies nicht der Fall ist, heißt das Element offen.

Fig. 330.



§ 272.

§ 273. § 273. **Elektroskopische Erscheinungen am offenen Element.**

a) Wir benutzen das mit Kondensator versehene Elektrometer (Fig. 326) und verbinden auf einen Augenblick durch gut isolierte Drähte den Cu-Pol des Elements mit der unteren und gleichzeitig den Zn-Pol mit der oberen Platte. Heben wir hierauf diese ab, so zeigt das Elektrometer, dessen Gehäuse zur Erde abgeleitet ist, eine positive Ladung an. Bei umgekehrter Verbindung der Pole erhält man einen gleich großen Ausschlag, der von einer negativen Ladung herrührt.

Der Ausschlag ist ein Maß für die Potentialdifferenz der Pole des Elements, die etwa 1 Volt beträgt.

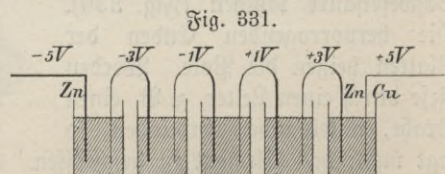
Dieser Versuch kann scheinbar beliebig oft wiederholt werden, ohne daß eine merkliche Abnahme des Ausschlags eintritt. Das Element verhält sich also wie eine selbsttätige elektrostatische Maschine, deren Pole allerdings nur eine so geringe Potentialdifferenz besitzen, daß sie am gewöhnlichen Elektroskop nicht nachweisbar ist. Dafür liefert aber das Element in derselben Zeit eine viel größere Elektrizitätsmenge, als selbst eine große Influenzmaschine, denn eine augenblickliche Berührung der Poldrähte mit den Platten des Kondensators genügt zu dessen Ladung. Das ist auch der Fall, wenn wir als Kondensator eine Batterie aus mehreren Leidener Flaschen benutzen.

b) Die Potentialdifferenz der Pole ändert sich nicht, wenn man die Platten des Elements mehr oder weniger tief in die Flüssigkeit eintaucht oder sie durch einen Zink- und Kupferdraht ersetzt. Die Potentialdifferenz ist also unabhängig von der Plattengröße.

c) Wir erteilen dem einen Pol durch Ableitung zur Erde das Potential Null und verbinden auf einen Augenblick den anderen Pol mit der unteren Platte des Kondensators, indem wir gleichzeitig dessen obere Platte mit der Hand berühren. Je nachdem man den Cu- oder den Zn-Pol mit dem Kondensator verbunden hat, zeigt das Elektrometer das gleiche positive oder negative Potential an, wie bei den Versuchen a. Hieraus folgt: Die Potentialdifferenz zwischen den Polen eines Elements ändert sich nicht, wenn man den einen Pol mit einem Leiter verbindet, der ein anderes Potential besitzt.

d) Wir bringen den einen Pol dadurch auf das Potential Null, daß wir ihn mit dem entgegengesetzten Pol eines zweiten, gleichen Elements verbinden. Die Vermutung, daß nun zwischen den freien Endpolen die doppelte Potentialdifferenz bestehen muß, wird durch die Versuche bestätigt, die wir nach a) oder c) anstellen.

Bei n gleichen Elementen, die man in der angegebenen Weise hintereinander schaltet,



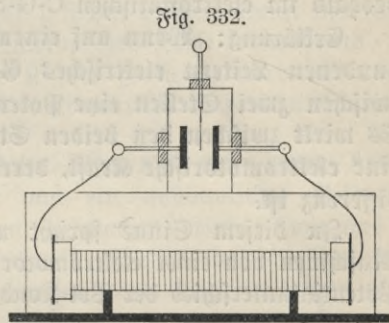
erhält man an den Endpolen die n -fache Potentialdifferenz. In Fig. 331 ist die Potentialdifferenz eines Elements mit $2V$ bezeichnet.

e) Verbindet man bei zwei oder mehreren Elementen sämtliche Zn -Pole unter sich und ebenso sämtliche Cu -Pole, so sagt man, die Elemente sind parallel geschaltet. Eine einfache Überlegung läßt bereits voraussehen, daß in diesem Falle die Potentialdifferenz nicht höher sein kann als bei einem einzigen Element. Man hat nur die Plattengröße vermehrt.

§ 274. Die Zambonische Säule. Es ist umständlich, eine größere § 274. Zahl von Volta-Elementen zu einer Batterie zusammenzusetzen. Für elektroskopische Untersuchungen reichen die durch Zamboni bekannt gewordenen Elemente aus. Diese bestehen aus gleich großen, gewöhnlich kreisrunden Blättchen von unedtem Gold- und Silberpapier, die mit ihren nicht metallischen Seiten zusammengeklebt werden. Die hierbei benutzten Metalle sind hauptsächlich Kupfer und Zinn. Die hygroskopische Natur des Papiers sorgt für die nötige Feuchtigkeit. Man schichtet mehrere Tausend derartiger Elemente in einem gefirnigten Glasrohre so übereinander, daß immer das Kupfer des einen das Zinn des anderen berührt, und verschließt das Rohr durch metallische Deckel, die an dem äußeren Kupfer- und Zinnpol fest anliegen.

Die Potentialdifferenz der Enden einer solchen Säule genügt, um an leichten Körpern, wie z. B. Holundermarkkugeln, die Erscheinung der elektrischen Anziehung und Abstoßung zu zeigen.

Führt man zwei Drähte von den Polen nach zwei sich gegenüberstehenden Metallplatten (Fig. 332), zwischen denen ein Gold- oder Aluminiumblättchen hängt, so wird bereits bei äußerst geringen Ladungen des Blättchens dieses nach rechts oder links getrieben. (Elektroskop nach Behrens, Fechner.)



bei äußerst geringen Ladungen des Blättchens dieses nach rechts oder links getrieben. (Elektroskop nach Behrens, Fechner.)

§ 275. Elektromotorische Kraft. Im Falle des elektrischen § 275. Gleichgewichts hat das Potential eines homogenen Leiters überall denselben Wert. Dies gilt auch für die Leiter eines galvanischen Elements: Zink, Schwefelsäure, Kupfer. Die zwischen den Polen beobachtete Potentialdifferenz kann also nur dadurch zustande kommen, daß an den Berührungsflächen zwischen Metall und Säure das Potential sich plötzlich ändert. Dies läßt sich tatsächlich nachweisen. Der größte Potentialsprung findet dort statt, wo Säure und Zink sich berühren, also an dem Metall, das chemisch stark angegriffen wird. Man nimmt deshalb an, daß infolge dieses chemischen Prozesses $+E$ vom Zink zur Säure und umgekehrt $-E$ von der Säure zum Zink getrieben wird. Die dabei tätigen Kräfte nennt man elektromotorische. Sie rufen die am Zn - und Cu -Pol beobachtete Potentialdifferenz hervor. Dabei spielt

das Kupfer eine mehr passive Rolle und hat hauptsächlich den Zweck, die $+E$ der Säure in bequemer Weise ableiten zu können.

Wäre die Potentialdifferenz der Pole allein vorhanden, so würde $+E$ so lange vom Kupfer durch die Säure zum Zink strömen, bis überall das gleiche Potential herrschte. Diesen Ausgleich verhindern die elektromotorischen Kräfte. Dadurch stellt sich beim offenen Element ein elektrischer Gleichgewichtszustand her.

Volta, der den Begriff Potential nicht kannte, bezeichnete die am Elektroskop nachweisbare Verschiedenheit im Zustandsgrade der Pole mit dem leicht mißverständlichen Ausdruck Spannungsdifferenz. Die Wirkungssumme sämtlicher elektromotorischer Kräfte nannte er die elektromotorische Kraft des Elements, für die er ein Maß in der beobachtbaren Spannungsdifferenz erkannte. Demnach ist die elektromotorische Kraft im Voltaschen Sinne keine Kraft in der üblichen Bedeutung, weder eine mechanische noch eine elektrische. Sie ist eine Größe von derselben Art wie das Potential. Ihre Dimension ist deshalb im elektrostatischen C-G-S-System $\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1}$.

Erklärung: Wenn auf einem oder mehreren miteinander verbundenen Leitern elektrisches Gleichgewicht herrscht und trotzdem zwischen zwei Stellen eine Potentialdifferenz besteht, so sagt man: Es wirkt zwischen den beiden Stellen in entgegengesetzter Richtung eine elektromotorische Kraft, deren Wert gleich dem der Potentialdifferenz ist.

In diesem Sinne spricht man auch bei den elektrostatischen Maschinen von einer elektromotorischen Kraft und mißt sie durch den Potentialunterschied der Polkonduktoren. Ihre Ursache ist in diesem Falle die während des Drehens geleistete mechanische Arbeit.

§ 276. § 276. Das geschlossene Volta-Element. Gewöhnliches Zink wird von verdünnter Schwefelsäure stark angegriffen. Dabei entwickelt sich dort, wo das Metall mit der Säure in Berührung ist, Wasserstoff, das Zink löst sich zum Teil auf, und die Flüssigkeit wird allmählich in Zinkvitriol übergeführt. Dieser chemische Prozeß kann bis auf einen geringen Rest unterdrückt werden, wenn man das Zink vorher amalgamiert. Dadurch wird die Potentialdifferenz gegen die Säure nicht geändert. Man verwendet deshalb bei galvanischen Elementen mit Vorteil amalgamiertes Zink, weil dann der Zinkverbrauch im offenen Element ein verschwindend geringer ist.

Schließt man ein Volta-Element, so beginnt sofort eine lebhafte Entwicklung von Wasserstoff an der Kupferplatte, und der Verbindungsdraht erwärmt sich um so stärker, je dünner er ist. Das Elektrometer zeigt auch jetzt noch eine Potentialdifferenz zwischen den Polen an, die allerdings geringer ist als beim offenen Element und auch verhältnismäßig rasch abnimmt (§ 278).

Wenn wir nach einigen Minuten die Platten aus der Säure heben, so nehmen wir am Kupfer nur insofern eine deutliche Veränderung wahr, als es sich mit Gasbläschen bedeckt hat. Die Zinkplatte dagegen hat an Gewicht verloren, nämlich um so viel, als in der Flüssigkeit gelöst worden ist, während das Element geschlossen war.

Die beobachteten Wirkungen können nur dadurch veranlaßt sein, daß durch die metallische Verbindung der Pole das elektrische Gleichgewicht gestört wird.

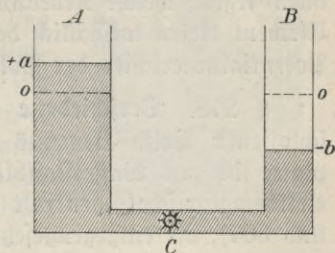
Auf Grund der Ansichten, die wir uns in der Elektrostatik über den Ladungsausgleich zweier Leiter von verschiedenem Potential gebildet haben, müssen wir annehmen, daß im Schließungsdraht $+E$ von der Stelle höheren Potentials, also dem Cu-Pol, nach der Stelle niederen Potentials, dem Zinkpol, übergeht. Während aber bei zwei gewöhnlichen Konduktoren der Ausgleich durch einen metallischen Leiter für unsere Wahrnehmung augenblicklich erfolgt, beobachten wir am Volta-Element, auch nachdem es geschlossen ist, noch eine Potentialdifferenz der Pole. Diese kann nur bestehen bleiben, wenn innerhalb des Elements infolge seiner elektromotorischen Kraft fortwährend $+E$ vom Zink durch die Säure zum Kupfer getrieben wird. Wir gelangen so zur Vorstellung eines kontinuierlich fließenden Stromes.

§ 277. Vergleich des Volta-Elements mit einer hydro- § 277.
mechanischen Vorrichtung. Um uns ein anschauliches Bild von den Vorgängen beim Volta-Element zu machen, erinnern wir uns an einige Grundgesetze der Hydromechanik. Wasser, das in zwei kommunizierende Gefäße A und B gegossen wird, steigt in beiden gleich hoch, z. B. bis 0 . . . 0 (Fig. 333).

In das Verbindungsrohr sei bei C ein Schaufelrad eingesetzt, dessen horizontale und zur Rohrrichtung senkrechte Welle durch eine äußere Kraft in rasche Umdrehungen versetzt werden kann. Jede Schaufel bilde eine Art Jalousie, die sich schließt oder öffnet, je nachdem sich die Schaufel unterhalb oder oberhalb der Welle bewegt. Lassen wir das Rad rechts herumlaufen,

so drücken die Schaufeln Wasser von B nach A, und das Niveau in B fällt etwa bis $-b$, während es in A bis $+a$ steigt. Dadurch entsteht in A ein Überdruck, der das Wasser in umgekehrter Richtung, also von A nach B zu bewegen sucht. Wenn infolge dieses Überdruckes gerade so viel Wasser in einer bestimmten Zeit nach B zurückfließen würde, als gleichzeitig durch die Drehung der Radschaufeln nach A getrieben

Fig. 333.

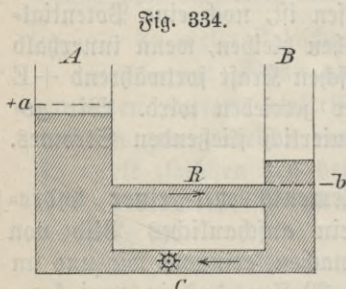


wird, so ist ein mechanischer Gleichgewichtszustand erreicht. In ähnlicher Weise besteht bei dem offenen Volta-Element ein elektrischer Gleichgewichtszustand. Den Niveauunterschied $a + b$ können wir mit der Potentialdifferenz an den Polen vergleichen, die Wirkung der Kraft in C mit der elektromotorischen Kraft des Elements.

Wäre das Gefäß B in der Höhe 0 mit einem See von gleichem Niveau verbunden, so würde das Wasser in A bis zur Höhe $a + b$ steigen. Umgekehrt würde das Niveau in B um $a + b$ fallen, wenn wir das Gefäß A bei 0 mit dem See in Verbindung setzten.

Welche entsprechenden Erscheinungen haben wir beim offenen Element (§ 273) beobachtet?

Denken wir uns nun die beiden Gefäße, in denen vermittelt des Schaufelrades in C der Niveauunterschied $a + b$ hervorgerufen ist, durch ein mit Wasser gefülltes, horizontales Rohr R bei $-b$ (Fig. 334) verbunden, so wird dadurch das bestehende mechanische Gleichgewicht gestört. Wegen des Überdruckes in A muß Wasser durch R nach B abfließen, und die in C wirkende Kraft ist deshalb nicht mehr imstande, den bisherigen Niveauunterschied aufrecht zu erhalten. Der Wasserspiegel in A wird also sinken und der in B steigen, bis durch das Rohr R nur gerade so viel Wasser nach B übergeführt wird, als gleichzeitig das Schaufelrad nach A hinüberdrückt. Von da ab ist ein



neuer Gleichgewichtszustand hergestellt, und der Niveauunterschied bleibt konstant, vorausgesetzt, daß die Wirkung des Rades keine Veränderung durch irgend welche Nebenumstände erfährt. Beim geschlossenen Volta-Element treten tatsächlich derartige sekundäre Wirkungen auf, die den Potentialunterschied der Pole rasch und dauernd verringern.

§ 278. **Verschiedene Elemente.** Die Unbeständigkeit des geschlossenen Volta-Elements rührt vor allem daher, daß die Kupferplatte sich mit Wasserstoffbläschen bedeckt (§ 276). Dadurch wird eine elektromotorische Gegenkraft (Wasserstoff—Säure) hervorgerufen (s. § 305 und 307), die entgegengesetzt wirkt wie die Zink—Säure. Man kann dies einigermaßen verhindern, indem man auf mechanischem Wege, etwa durch wiederholtes Abwischen der Kupferplatte, die Gasbläschen entfernt. Wirksamer und bequemer läßt sich der schädliche Einfluß des Wasserstoffs dadurch beseitigen, daß man der Säure einen stark oxydierenden Körper, z. B. Chromsäure oder eins ihrer Doppelsalze (doppeltchromsaurer Kalium oder Natrium), zusetzt. Hierauf beruhen die Tauchelemente, von denen eine zweckmäßige Form das Flaschen-

element ist, das aus zwei leitend verbundenen Kohleplatten und einer dazwischen befindlichen Zinkplatte besteht (Fig. 335). Da die Lösung das Zink auch bei offenem Element angreift, so befestigt man die Zinkplatte an einem verschiebbaren Stabe, um sie beim Nichtgebrauch des Elements aus der Flüssigkeit herausheben zu können. Bei länger andauernder Benutzung verliert übrigens die Lösung in Folge chemischer Zersetzung rasch ihre oxydierende Eigenschaft. Die am offenen Element gemessene Potentialdifferenz sinkt von 2 auf 1 Volt, wenn es eine Stunde lang kurz geschlossen ist. Die Tauchelemente gehören deshalb wie das Volta-Element zu den inkonstanten.

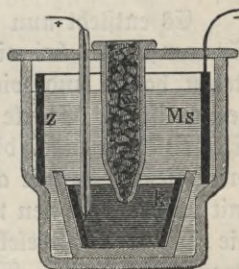
Fig. 335.



Bei den sogenannten konstanten Elementen werden meistens zwei Flüssigkeiten verwendet, von denen die eine durch eine Tonzelle von der anderen getrennt ist. Innerhalb der Poren der Zelle berühren sich die Flüssigkeiten, ohne sich doch mischen zu können.

Die bekanntesten konstanten Elemente sind die von Daniell, Grove, Bunsen und Meidinger. Die ersten drei enthalten amalgamiertes Zink in verdünnter Schwefelsäure als negativen Pol, dagegen als positiven Pol enthält Daniell Kupfer in gesättigter Kupfervitriollösung, Grove Platin und Bunsen Retortenkohle in konzentrierter roher Salpetersäure. In diesen drei Elementen werden die Flüssigkeiten durch eine Tonzelle getrennt erhalten. Das Meidingersche Element (Fig. 336) enthält einen unten aufstehenden Kupferzylinder k, der mit Kupfervitriollösung gefüllt ist, und darüber eine Bittersalzlösung, die einen Zinkzylinder Z umspült. Ein Trichter, in dem sich Kupfervitriolstücke befinden, reicht mit seiner unteren Öffnung in die Kupfersalzlösung, damit diese stets konzentriert bleibt. Der an den Kupferzylinder angelötete Leitungsdraht ist isoliert nach oben geführt.

Fig. 336.



Ein einigermaßen konstantes Element mit einer Flüssigkeit ist das von Leclanché: Zink in gesättigter Salmiaklösung und Kohle umgeben von Braunstein in einer Tonzelle.

Bei den Trockenelementen, zu denen auch die Zambonische Säule zu rechnen ist, verwendet man statt der Flüssigkeit eine teigartige Masse, die z. B. bei den Gafnerschen aus Salmiak, Zinkoxyd, Gips usw.

besteht. Mit dieser Masse ist der Raum zwischen dem Kohlepol und einem Zinkzylinder ausgefüllt, der gleichzeitig als Gefäß dient.

Über den chemischen Prozeß, der sich innerhalb der genannten Elemente abspielt, siehe § 307.

Seit Erfindung des Bleelements (Akkumulator) hat die Verwendung von sogenannten primären Elementen sehr abgenommen. In der Technik werden sie nur noch bei der Telegraphie, der Telephonie und den Klingelapparaten gebraucht. Eine genauere Besprechung der Akkumulatoren erfolgt erst in § 306. Vorläufig genügt es, den Akkumulator als Bleelement aufzufassen, dessen positive Polplatte aus Bleisuperoxyd, die negative aus metallischem Blei besteht. Beide Platten befinden sich in einem Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure. An den Polen des offenen Akkumulators besteht eine konstante Potentialdifferenz von 2 Volt.

B. Erklärung und Messung der Stromstärke.

§ 279. § 279. **Stromstärke.** Bei dem in § 277 besprochenen Hydroelement (Fig. 334) findet eine kontinuierliche Strömung statt. Man nennt eine solche Strömung eine stationäre. Da wir die Gefäß- und Rohrwandungen als starr und das Wasser als eine unzusammendrückbare Flüssigkeit betrachten können, so muß durch alle Querschnitte, mögen sie weit oder eng sein, gleichzeitig dieselbe Wassermenge fließen. Messen wir die Stärke des Stromes durch die Wassermenge, die in einer Sekunde durch einen beliebigen Querschnitt hindurchgeht, so können wir auch sagen: **Bei einer stationären Strömung ist die Stromstärke in allen Querschnitten die gleiche.**

Es entsteht nun die Frage, was wir unter dem analogen Begriff Stromstärke bei einer stationären elektrischen Strömung zu verstehen haben und wie wir diese Stromstärke messen können. Theoretisch ist die Stärke eines elektrischen Stromes bestimmt durch die Elektrizitätsmenge, die in 1 Sekunde den Querschnitt eines Leiters durchfließt. Da wir aber elektrische Ladungsmengen nicht unmittelbar mit unseren Sinnen wahrnehmen können, so ist es auch nicht möglich, die Stärke eines elektrischen Stromes direkt wie die eines Wasserstromes zu messen. Wir müssen also einen indirekten Weg einschlagen, und aus den Stromwirkungen, die allein der Beobachtung zugänglich sind, die Stromstärke zu bestimmen suchen.

§ 280. § 280. **Derstedts Entdeckung.** Im Jahre 1820 entdeckte der Däne Derstedt, daß eine Magnetnadel durch einen in der Nähe fließenden elektrischen Strom abgelenkt wird. Wenn er über eine Deflexionsnadel AB (Fig. 337), parallel mit ihr, also in der Richtung des magnetischen Meridians, einen Draht x y hielt, dessen Ende x mit

dem $+$ Pol einer galvanischen Batterie in Verbindung stand, so wurde die Nadel in die Lage $A'B'$ gedreht, sobald er y mit dem $-$ Pol verband. Das Nordende der Nadel wurde also nach Westen abgelenkt, wenn $+E$ von x nach y überging. Bei umgekehrter Stromrichtung beobachtete er eine gleich große Ablenkung im entgegengesetzten Sinne. Hielt er den Draht unterhalb der Nadel (Fig. 338), so bewegte sich ihr Nordende nach der Ostseite, wenn der positive Strom in der Richtung xy floß.

Fig. 337.

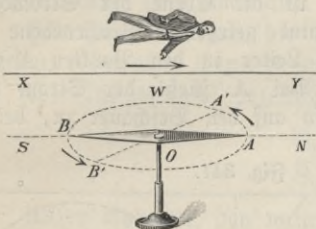
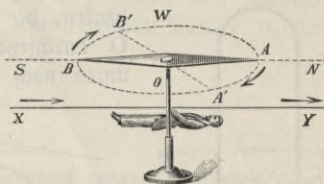


Fig. 338.



Auf Grund dieser Beobachtungen hat Ampère folgende Regel aufgestellt, nach der man in jedem Falle die Richtung der Ablenkung im voraus angeben kann:

Denkt man sich mit dem positiven Strom so schwimmen, daß das Gesicht der Nadel zugewendet ist, so wird ihr Nordpol nach links abgelenkt.

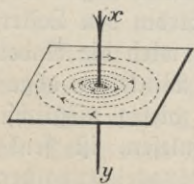
Man kann diese Regel auch so aussprechen:

Legt man die rechte Hand so auf einen stromführenden Draht, daß die Innenseite der Magnetnadel zugewendet ist, die Fingerrichtung mit der Richtung des positiven Stromes übereinstimmt, so zeigt der ausgestreckte Daumen die Richtung an, nach der sich das Nordende der Nadel bewegt.

Man ist übereingekommen, die Richtung vom höheren zum tieferen Potential, in der der Übergang positiver Ladungsmengen erfolgt, kurz als Stromrichtung zu bezeichnen.

§ 281. Magnetisches Feld eines geradlinigen Stromes. Die Verstedtschen Versuche zeigen, daß ein elektrischer Strom ein magnetisches

Fig. 339.



Kraftfeld hervorruft, das sich mit Hilfe von Eisenfeilspänen darstellen lassen muß. Wir führen zu diesem Zweck einen dicken Kupferdraht xy (Fig. 339) durch eine in der Mitte durchlochte Glas- oder Kartonscheibe, befestigen diese horizontal, den Draht vertikal und sieben Eisenfeilspäne auf die Scheibe.

Lassen wir den Strom von etwa vier parallel geschalteten Akkumulatoren in der Richtung xy durch den

Draht gehen, so ordnen sich bei leichtem Klopfen auf die Scheibe die Eisenspänchen in konzentrischen Kreisen an. Eine kleine auf die Scheibe gesetzte Magnetnadel zeigt den Richtungssinn der Kraftlinien an, der in der Figur durch Pfeile bezeichnet ist. Blickt man in der Richtung des fließenden Stromes, so stimmt die Kraftlinienrichtung mit der Bewegungsrichtung eines Uhrzeigers überein. Dieses Resultat ist eine Bestätigung der Ampèreschen Regel.

§ 282.

§ 282. Magnetisches Feld einer Stromschleife. Eine bemerkenswerte Veränderung erfährt das Kraftlinienbild, wenn wir dem Stromleiter die Gestalt einer Schleife geben (Fig. 340). Für den Fall, daß der Leiter fast zum Kreise geschlossen ist, ergibt sich das in Fig. 341 dargestellte Bild. Dabei ist die Ebene der Strombahn senkrecht zur horizontall gelegenen Zeichenebene zu denken, die von dem Leiter in den Punkten A und O durchsetzt wird. Bei A fließt der Strom von unten nach oben, also auf den Beschauer zu, bei O

Fig. 340.

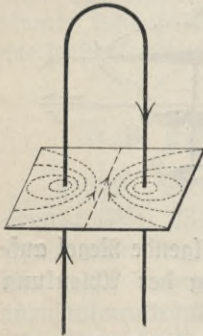
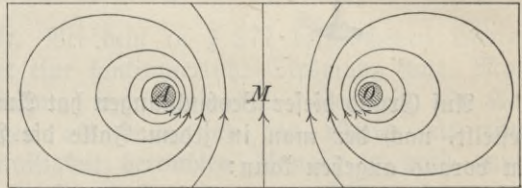


Fig. 341.

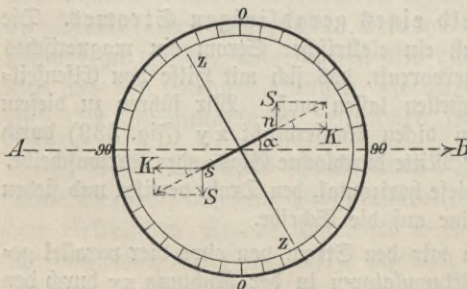


von oben nach unten. Alle Kraftlinien durchschneiden die Stromebene senkrecht und bilden Wirbel um die Punkte A und O. Nahe dem Mittelpunkt M des Leiterkreises verlaufen die Kraftlinien merklich parallel. Hier ist also die magnetische Kraft des Stromes nahezu konstant und das Magnetfeld homogen (§ 228).

§ 283.

§ 283. Tangentenbusssole. Eine sehr kurze Deklinationsnadel, die in die Mitte eines kreisförmigen Stromes gebracht wird, befindet sich stets unter dem Einfluß magnetischer Stromkräfte, die senkrecht zur Stromebene wirken (§ 282). Wir stellen den zunächst stromlosen Leiterkreis vertikal in der Ebene des magnetischen Meridians auf, so daß die magnetische Achse der Deklinationsnadel, deren Mittelpunkt mit dem des Leiters zusammenfällt, in dieser Ebene liegt. Sobald ein Strom den Leiter durchfließt, wird die Nadel um einen Winkel α abgelenkt. Um diesen möglichst genau abzulesen, ist senkrecht zur Längsrichtung der

Fig. 342.



senkrecht zur Stromebene wirken (§ 282). Wir stellen den zunächst stromlosen Leiterkreis vertikal in der Ebene des magnetischen Meridians auf, so daß die magnetische Achse der Deklinationsnadel, deren Mittelpunkt mit dem des Leiters zusammenfällt, in dieser Ebene liegt. Sobald ein Strom den Leiter durchfließt, wird die Nadel um einen Winkel α abgelenkt. Um diesen möglichst genau abzulesen, ist senkrecht zur Längsrichtung der

Nadel ein Aluminiumzeiger befestigt, der über einer Kreisteilung spielt.

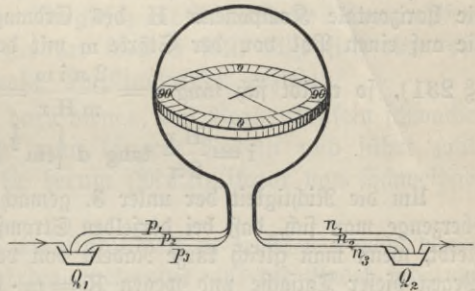
In Fig. 342 bezeichne AB die Richtung des magnetischen Meridians, ns die Nadel in der neuen Gleichgewichtslage und ZZ den Zeiger. Als Angriffspunkte der magnetischen Kräfte, die Erde und Strom auf die Nadel ausüben, können wir die Pole n und s ansehen (§ 231). Es wirken demnach in diesen Punkten parallel AB die Kraft K des Erdmagnetismus und senkrecht AB die magnetische Kraft S des Stromes. Da die Richtung der Resultierenden notwendig mit der Nadelrichtung zusammenfällt, so ergibt sich: $S = K \tan \alpha$.

Für zwei Ströme, die wir nacheinander durch den Drahtkreis schicken, folgt also, wenn S_1 und S_2 die magnetischen Kräfte, α_1 und α_2 die Ablenkungswinkel bezeichnen,

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2}$$

Unser Apparat, den man dieses Gesetzes wegen Tangentenbusssole nennt, gestattet demnach die magnetischen Kräfte verschiedener Ströme zu vergleichen. Daß wir dadurch auch ein relatives Maß für die Stromstärke gewinnen, läßt sich vermitteltst einer Tangentenbusssole nachweisen, die drei voneinander isolierte, gleiche Drahtkreise besitzt. Die sechs Zuführungsdrähte $p_1, p_2, p_3, n_1, n_2, n_3$ (Fig. 343) taucht man zu je dreien in zwei Quecksilbernäpfe Q_1, Q_2 , die mit den Polen einer Stromquelle verbunden sind. Durch jeden Leiterkreis geht dann ein Drittel des Gesamtstromes. Schalten wir die einzelnen Drahtkreise, wie die Figur angibt, so werden alle in gleichem Sinne durchflossen und wirken wie ein einziger Leiter, in dem der ungeteilte Strom fließt. Die Ablenkung der Nadel betrage α^0 . Ver-

Fig. 343.



tauschen wir hierauf die Verbindung des einen Drahtkreises mit den Quecksilbernäpfen, so kehrt sich in ihm die Stromrichtung um. Deshalb hebt die Wirkung dieses Teilstromes die eines der beiden anderen Teilströme auf, und die Nadel wird nun von einem Strom, dessen Stärke ein Drittel des Gesamtstromes ist, um α^0_2 abgelenkt. Da der Versuch $\tan \alpha_1 = 3 \tan \alpha_2$ ergibt, so folgt:

Bei einer Tangentenbusssole verhalten sich die Stromstärken wie die Tangenten der Ablenkungswinkel oder wie die magnetischen Kräfte, die die Ströme auf die Nadel ausüben.

An welcher Stelle der unverzweigten Leitung eine Tangentenbusssole eingeschaltet wird, ist gleichgültig, man erhält stets denselben Ausschlag. Es herrscht also in allen Querschnitten der Leitung die gleiche Stromstärke.

§ 284. § 284. Messung der Stromstärke in elektromagnetischen Einheiten.

Ein elektrischer Strom ruft in seiner Umgebung ein magnetisches Feld hervor (§ 281 und 282), dessen Intensität an irgend einer Stelle durch die Kraft gemessen wird, die ein magnetischer Einheitspol an dieser Stelle erfährt (§ 228). Man hat nun festgesetzt:

Ein Strom, der in einem kreisförmigen Leiter von 1 cm Radius fließt, besitzt die Einheit der Stromstärke, wenn er auf den Einheitspol im Mittelpunkt eine Kraft von 2π Dyn ausübt.

1. Nach § 283 ist die magnetische Kraft eines kreisförmigen Stromes auf einen Magnetpol in seinem Mittelpunkt direkt proportional der Stromstärke.

2. Diese Kraft wirkt umgekehrt proportional dem Radius der Strombahn. Das läßt sich mit einer Tangentenbusssole zeigen, die 2 Stromkreise von verschiedenem Durchmesser besitzt (etwa 20 und 40 cm).

3. Nehmen wir vorläufig an, die gesuchte Kraft ist direkt proportional der Polstärke, so übt ein Strom von der Stärke i auf einen Pol von der Stärke m die Kraft $S = \frac{2\pi i m}{r}$ Dyn aus, wenn er in einem Kreise von r cm Radius den Pol umfließt.

Für die Tangentenbusssole hatten wir die Beziehung abgeleitet

$\tan a = \frac{S}{K}$, wo K die Kraft bezeichnete, die der Erdmagnetismus auf

einen Pol der Deklinationsnadel ausübte. Da bei einer solchen Nadel nur die horizontale Komponente H des Erdmagnetismus in Betracht kommt, die auf einen Pol von der Stärke m mit der Kraft $K = m \cdot H$ Dyn wirkt

(§ 231), so ergibt sich $\tan a = \frac{2\pi i m}{m H r} = \frac{2\pi i}{H r}$, also

$$i = \frac{H r}{2\pi} \tan a \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

Um die Richtigkeit der unter 3. gemachten Voraussetzung nachzuweisen, überzeuge man sich, daß bei derselben Stromstärke die Ablenkung unverändert bleibt, wenn man gleich kurze Nadeln von verschiedener Polstärke verwendet. Wegen dieser Tatsache und wegen $K = m \cdot H$ muß S proportional m sein.

Auf Grund der Formel $i = \frac{H r}{2\pi} \tan a$ ist die Messung einer Stromstärke auf die Bestimmung einer Länge r und der Größe H zurückgeführt, deren Messung nach absoluten Einheiten in § 242 angegeben wurde. Über den Zusammenhang des elektromagnetischen und elektrostatischen Maßsystems s. § 337.

Die elektromagnetische Einheit der Stromstärke ist etwas groß im Vergleich zu den in der Praxis vorkommenden Stromstärken. Man mißt deshalb ausschließlich nach einer sogenannten praktischen Einheit, die nur den 10. Teil beträgt und die man ein Ampère nennt. Die Gleichung

$i = \frac{5 H r}{\pi} \tan \alpha$ gibt die Stromstärke in Ampère an. Ein Strom, der die

Nadel um 45° ablenkt, hat eine Stärke von $\frac{5 H r}{\pi}$ Ampère. Die Größe

$\frac{5 H r}{\pi}$ heißt der Reduktionsfaktor der Tangentenbussole. Bei feiner Be-

rechnung ist zu berücksichtigen, daß die in § 243 angegebenen Werte für H beträchtliche Veränderungen erleiden können wegen der lokalen Wirkungen, die von den Eisenmassen des Gebäudes herrühren.

Die in 1 Sekunde bei 1 Ampère Stromstärke durch den Leiterquerschnitt fließende Ladungsmenge nennt man 1 Coulomb; sie ist nach W. Weber und Kohlrausch gleich $3 \cdot 10^9$ elektrostatischen Einheiten.

Um eine Kugel von 1 m Radius mit einer Elektrifiziermaschine auf das Potential von 30 000 Volt zu laden, sind $\frac{100 \cdot 30\,000}{300} = 10^4$ elektro-

statische Ladungseinheiten nötig. Ein galvanischer Strom von $\frac{1}{10^5}$ Ampère

$= \frac{1}{100}$ Milliampère würde in $\frac{1}{3}$ Sekunden die gleiche Ladungsmenge liefern.

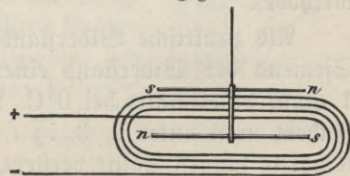
§ 285. Empfindliche Stromanzeiger und Strommesser. Die § 285.

Tangentenbussole mit einem Drahtkreise eignet sich nur zur Messung stärkerer Ströme. Um sie empfindlicher zu machen, führt man den Strom in mehreren voneinander isolierten Windungen um die Nadel. Die ablenkende Kraft des Stromes wächst dann proportional mit der Zahl der Windungen. Wegen des verhältnismäßig großen Durchmesser, den die Drahtkreise im Vergleich zur Nadelänge haben müssen, wenn das Tangentengesetz gewahrt bleiben soll, läßt sich aber auf diesem Wege allein keine große Empfindlichkeit erzielen.

Bei Apparaten, die nur dazu dienen, das Vorhandensein schwacher Ströme nachzuweisen, benutzt man längere Nadeln und führt zahlreiche Windungen dicht um sie herum (Multiplikator von Schweigger und Boggendorf 1820).

Ein anderes Mittel, die Empfindlichkeit zu erhöhen, besteht darin, daß man den Einfluß des Erdmagnetismus auf die Nadel möglichst klein macht, ohne ihn völlig aufzuheben. Man erreicht dies durch Annäherung von Stahlmagneten in geeigneter Lage (Astasierung). Den gleichen Zweck erfüllt das astatische Nadelpaar. Zwei fast gleich stark magnetisierte Nadeln sind mit ihren Mitten an einem Stäbchen so befestigt, daß die ungleichnamigen Pole senkrecht übereinander liegen (Fig. 344). Zur Aufhängung des Nadelsystems verwendet man einen Kokon- oder Quarzfasen. Der zwischen

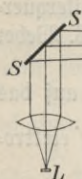
Fig. 344.



den beiden Nadeln befindliche Stromteil lenkt beide in gleichem Sinne ab, während sie der Erdmagnetismus um so schwächer zurückzieht, je weniger ihre Polstärken verschieden sind.

Bringt man über dem Magnetsystem ein fest mit ihm verbundenes Spiegelchen *s* an, auf das man von einer Lichtquelle *L* mittelst

Fig. 345.



einer Konvergenzlinse ein konvergierendes Lichtstrahlenbündel fallen läßt (Fig. 345), so bildet der reflektierte Strahlenkegel einen Zeiger, dem man wegen seiner Gewichtslosigkeit eine solche Länge geben kann, daß selbst äußerst geringe Ablenkungen bemerkbar werden. Man kann

auf diese Weise noch Ströme von $\frac{1}{10^9}$ Ampère nachweisen.

Apparate, die zum Zwecke von Stromstärkemessungen mit einer Skala versehen sind, nennt man Galvanometer. Gibt die Skala die Stromstärke in Ampère an, so heißt das Instrument ein Ampèremeter.

C. Leitungswiderstände.

§ 286. § 286. Widerstände metallischer Leiter. Die Stärke eines Stromes hängt sehr wesentlich von den Dimensionen des Schließungsbogens und dem Stoff ab, aus dem er besteht. Ein je längeres Drahtstück man zwischen Stromquelle und Galvanometer einschaltet, desto mehr geht der Ausschlag zurück. Der Strom wird also durch den Draht geschwächt. Der Bewegung elektrischer Ladungsmengen setzt sich in dem leitenden Mittel ein Hindernis entgegen, ähnlich den Reibungswiderständen, die bei jeder mechanischen Bewegung auftreten.

Man sieht die elektrischen Widerstände zweier Leiter als gleich an, wenn der eine durch den anderen ersetzt werden kann, ohne daß sich die Stromstärke ändert. Wird z. B. an Stelle eines 1 m langen Nickelindrahtes ein gleich dicker Messingdraht von 5 m Länge eingeschaltet und beobachtet man in beiden Fällen dieselbe Ablenkung, so nennt man die Widerstände beider Drähte gleich (Substitutionsmethode).

Als praktische Widerstandseinheit dient nach dem Vorschlage von Siemens der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° C. Man bezeichnet diese Einheit als 1 S. E. Indem man unter 2, 3, . . . n S. E. den Widerstand einer 2, 3, . . . n mal so langen Säule versteht, nimmt man stillschweigend an, daß der

Widerstand proportional ihrer Länge wächst. Diese Annahme liegt nahe, ihre Berechtigung folgt aus § 291 a.

Aus theoretischen Gründen benützt man tatsächlich als Einheit einen Widerstand, der gleich 1,063 S. E. ist, und nennt diese Einheit 1 Ohm (1 Ω). (S. § 295.)

Nach der Substitutionsmethode kann der Widerstand eines Körpers vermittelt eines Galvanometers in Ohm gemessen werden. Man findet, daß er direkt der Länge und umgekehrt dem Querschnitt des Leiters proportional ist, dagegen unabhängig von der Form des Querschnitts.

Ergibt der Versuch für einen L m langen Draht von q qmm Querschnitt einen Widerstand von W Ohm, so muß für einen 1 m langen Draht von 1 qmm Querschnitt der Widerstand $\sigma = W \cdot \frac{q}{L}$ Ohm betragen. Die Größe σ ist charakteristisch für den Stoff des Leiters, sie heißt deshalb der spezifische Leitungswiderstand. Ist σ bekannt, so hat man nur die Länge und den Querschnitt des Leiters zu bestimmen und kann dann seinen Widerstand in Ohm aus der Gleichung $W = \sigma \frac{L}{q}$ berechnen. Es ist angenähert σ bei 18° C für

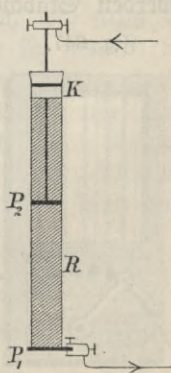
Silber	0,016	Eisen	0,09 bis 0,15	Nickelin	0,42
Kupfer	0,017	Platin	0,14	Konstantan	0,49
Zink	0,062	Blei	0,21	Quecksilber	0,958
Messing 0,07 bis 0,09		Neusilber 0,16 bis 0,40		Gasohle etwa 50.	

Den Wert $\frac{1}{\sigma}$ nennt man die spezifische Leitungsfähigkeit.

§ 287. **Widerstände elektrolytischer Leiter.** Man kann die § 287. Körper, die den elektrischen Strom leiten, in zwei Klassen teilen. Die einen, wie die Metalle, ihre Legierungen, gewisse Erze, Graphit, Gasohle, Braunstein erfahren durch den Strom keine merkliche chemische Veränderung. Die anderen, die sogenannten Leiter zweiter Klasse oder Elektrolyte, werden durch den Strom zerlegt. Ihre Leitungsfähigkeit ist im Vergleich zu den metallisch leitenden Körpern äußerst gering.

Man fülle ein vertikal befestigtes Glasrohr R (Fig. 346) von etwa 40 cm Länge und 3 cm Durchmesser, dessen unteres Ende durch eine angefettete Kupferplatte P_1 geschlossen ist, mit einer Kupfersulfatlösung von etwa 15/100. P_2 ist eine zweite, in dem Rohr verschiebbare Kupferplatte, an die ein steifer Draht angelötet ist, der durch den Kork K eine Führung erhält. Die Länge der eingeschalteten Flüssigkeitssäule läßt sich an einer auf das

Fig. 346.



Rohr aufgeklebten mm-Teilung ablesen. Beträgt der Abstand der Kupferplatten 30 cm, so ergibt sich ein Widerstand von fast 101 Ω . Indem man die obere Platte verschiebt und den jedesmaligen Widerstand mißt, findet man ihn proportional der Länge der eingeschalteten Flüssigkeitssäule. Bei einem Rohr von doppeltem Querschnitt sinkt der Widerstand in jedem Falle auf die Hälfte. Es gilt demnach dasselbe Gesetz für den Widerstand wie bei den metallischen Leitern. Der Wert für σ beträgt bei 18° C für obige Lösung etwa 238 000, für 23,5% Zinkfulfatlösung etwa 208 000, für bestleitende Schwefelsäure von 30,4% etwa 13 500.

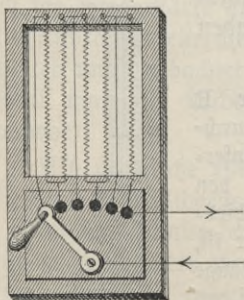
Destilliertes Wasser ist ein fast vollkommener Isolator, und in festem Zustande gilt dies auch für die meisten Elektrolyte. Erst durch ihre Auflösung in Wasser werden diese zu Leitern, deren Widerstand von der Konzentration abhängig ist.

§ 288. § 288. **Einfluß der Wärme auf die Leitfähigkeit.** Mit steigender Temperatur nimmt der Widerstand der Elektrolyte ab. Dadurch unterscheiden sie sich gleichfalls sehr wesentlich von den metallischen Leitern, deren Widerstand mit wachsender Temperatur größer wird.

Schickt man durch einen längeren, dünnen Platindraht P_1 und einen kurzen P_2 einen Strom, der sie beide bis zur schwachen Rotglut erhitzt, und taucht hierauf P_1 in Wasser, so wird P_2 weißglühend. Durch die Abkühlung von P_1 sinkt sein Widerstand, dadurch steigt die Stromstärke (§ 291a). — Man schalte zwischen Stromquelle und Galvanometer eine Spirale aus dünnem Eisendraht und erwärme sie mäßig. Der Ausschlag geht zurück.

Für die einfachen, festen Metalle beträgt die Zunahme von σ bei einer Erwärmung um 100° C etwa 0,4, für Quecksilber 0,088. Bei gewissen Metallegierungen, wie Konstantan, ist σ innerhalb weiter Temperaturgrenzen konstant. Gas Kohle und Graphit verhalten sich Temperaturänderungen gegenüber wie die Elektrolyte. Zu diesen hat man nach neueren Untersuchungen auch gewisse Stoffe, wie Glas und Porzellan, zu rechnen, die bei normaler Temperatur Isolatoren sind, in der Glühhitze aber zu Leitern werden. Besonders kommt diese Eigenschaft der Magnesia und den Oxyden der seltenen Erden wie Thoroxyd, Zirkonoxyd usw. zu. Bei der elektrischen Glühlampe von Kernst werden Stäbchen aus diesen Stoffen, ohne sie in luftleeren Glasbirnen einzuschließen, statt der üblichen Kohlefäden verwendet.

Fig. 347.



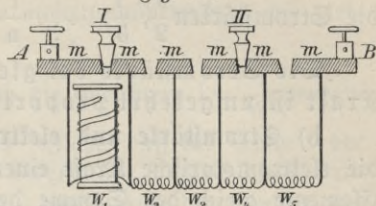
§ 289.

Von Bedeutung ist auch das eigentümliche Verhalten des kristallinischen Selen geworden, dessen Widerstand bei Belichtung bis auf $\frac{1}{15}$ sinken kann.

§ 289. **Widerstandsapparate.** Zur Abschwächung starker Ströme benutzt man Kurbelrheostate, von denen die Fig. 347 eine der üblichsten Formen darstellt. Auch der Kohlefaden der elektrischen Glühlampe ist zu diesem

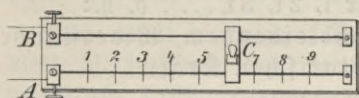
Zweck geeignet. Für Messungen sind Widerstandsätze in Gebrauch, die in Kästen so untergebracht sind, daß man bequem Widerstände von 1 bis mehreren tausend Ohm einschalten kann. Fig. 348 macht die Einrichtung eines Stöpselrheostaten verständlich. Auf dem Hartgummideckel eines Kastens sind die Messingklöze m befestigt, von denen immer je zwei benachbarte mit den Enden einer bifilar gewickelten Widerstandsspule w_1, w_2, \dots in Verbindung stehen. (Die Spulen w_2, \dots, w_5 sind nur schematisch angedeutet.) Je nachdem man die Klöze m durch Metallstöpsel I, II . . . kurz schließt oder nicht, kann man beliebige Spulen in den bei A und B angelegten Stromkreis aus- oder einschalten. Die Figur zeigt die Einschaltung des Widerstandes $w_2 + w_3 + w_5$.

Fig. 348.



Widerstände unter einem Ohm stellt man am einfachsten mittelst eines Rheofords her (Fig. 349). Zwei Drähte von zusammen 1Ω Widerstand sind über einer cm-Teilung ausgedehnt und können durch einen Feder- oder Quecksilberkontakt C überbrückt werden, so daß ein bei A und B angeschlossener Strom Bruchteile der Meßdrähte durchlaufen muß.

Fig. 349.



§ 290. Äußerer und innerer § 290.

Widerstand. Der Gesamtwiderstand eines Stromkreises setzt sich zusammen aus dem äußeren Widerstande, der im Schließungsbogen seine Ursache hat, und dem inneren Widerstande, der von der Stromquelle herrührt. Der innere Widerstand eines Elements ist um so geringer, je größere Polplatten das Element hat und je kleiner deren Abstand ist. Daß man durch Parallelschalten mehrerer Elemente die Plattengröße vermehren kann, wurde bereits in § 273 e erwähnt.

Um eine angenäherte Vorstellung zu gewinnen, wie groß der innere Widerstand eines der gebräuchlichen Elemente ist, schalten wir zwei gleiche Elemente gegeneinander und verfahren dann nach der Substitutionsmethode wie bei der Widerstandsbestimmung eines Drahtes. Man findet so den inneren Widerstand eines Daniell-Elements üblicher Größe etwa $0,3$ bis $0,6 \Omega$, eines Bunsen-Elements etwa $0,1$ bis $0,2 \Omega$. Wesentlich geringer ist der Widerstand eines Akkumulators.

D. Das Ohmsche Gesetz.

§ 291. a) **Stromstärke und Widerstand.** In den Stromkreis § 291. eines Akkumulators oder großen Daniellschen Elements wird ein

empfindliches Galvanometer von bekanntem Widerstande g und ein Rheostatenwiderstand w eingeschaltet, so daß der äußere Widerstand $W = w + g$ etwa 100Ω beträgt, gegen den also der innere Widerstand nicht in Betracht kommt. Nachdem die Stromstärke i abgelesen ist, erhöhen wir den Widerstand auf $2W$, $3W$, ... nW und beobachten die Stromstärken $\frac{i}{2}$, $\frac{i}{3}$, ... $\frac{i}{n}$. Hieraus folgt:

Die Stromstärke bei gleichbleibender elektromotorischer Kraft ist umgekehrt proportional dem Widerstande.

b) **Stromstärke und elektromotorische Kraft.** Nach § 273d ist die elektromotorische Kraft einer Batterie hintereinander geschalteter Elemente gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der Elemente. Der innere Widerstand einer derartigen Batterie ist gleich der Summe der einzelnen Widerstände. Bei einer Akkumulatorenbatterie von selbst 10 Elementen beträgt diese Summe unter normalen Verhältnissen nur Bruchteile eines Ohm. Bilden wir also einen Schließungsbogen von etwa 1000Ω , so können wir den Gesamtwiderstand als unverändert ansehen, gleichgültig, ob wir 1, 2, 3, ... oder 10 Akkumulatoren hintereinander verbunden haben. Bestimmen wir in jedem Falle an einem Galvanometer, das noch Milliampère zu messen gestattet, die Stromstärke, so finden wir i , $2i$, $3i$, ... , d. h.:

Die Stromstärke ist bei gleichbleibendem Widerstande direkt proportional der elektromotorischen Kraft.

c) **Elektromotorische Kraft und Widerstand.** Sehr einfach gestalten sich die Versuchsbedingungen, um den Zusammenhang von elektromotorischer Kraft und Widerstand bei gleichbleibender Stromstärke festzustellen. Wir benutzen wieder der Reihe nach 1, 2, 3, ... hintereinander geschaltete Akkumulatoren oder Elemente und halten den Nadelaus Schlag eines beliebigen Stromanzeigers dadurch konstant, daß wir mit Hilfe eines Stöpselrheostaten und Rheochords jedesmal den erforderlichen Widerstand zuschalten. Der Versuch ergibt dann, daß den elektromotorischen Kräften e , $2e$, $3e$, ... die Rheostatenwiderstände w , $2w$, $3w$, ... entsprechen. Ist x der unbekannte innere Widerstand eines Elements, so beträgt der Gesamtwiderstand in den einzelnen Fällen $w + x$, $2w + 2x$, $3w + 3x$, ... Damit ist der Satz erwiesen:

Die elektromotorische Kraft ist bei gleichbleibender Stromstärke direkt proportional dem Widerstande.

d) **Einfachste Form des Ohmschen Gesetzes.** Die Ergebnisse der Versuche a, b, c können wir in das Gesetz zusammenfassen:

Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt, dem Gesamtwiderstande umgekehrt proportional.

Dieses Grundgesetz wurde von Ohm (1827) auf experimentellem Wege entdeckt und von ihm theoretisch abgeleitet unter der Voraus-

setzung, daß die Fortleitung elektrischer Ladungsmengen nach demselben Gesetz erfolgt wie die Wärmeleitung in einem Körper, der vor Wärmeverlust gegen die Umgebung geschützt ist. Der Temperaturdifferenz entspricht die Potentialdifferenz (elektromotorische Kraft), der in 1 Sek. durch den Körperquerschnitt fließenden Wärmemenge die in derselben Zeit durch den Elektrizitätsleiter fließende positive Ladungsmenge (Stromstärke), dem inneren Wärmeleitungsvermögen die elektrische Leitungsfähigkeit.

Das Ohm'sche Gesetz läßt sich durch die Gleichung $i = \frac{e}{W}$ wiedergeben, wenn man die Maßeinheiten so festsetzt, daß die Einheit der Stromstärke in einem Leiterkreise vom Widerstande 1 durch die elektromotorische Kraft 1 erzeugt wird. Denn dann muß die Einheit der elektromotorischen Kraft, wenn der Gesamtwiderstand W Einheiten beträgt, die Stromstärke $\frac{1}{W}$ hervorrufen (Satz a), demnach e elektromotorische Kräfteinheiten im letzteren Leiterkreise $\frac{e}{W} = i$ Stromeinheiten (Satz b).

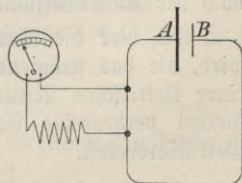
Sind von den drei in Betracht kommenden Größen die Einheiten für zwei gewählt, so ist die Einheit der dritten Größe eindeutig bestimmt.

Man nennt diejenige elektromotorische Kraft (Potentialdifferenz) 1 Volt, die in einem Leiterkreise vom Gesamtwiderstande 1 Ohm die Stromstärke 1 Ampère erzeugt.

§ 292. Änderung des Potentials längs eines Stromkreises. § 292.

1. Es wurde bereits in § 267,3 hervorgehoben, in welcher Weise man bei großen Potentialunterschieden, wie sie elektrostatische Maschinen liefern, die Änderung des Potentials in Halbleitern am Elektroskop nachweisen kann. Um den entsprechenden Versuch am Schließungsbogen einer galvanischen Batterie anzustellen, kann man das Kondensator-Elektrometer (Fig. 326) benutzen. Bequemer und sicherer ist folgende Anordnung: Man verbinde die Pole A und B eines Akkumulators (Fig. 350) durch einen etwa 5 m langen, $\frac{1}{2}$ mm starken Nickeldraht und zweige von zwei Punkten der Leitung einen Stromkreis ab, der aus einem empfindlichen Galvanometer und einem Rheostaten besteht. Der Strom, den das Galvanometer dann anzeigt, kann nur daher rühren, daß zwischen den Abzweigungspunkten der Hauptleitung eine Potentialdifferenz vorhanden ist.

Fig. 350.

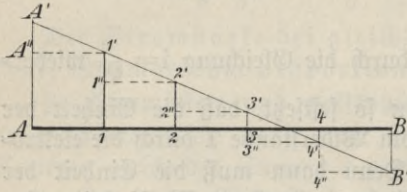


Legen wir den Nebenschluß an irgend zwei anderen, gleichweit

entfernten Punkten an, so bleibt der Galvanometerausschlag derselbe, dagegen nimmt er zu oder ab, je nachdem man den Abstand jener Punkte größer oder kleiner macht.

In Fig. 351 stellen die Gerade AB den in gleiche Teile getheilten Nickelindraht dar und die in den Teilpunkten errichteten Lote AA', 1 1' . . . BB' die zugehörigen Potentiale. Die durch 1', 2' . . . B' zu AB gelegten Parallelen schneiden dann auf den Loten die Strecken A'A'', 1'1'' usw. ab, die den Potentialunterschied zweier aufeinanderfolgenden Punkte messen. Da der Versuch ergeben hat, daß diese Unterschiede gleich sind, so muß $A'A'' = 1'1'' \dots$ sein. Demnach liegen die Punkte A', 1', 2' . . . B' auf einer Geraden, d. h.:

Fig. 351.

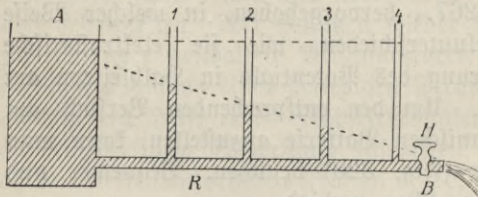


Das Potential nimmt längs einer homogenen Leitung gleichmäßig ab.

Dasselbe Gesetz gilt für die Temperaturabnahme bei der Wärmeleitung, wenn der leitende Stab gegen Wärmeabgabe nach außen geschützt ist, und für die Druckabnahme bei einer stationären Wasserströmung.

Füllen wir das Gefäß A (Fig. 352) mit Wasser, dann steigt das Niveau in den Manometern 1, 2, 3, 4, mit denen das horizontale Abflußrohr R versehen ist, auf die gleiche Höhe, wenn der Hahn H geschlossen ist. Sowie wir H öffnen, fallen die Wasserständen. Führen wir A dieselbe Wassermenge zu, die bei B abfließt, so erhalten wir eine stationäre Strömung, und an den Manometern beobachten wir nun eine gleichmäßige Abnahme des Wasserdrucks längs einer nach der Ausflußöffnung B abfallenden Geraden.

Fig. 352.



Wie hier die Druckabnahme durch die Reibungswiderstände verursacht wird, die das strömende Wasser erfährt, so wird der Potentialabfall längs einer elektrischen Leitung durch den elektrischen Widerstand veranlaßt. Die hierbei verbrauchte Arbeit findet ihr Äquivalent in einem entsprechenden Potentialverlust.

2. Wir schalten nun bei der Versuchsanordnung Fig. 350 vor oder hinter den bereits vorhandenen Draht einen zweiten Nickelindraht von 2, 3 . . . n fachem Querschnitt. Die Entfernung der Abzwei-

gungspunkte auf dem dickeren Draht muß dann 2, 3, ... n mal so groß sein wie auf dem dünnen, um am Galvanometer denselben Ausschlag zu erhalten. Hieraus folgt:

Der Potentialabfall in einem beliebigen Leiterstück ist seinem Widerstande proportional.

3. Die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes für ein Leiterstück läßt sich gleichfalls mittelst der Versuchsanordnung Fig. 350 nachweisen. Um eine größere Potentialdifferenz zur Verfügung zu haben, ersetzen wir nur den einen Akkumulator durch etwa vier hintereinander geschaltete und verfahren dann nach § 291.

4. Um die Potentialänderungen im ganzen Stromkreise eines geschlossenen Elements zu übersehen, nehmen wir der Einfachheit wegen an, daß nur eine einzige elektromotorische Kraft auftritt, nämlich bei b (Fig. 353), wo die Säure die Zinkplatte a berührt, die zur

Fig. 353.

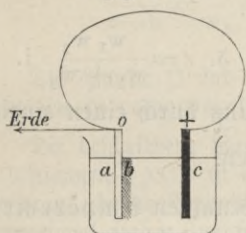
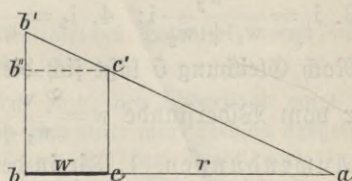


Fig. 354.



Erde abgeleitet sein soll. Das Potential dieser Platte ist also Null, während das der angrenzenden Flüssigkeitsschicht b die elektromotorische Kraft des Elements mißt. Die Kohleplatte c dient nur zur bequemen Ableitung.

Der Gesamtwiderstand des Stromkreises sei durch die Strecke ba (Fig. 354) dargestellt, und zwar sei bc der innere Widerstand w, ca der äußere Widerstand r. Die Punkte b' und c' bedeuten die Potentiale an den Stellen b und c. Der Potentialabfall längs bc wird dann durch die Strecke $b' b''$, der längs ca durch $c c'$ gemessen. (S. § 292, 1.) Letztere Strecke stellt die sogenannte Klemmenspannung dar.

Da in allen Querschnitten dieselbe Stromstärke i herrscht, so ist

$$i = \frac{b' b''}{w} = \frac{c c'}{r}.$$

Die Punkte b' , c' , a liegen mithin auf einer Geraden, die eindeutig durch die Lage der Punkte b' und a bestimmt ist.

Bei einem sehr großen äußeren Widerstande r wird die Gerade $b' a$ fast parallel ba, und die Klemmenspannung $c c'$ ist dann nahezu gleich der elektromotorischen Kraft $b b'$. Je kleiner wir dagegen r machen,

um so näher rückt der Punkt c' an c heran, um so geringer wird also die Klemmenspannung.

Man schließe ein Element durch eine Tangentenbussole von verschwindend kleinem Widerstande, dann findet man die Stromstärke $J = \frac{e}{w}$. Schaltet man hierauf so viel Widerstand r ein, daß die Stromstärke auf die Hälfte sinkt, so ist $w = r$ wegen

$$\frac{J}{2} = \frac{e}{w+r} = \frac{1}{2} \frac{e}{w}.$$

§ 293. § 293. **Stromverzweigung.** Ein Strom, der sich im Punkte A in zwei Ströme teilt, hat nach deren Vereinigung in B dieselbe

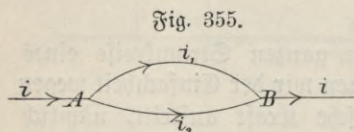


Fig. 355.

Stärke i wie vor der Teilung (Fig. 355). Sind also i_1 und i_2 die Stärken der Teilströme, so muß 1. $i = i_1 + i_2$ sein. Nach dem Ohm'schen Gesetze ist 2. $i_1 w_1 = i_2 w_2 = \varepsilon$, wenn ε die Potentialdifferenz der Punkte A und B

und w_1, w_2 die Widerstände der Zweigleitungen bezeichnen. Aus den Gleichungen 1 und 2 folgt

$$3. i_1 = \frac{w_2}{w_1 + w_2} i; \quad 4. i_2 = \frac{w_1}{w_1 + w_2} i; \quad 5. \varepsilon = \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2} i.$$

Nach Gleichung 5 läßt sich die Verzweigung durch einen einzigen Leiter vom Widerstande $w = \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}$ ersetzen.

Anwendungen. 1. Die in der Technik benutzten Ampèremeter werden in die Hauptleitung eingeschaltet. Man gibt ihnen deshalb einen kleinen Widerstand. Will man ein Galvanometer, das die direkte Messung nur von schwachen Strömen gestattet, auch für Starkströme verwenden, so legt man es in einen Nebenschluß. Beträgt z. B. der Widerstand des Galvanometerzweiges das 99fache des anderen Zweigwiderstandes, so geht durch das Galvanometer ein Strom $i_1 = \frac{1}{100} i$ (Gl. 3). Ein nach $\frac{1}{100}$ Ampère geeichtes Instrument gibt dann die Stärke des Hauptstromes in Ampère an.

2. Ein Voltmeter ist ein empfindliches Galvanometer von großem Widerstande. Erreicht man seinen Klemmen durch Anlegen an zwei Punkte eines Stromkreises die Potentialdifferenz ε Volt, und beträgt der Galvanometerwiderstand w Ohm, so zeigt es einen Strom von $i = \frac{\varepsilon}{w}$ Ampère an. An einer Skala, auf der die w -fachen Werte von i vermerkt sind, kann man demnach die Potentialdifferenz der Klemmen unmittelbar in Volt ablesen. Genau genommen ist dies nicht die Potentialdifferenz, die vor Anlegung des Voltmeters zwischen den Abzweigungspunkten der Hauptleitung bestand. Wegen des großen Widerstandes, den man diesen Instrumenten gibt, ist aber der Fehler meist so gering, daß er praktisch vernachlässigt werden kann.

Aufgabe. Bei einem Stromkreise, dessen elektromotorische Kraft 10 Volt und dessen gesamter Widerstand 5 Ohm beträgt, wird an den Endpunkten eines Leiterstücks vom Widerstand 1 Ohm ein Voltmeter von 500 Ohm Widerstand angelegt. Wie groß ist der durch das Meßverfahren verursachte Fehler?

3. Wheatstone'sche Brücke (Fig. 356). Zwei Punkte A und B eines einfachen Stromkreises werden durch eine zweite Leitung ADB verbunden. Da in jedem Zweige das Potential zwischen A und B um den gleichen Betrag fällt, so gehört zu jedem Punkte C des ersten Leiterstücks ein bestimmter Punkt D des Zweiges ADB, der dasselbe Potential hat. Ein zwischen C und D eingeschaltetes Galvanometer G muß also stromlos sein.

Bezeichnen wir die Potentiale in den Punkten A und B mit a und b , in C und D mit v , so folgt nach § 292, 2

$$\frac{a-v}{v-b} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4}.$$

Die Punkte C und D haben also gleiches Potential, wenn sie beide Leitungen in proportionale Widerstände teilen.

Die beschriebene Vorrichtung dient dazu, den Widerstand eines Leiters zu bestimmen. ACB ist ein geradlinig über einer mm-Teilung ausgespannter Meßdraht, dessen Teilwiderstände AC und BC den Drahtlängen l_1 und l_2 proportional sind. Zwischen A und D wird ein Widerstandskasten, zwischen D und B der zu messende Widerstand eingeschaltet. Der mit dem Galvanometer verbundene Brückendraht DC liegt mit dem Endpunkt D fest an, während C mittelst eines Gleitkontaktes längs des Meßdrahtes AB verschoben werden kann. Verbindet man die Punkte A und B mit den Polen einer Stromquelle E und verschiebt dann C, bis der Galvanometerauschlag Null ist, so findet man $w_4 = w_3 \frac{l_2}{l_1}$ Ohm.

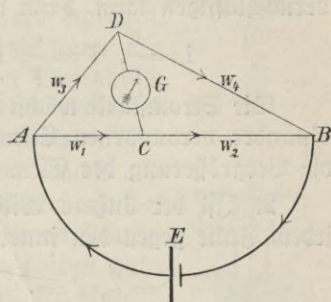
§ 294. **Schaltung von Elementen.** Die elektromotorische Kraft § 294. eines Elements betrage e Volt, sein innerer Widerstand w Ohm, der äußere Widerstand r Ohm, dann ist nach § 273 d, e und § 291 die Stromstärke

$$i = \frac{e}{w+r} \text{ Ampère für das einzelne Element;}$$

$$i' = \frac{e}{\frac{w}{k} + r} \text{ Ampère für eine Kette von } k \text{ parallel geschalteten Elementen;}$$

$$i'' = \frac{ne}{nw+r} \text{ Ampère für eine Batterie von } n \text{ hintereinander geschalteten Elementen;}$$

Fig. 356.



$$i''' = \frac{ne}{\frac{nw}{k} + r} \text{ Ampère für eine Batterie von } n \text{ hintereinander}$$

geschalteten Ketten, deren jede aus k parallel verbundenen Elementen besteht.

1. Ist der äußere Widerstand sehr groß, wie z. B. in Telegraphen=drähten, so daß man den inneren Widerstand in jedem Falle gegen r vernachlässigen kann, dann wird

$$i = \frac{e}{r}, \quad i' = \frac{e}{r}, \quad i'' = \frac{ne}{r}, \quad i''' = \frac{ne}{r} \text{ Ampère.}$$

Die Stromstärke wächst also proportional mit der Zahl der hintereinander verbundenen Elemente, während die Parallelschaltung oder die Vergrößerung der Elemente die Stromstärke nicht ändert.

2. Ist der äußere Widerstand r sehr klein, so daß man ihn in jedem Falle gegen den inneren vernachlässigen kann, dann wird

$$i = \frac{e}{w}, \quad i' = \frac{ke}{w}, \quad i'' = \frac{e}{w}, \quad i''' = \frac{ke}{w} \text{ Ampère,}$$

die Stromstärke wächst also proportional mit der Zahl der parallel verbundenen Elemente, während die Schaltung der Elemente hintereinander die Stromstärke nicht ändert.

3. Um mit einer gegebenen Anzahl von n Elementen die größte Stromstärke bei einem bestimmten äußeren Widerstande r zu erhalten, muß man sie so schalten, daß der innere Widerstand gleich dem äußeren ist.

Verbindet man nämlich immer k Elemente parallel miteinander, so erhält man $\frac{n}{k}$ Ketten. Diese geben hintereinander geschaltet die Stromstärke

$$i = \frac{\frac{n}{k}e}{\frac{w}{k} \cdot \frac{n}{k} + r} = \frac{ne}{\frac{w}{k} \cdot n + kr} \text{ Ampère.}$$

In dieser Gleichung ist der Zähler ne der rechten Seite konstant. Damit i möglichst groß wird, muß also der Nenner $\frac{w}{k}n + kr$ möglichst klein sein. Nun hat das Produkt $\frac{w}{k}n \times kr$ aus den Summanden des Nenners die unveränderliche Größe wnr . Deshalb muß $\frac{w}{k}n = kr$ oder $r = \frac{w}{k} \cdot \frac{n}{k}$ sein. (Von allen Sehnen, die man durch einen festen Punkt innerhalb eines Kreises legen kann, wird die kürzeste in jenem Punkt halbiert.)

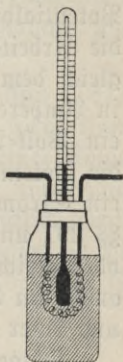
E. Stromwirkungen innerhalb eines Leiters.

1. Wärmewirkungen.

§ 295. **Joulesches Gesetz.** Wenn wir in einen Stromkreis § 295. einen Platindraht und einen gleich dünnen Silberdraht einschalten, so erwärmt sich der schlecht leitende Platindraht weit stärker. Bei genügendem Strom sehen wir ihn erglühen, während der Silberdraht dunkel bleibt, und wenn wir die Stromstärke erhöhen, so schmilzt zuerst der Platindraht durch, obgleich der Schmelzpunkt des Silbers (960° C) beträchtlich tiefer liegt als der des Platins (1800°).

Die Wärmewirkung in einem Leiterstück wächst also jedenfalls mit der Stromstärke und dem Widerstand des Leiters. Zur genaueren Untersuchung bringt man Platindrahtspiralen verschiedener Länge, an deren Enden dicke, kupferne Zuführungsdrähte befestigt sind, in ein Kalorimetergefäß, das eine nicht leitende Flüssigkeit, z. B. Alkohol oder auch destilliertes Wasser, und ein empfindliches Thermometer enthält (Fig. 357). Man findet dann:

Fig. 357.



Die in den Spiralen erzeugten Wärmemengen sind direkt proportional der Zeit, dem Widerstande und dem Quadrat der Stromstärke.

Hiernach entwickelt ein Strom von i Ampère in einem Leiter von r Ohm Widerstand in t Sekunden die Wärmemenge

$$w = ki^2rt \text{ Grammkalorien,}$$

wenn 1 Ampère bei 1 Ohm Widerstand k Grammkalorien in 1 Sekunde erzeugt.

Dieses Gesetz wurde von Joule (1841) aufgestellt auf Grund von Versuchen mit konstanten galvanischen Strömen. Es heißt deshalb das Joulesche Gesetz. Bereits 1837 hatte Rieß die Wärmeentwicklung in Drähten bei der Entladung von Leidener Flaschen untersucht und den Zusammenhang zwischen elektrischer und Wärmeenergie richtig erkannt (§ 267).

Man hat das Joulesche Gesetz zur Bestimmung der Widerstandseinheit 1 Ohm benutzt, von der wir bisher nur angeben konnten, daß sie 1,063 S. E. beträgt.

Eine Grammkalorie ist einer mechanischen Arbeit von 0,427 kgm äquivalent (§ 138), und ein Sekunden-kgm ist gleich 9,81 Watt (§ 22a), mithin ist 1 Sekunden-Grammkalorie äquivalent $9,81 \cdot 0,427$ Watt, also 1 Watt äquivalent 0,24 Sekunden-Grammkalorien. Man hat nun festgestellt:

Ein Leiter, in dem ein Strom von 1 Ampère in 1 Sekunde eine Wärmemenge von 0,24 Grammkalorien erzeugt, hat den Widerstand 1 Ohm.

Die Konstante k in der Gleichung für das Joulesche Gesetz ist hiernach gleich 0,24 Grammkalorien.

Aufgabe. Zwei Drähte aus Platin und Silber (oder Kupfer) von gleicher Länge und Dicke werden 1. hintereinander, 2. parallel in einen Stromkreis eingeschaltet. Warum glüht im Falle 1 der Platindraht, im Falle 2 der Silber- oder Kupferdraht zuerst?

§ 296. § 296. **Arbeitsfähigkeit eines Stromes.** Die Wärmemenge von $0,24i^2r$ Grammkalorien, die ein Strom von i Ampère in einem Leiter von r Ohm Widerstand in 1 Sek. entwickelt, ist nach § 295 äquivalent einer mechanischen Arbeitsleistung von i^2r Watt. Nach dem Ohmschen Gesetz ist $ir = V_1 - V_2$, wenn an den Enden des Leiters die Potentialdifferenz von $(V_1 - V_2)$ Volt besteht. Wir können demnach die Arbeitsleistung eines Stromes gleichsetzen $(V_1 - V_2) i$ Watt, also gleich dem Produkt aus Potentialdifferenz in Volt und Stromstärke in Ampère. Man gebraucht deshalb für ein Watt auch die Bezeichnung ein Volt-Ampère. Hiernach kann 1 Volt auch definiert werden als die Potentialdifferenz, die an den Enden eines Leiters besteht, wenn ein Strom von 1 Ampère die Arbeitsfähigkeit von 1 Watt hat (vgl. §§ 291 und 321). Eine Pferdestärke (PS) ist gleich 736 Watt (§ 22 b) oder gleich 736 Volt-Ampère. Diese Arbeit leistet z. B. eine Stromquelle im Schließungsbogen bei einer Klemmenspannung von 110 Volt und einer Stromstärke von 6,69 Ampère in 1 Sekunde.

Obiger Bestimmung der Arbeitsleistung eines Stromes liegt das Joulesche Erfahrungsgesetz zugrunde. Wir gelangen zu demselben Resultat auch auf theoretischem Wege.

Wenn eine elektrostatische Ladungsmenge von $+e_1$ Coulomb in einem elektrischen Felde von einem Punkte 1 mit dem Potentiale V_1 Volt nach einem Punkte 2 mit dem Potentiale V_2 Volt mechanisch verschoben wird, so findet ein Arbeits- oder Energieumsatz von $(V_1 - V_2) e_1 \cdot 10^7$ Erg statt (§ 258). Je nachdem diese Arbeit positiv oder negativ ist, d. h. je nachdem V_1 größer oder kleiner als V_2 ist, sinkt oder steigt dabei die potentielle Energie des Systems. Im ersten Falle gibt es eine entsprechende Arbeit ab, im zweiten verzehrt es dieselbe Arbeit und speichert sie auf.

Werden die beiden Punkte durch einen Leiter verbunden, und ist $V_1 > V_2$, so fließt von 1 nach 2 ein Strom, und wenn dessen Stärke i Ampère beträgt, so gehen in jeder Sekunde i Coulomb durch den Querschnitt des Leiters.

Nehmen wir an, daß bei diesem Übergang derselbe Arbeitsprozeß sich abspielt wie bei der mechanischen Verschiebung von Ladungsmengen, so muß die Arbeitsleistung des Stromes $(V_1 - V_2) i \cdot 10^7$ Erg pro Sekunde oder $(V_1 - V_2) i$ Watt betragen.

Über die Berechtigung unserer Annahme, die zunächst nur auf einem Analogieschluß beruht, kann allein der Versuch entscheiden. Die Bestätigung wird durch die Jouleschen Versuche erbracht. Denn der theoretisch abgeleitete Wert des Stromeffektes stimmt genau mit dem überein, der sich aus dem Jouleschen Erfahrungsgesetz ergibt.

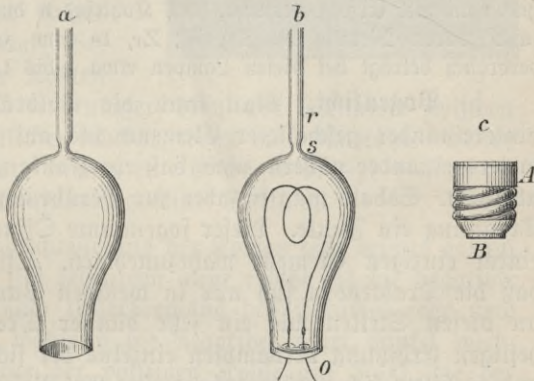
§ 297. **Elektrisches Licht.** Der Gedanke, die Wärmewirkungen § 297. des Stromes zu Beleuchtungszwecken auszunutzen, liegt sehr nahe. Eine praktische Bedeutung gewannen die dahingehenden Versuche aber erst, als man durch die Erfindungen Pacinottis, Siemens' und Grammes (s. §§ 313 und 325—327) in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts in der Lage war, durch mechanische Arbeit elektrische Ströme von großer Energie zu erzeugen.

Man unterscheidet bei der elektrischen Beleuchtung zwei wesentlich voneinander verschiedene Arten von Lampen: die Glühlampe und die Bogenlampe.

a) **Glühlicht.** In sehr vollkommener Weise hat Edison (1879) die technischen Schwierigkeiten überwunden, die sich bei der Herstellung einer dauerhaften und billigen Glühlampe zeigten. Ein feiner Kohlefaden ist in eine luftleere Glasbirne eingeschlossen. Dies ist notwendig, da der Strom den von Luft umgebenen Faden fast augenblicklich durchbrennen würde. Die Stromzuführung geschieht durch dünne, in die Birne eingeschmolzene Platindrähte, an denen der Faden befestigt ist.

Edison verwendete anfangs verkohlte Papier- oder Bambusfaser. Gegenwärtig stellt man den Glühkörper aus Zellulose her. Baumwolle wird in verdünnter Schwefelsäure gelöst, und aus dem gehörig gewässerten Brei wird durch Walzen eine feste Masse geformt, die man durch ein Kapillarrohr zieht. Von den so erhaltenen Zellulosefäden schneidet man passende Längen ab, gibt ihnen die

Fig. 358.



verlangte Form und verkohlt sie. Hierauf werden sie in einer luftleer gemachten Kammer, in der sich Öldämpfe befinden, durch einen Strom zum Glühen gebracht. Dabei schlägt sich Kohlenstoff auf ihnen nieder, und zwar besonders an den dünneren Stellen, da diese am stärksten glühen. Die Fäden erhalten so eine gleichmäßige Dicke. Sobald sie den erforderlichen Widerstand besitzen, unterbricht man den Strom. Die Enden jedes Fadens werden nun mit zwei Platindrähten verbunden, die in ein Glasstück eingeschmolzen sind. Mit diesem setzt man jeden Faden in eine Glasbirne ein von der Form Fig. 358a und verschmilzt das Glasstück mit der Birne (Fig. 358b), die nunmehr vermittelst des Rohres r an eine Luftpumpe angeschlossen und evakuiert wird (0,2 mm Quecksilberdruck). Hierauf schmilzt man bei s ab, lötet an die hervorragenden Platindrähte Kupferdrähte an und gibt die Birne mit dem Ende o in eine Messinghülse ein (Fig. 358c), die mit einem

Schraubengewinde versehen ist. An A wird der eine Kupferdraht gelötet, der andere an ein metallenes Plättchen B, das von A durch Gips isoliert ist. Die Lampe kann in eine Messingfassung eingeschraubt werden, deren Muttergewinde mit dem einen Pol der Stromquelle in Verbindung steht. Der andere Pol ist an eine Feder angeschlossen, die am Boden der Fassung, isoliert von diesem, befestigt ist. Gegen die Feder wird beim Einschrauben der Birne das Plättchen B gepreßt.

Eine Lampe von 16 Hefnerkerzen erfordert einen Strom von 0,51 Ampère bei 110 Volt. Der Kohlesaden hat also in glühendem Zustande (§ 288) einen Widerstand von etwa 216 Ohm. Der Energieverbrauch beträgt $0,51 \cdot 110 = 56$ Watt, also pro Kerze 3,5 Watt. Eine Pferdestärke, die beim Betriebe von 13 Lampen verbraucht wird, gibt hiernach nur eine Lichtwirkung von 208 Hefnerkerzen.

Man hat deshalb versucht, Glühlampen zu konstruieren, bei denen die elektrische Energie in günstigerer Weise ausgenutzt wird. Das ist z. B. bei der Kernstischen Glühlampe der Fall, die pro Kerze nur 1,5 Watt verbraucht. Der Glühkörper besteht hier aus einem Magnesiastäbchen. Da dieses erst bei höheren Temperaturen ein guter Leiter ist (§ 288), so muß es angewärmt werden. Bei den in den Handel gebrachten Lampen geschieht dies selbsttätig durch den Strom, der anfangs eine Platindrahtspirale zum Glühen bringt, die das Magnesiastäbchen durch Strahlung erwärmt. — In neuerer Zeit hat man mit Erfolg versucht, den Kohlesaden durch Fäden der sehr schwer schmelzbaren Metalle Os, Ta, W, Zr, Ir usw. zu ersetzen. Der Energieverbrauch beträgt bei diesen Lampen etwa 1 bis 1,5 Watt pro Kerze.

b) **Bogenlicht.** Man kann die Poldrähte einer großen Zahl hintereinander geschalteter Elemente bis auf Bruchteile eines Millimeters einander nähern, ohne daß ein Funke zwischen den Drahtenden übergeht. Sobald man sie aber zur Berührung bringt, entsteht bei der Trennung ein Funke. Dieser sogenannte Öffnungsfunke ist bereits bei einem einzigen Element wahrzunehmen. Offenbar rührt er daher, daß die Drahtenden sich nur in wenigen Punkten berühren und sich an diesen Stellen wie ein sehr dünner Draht verhalten. Bei der heftigen Erhitzung verdampfen einzelne der sich berührenden Teilchen, und es bildet sich vorübergehend eine Art Brücke für den Strom. Will man die Erscheinung zu einer dauernden machen, so muß man eine Stromquelle von etwa 50 Volt verwenden. Einer der ersten, die den Versuch in großem Maßstabe anstellten, war Davy (1808), der zwei Stäbchen aus dichter Holzkohle mit den Polen einer Batterie von 2000 Voltaelementen verband. Als er die sich berührenden Stäbchen trennte, strahlten ihre Spitzen ein blendendes Licht aus, und zwischen ihnen ging ein glänzender Flammenbogen über, der erst bei einer Entfernung der Spitzen von 7 cm erlosch. Statt der rasch abbrennenden Holzkohle verwendet man seit Foucault (1844) Stifte aus Retortenkohle, die man gewöhnlich senkrecht übereinander stellt, und zwar die positive Kohle oben. Diese Anordnung wird durch die Art des Abbrennens bedingt.

Vor einer direkten Betrachtung der Erscheinung ist zu warnen, da dadurch leicht eine schmerzhafte Augenentzündung hervorgerufen wird. Die einzelnen Vorgänge lassen sich sehr gut beobachten, wenn man mit einer Linse ein Bild von den glühenden Kohlenspitzen entwirft (Fig. 359). Man bemerkt dann, daß die Hauptlichtwirkung von der positiven Kohle ausgeht, die sich unter Abschleudern glühender Teilchen kraterförmig aushöhlt. Einige dieser Teilchen setzen sich an die negative Kohle an. Dadurch wird diese allmählich zugespitzt. An beiden Kohlen zeigen sich, etwas vom Rande entfernt, perlenartige Erhöhungen, die durch Auschwitzung fremder Bestandteile verursacht werden.

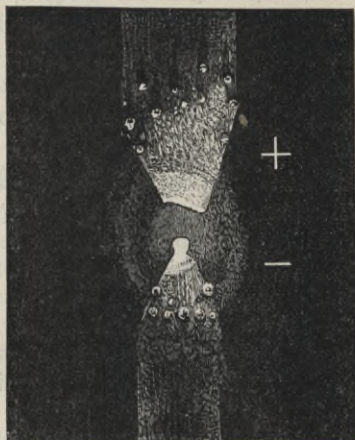
Der Flammenbogen, der außerordentlich reich an ultravioletten Strahlen ist und deshalb stark auf die photographische Platte wirkt, macht auf die Netzhaut des Auges nur einen geringen Eindruck. Bei normaler Entfernung der Kohlen

(2—5 mm) erscheint er als ein ruhiger, bläulicher Schimmer zwischen den Spitzen. Er wird deutlicher sichtbar, wenn man die Kohlen weiter auseinanderzieht. Erst dann nimmt er eine bogenförmige Gestalt an und wechselt rasch und unregelmäßig seine Stellung.

Die verschieden starke Lichtwirkung der Kohlen läßt bereits darauf schließen, daß die positive sich bedeutend mehr erhitzt als die negative. Man bemerkt auch, daß nach Unterbrechung des Stromes jene noch längere Zeit weiterglüht, während die negative sofort dunkel wird. Man schätzt die Temperatur der positiven Kohle auf 3500, die der negativen auf 2500, die des Flammenbogens auf 2000° C. In ihm schmelzen und verdampfen deshalb die strengflüssigsten Metalle, wie z. B. Platin. Stellt man zwischen einer dicken Stricknadel als positivem Pol und einem Kohlenstift als negativem einen Lichtbogen her, so verbrennt die Nadel, indem geschmolzene Eisenkügelchen abtropfen, rasch unter lebhaftem Funkenprühen. Die Metalle und ihre Salze färben den Lichtbogen, und bei der spektroskopischen Untersuchung zeigen sich die den verschiedenen Metallen charakteristischen Linien.

Von der positiven Kohle brennt in derselben Zeit etwa $2\frac{1}{2}$ mal soviel Masse ab wie von der negativen. Für Beleuchtungszwecke verwendet man deshalb Kohlenstifte vom Querschnittsverhältnis $2\frac{1}{2} : 1$, damit sie beim Abbrennen möglichst gleichmäßig kürzer werden.

Fig. 359.



Jede selbsttätig funktionierende Bogenlampe ist mit einer Regulier-
vorrichtung versehen. Diese bewirkt, daß beim Stromschluß die
Kohlen sich berühren. Hierauf werden sie, um den Lichtbogen zu bilden,
selbsttätig einige Millimeter auseinandergezogen und in dem Maße,
wie sie abbrennen, nachgeschoben.

Eine gleichmäßige Beleuchtung mit einer frei brennenden Bogen-
lampe ist wegen der Kohlenstellung nicht möglich. Flächen, senkrecht
unter ihr, liegen im Schatten der negativen Kohle, und auf Flächen in
gleicher Höhe mit der Lampe trifft nur Licht, daß die negative Kohle
und der wenig leuchtende Kratertrand der positiven ausstrahlt. Die
größte Lichtwirkung findet in der Richtung statt, die gegen die Vertikale
um 45° geneigt ist. Deshalb stellt man bei Projektionslampen die
Längsachse der Kohlen schräg. Praktisch erreicht man eine gleichmäßigere
Lichtverteilung durch Überfangglocken.

Der Potentialverlust in einer Bogenlampe beträgt etwa 50 Volt. Die
Lichtstärke steigt angenähert proportional mit der Stromstärke. Zur Be-
leuchtung von Plätzen und Innenräumen werden meistens Lampen von
6—12 Ampère verwendet, für Projektionszwecke sind die für 16 Ampère
die üblichsten. Die mittlere räumliche Lichtstärke beträgt bei 12 Ampère un-
gefähr 1600 Hefnerkerzen. Da in diesem Falle $12 \cdot 50 = 600$ Watt ver-
braucht werden, so sind für eine Hefnerkerze etwa 0,38 Watt erforderlich. —
Bei den Effektbogenlampen (s. Brehmerlicht § 213) sind den Kohlen ver-
schiedene Metallsalze, besonders Fluorkalzium, beigemischt. Indem diese
Salze im Lichtbogen verdampfen, strahlen sie ein sehr helles farbiges Licht
aus, so daß der Wattverbrauch pro Kerze beträchtlich niedriger ist als bei
den gewöhnlichen Bogenlampen.

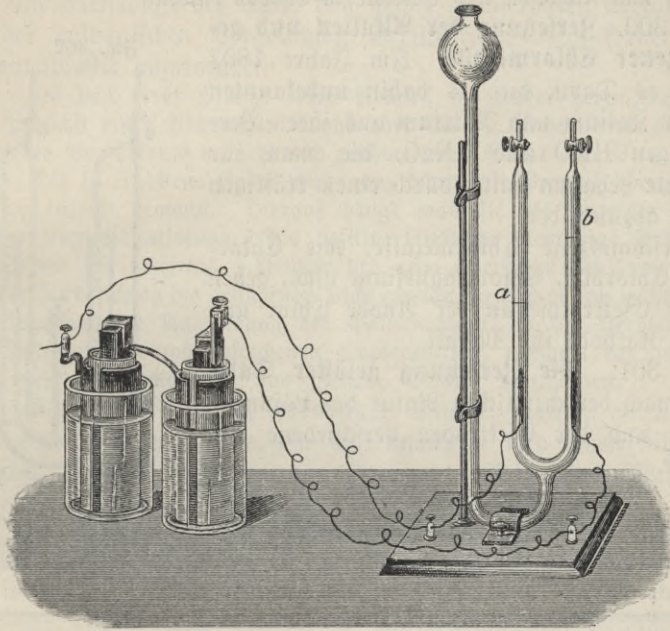
2. Elektrolyse.

§ 298. § 298. **Bezeichnungen.** Wir haben bereits in § 287 erwähnt,
daß man die Körper, die den elektrischen Strom leiten, in zwei Klassen
einteilen kann, in solche, die keine bemerkbare Veränderung dabei er-
fahren, wie z. B. die Metalle, und in solche, die durch den Strom zer-
setzt werden, die sogenannten Elektrolyte. Zu diesen gehören die
Säuren, Basen und Salze, wenn sie in Wasser gelöst sind oder sich
im geschmolzenen Zustande befinden. Da der Widerstand der Elektro-
lyte sehr groß ist, so benutzt man für den Ein- und Austritt des
Stromes nicht die verhältnismäßig dünnen Volldrähte, sondern Metall-
platten. Die Platte, wo der Strom eintritt, heißt die positive Elektrode
oder Anode, die, wo er austritt, die negative Elektrode oder Kathode.

§ 299. § 299. **Zersetzung des Wassers.** Das Wasser leitet den
Strom um so schlechter, je reiner es ist. Destilliertes Wasser ist fast
ein Isolator. Durch Zusatz weniger Tropfen Schwefelsäure wird es
zu einem der besten elektrolytischen Leiter. Bei seiner Zersetzung ver-
wendet man Platinbleche als Elektroden, um eine chemische Ein-
wirkung der Elektrodenplatten auf die Flüssigkeit und die sich

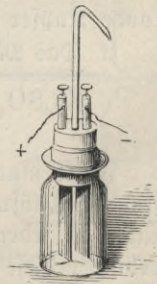
abscheidenden Stoffe auszuschließen. Sobald man durch den Apparat Fig. 360, der mit angesäuertem Wasser gefüllt ist, den Strom von mindestens zwei hintereinandergeschalteten Bunsenelementen oder Akkumulatoren (s. § 305) gehen läßt, entwickeln sich Gase an beiden Platinblechen, die sich oberhalb in den Röhren a und b ansammeln.

Fig. 360.



In dem Flüssigkeitsbogen, der die Elektroden verbindet, ist keine Zersetzung wahrzunehmen. Das Gas im Schenkel a, in dem sich die Kathode befindet, erweist sich als Wasserstoff, das im Schenkel b als Sauerstoff. Da sich stets 1 Raumteil Sauerstoff und 2 Raumteile Wasserstoff entwickeln, so hat es den Anschein, als ob der Strom direkt das Wasser zersetzt. Man kann die Erscheinung aber auch so erklären: Die beiden Bestandteile H_2 und SO_4 der zugesetzten Schwefelsäure werden durch den Strom ausgeschieden, und zwar H_2 an der Kathode, SO_4 an der Anode. Der Säurerest SO_4 wirkt nun chemisch auf das Wasser nach der Gleichung $SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$, wodurch Sauerstoff an der Anode frei wird. Diese Ansicht gewinnt sehr an Wahrscheinlichkeit durch den Verlauf der Elektrolyse bei anderen Körpern.

Fig. 361.



Will man die Gase gemischt als Knallgas erhalten, so bedient

man sich des Apparates Fig. 361. Durch einen auf die Glasröhre geschobenen Gummischlauch kann man das Gasgemisch über Wasser auffangen oder in eine Schale mit Seifenlösung leiten. Die in diesem Falle sich bildenden Blasen lassen sich in durchaus ungefährlicher Weise entzünden.

Die Elektrolyse des Wassers haben gleichzeitig im Jahre 1800 Ritter in Jena und Nicholson und Carlisle in London entdeckt.

§ 300. § 300. **Zersetzung der Alkalien und geschmolzener Chlormetalle.** Im Jahre 1807 gelang es Davy, die bis dahin unbekannten Metalle Kalium und Natrium aus ihren Verbindungen HKO und HNaO , die man für Elemente gehalten hatte, durch einen kräftigen Strom abzuscheiden.

Geschmolzene Chlormetalle, wie Chlor-silber, Chlorblei, Chlormagnesium usw., geben bei der Elektrolyse an der Anode Chlor und an der Kathode ihr Metall.

§ 301. § 301. **Die Zersetzung gelöster Salze** hat je nach der chemischen Natur des Lösungsmittels und der Elektroden verschiedene Ergebnisse.

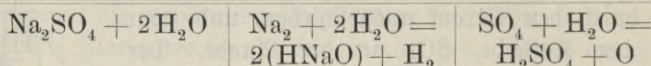
1. Das Metall des Salzes ist schwer oxydierbar wie im Kupfervitriol (CuSO_4) oder im Höllenstein (AgNO_3).

Das Metall schlägt sich an der Kathode nieder, z. B.:

Elektrolyt	Kathode	Anode
$\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	Cu	$\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}$ zwischen Platinelektroden;
CuSO_4	Cu	$\text{SO}_4 + \text{Cu} = \text{CuSO}_4$ zwischen Kupfer- elektroden.

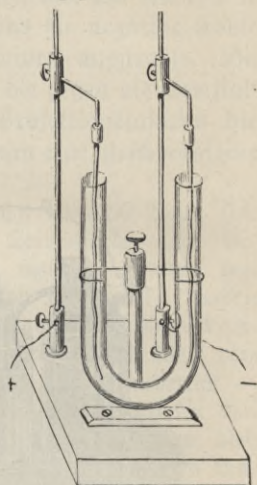
Im letzten Falle ist das Ergebnis dasselbe, als ob bloß von der Anode Kupfer auf die Kathode übertragen worden wäre.

2. Das Metall des Salzes ist leicht oxydierbar, z. B. Glaubersalz:



Füllt man eine u-förmig gebogene Röhre (Fig. 362) mit einer Glaubersalzlösung, die man mit Malventinktur violett gefärbt hat, taucht in jeden Schenkel der Röhre einen Streifen Platinblech und verbindet diese Streifen mit den Poldrähten, so wird die Flüssigkeit am positiven Pole rot, am negativen grün, außerdem entweichen Sauerstoff und Wasserstoff gerade so, als ob das Wasser zersetzt würde.

Fig. 362.



Sehr leicht zerlegbar ist Jodkalium, desgleichen Kochsalz in einer wässrigen Lösung:

Elektrolyt	Kathode	Anode
KJ	$K + H_2O = HKO + H$	J
NaCl	$Na + H_2O = HNaO + H$	Cl

Die Elektrolyse der Salze von schwer oxydierbaren Metallen wird bei der galvanischen Vergoldung, Versilberung usw., ferner in der Galvanoplastik angewendet.

Um von einer Münze einen Abdruck in Kupfer herzustellen, macht man zunächst einen Abdruck in Wachs oder Stearin, indem man die Münze mit einem Papierrande verzieht und geschmolzenes Wachs oder Stearin darauf gießt. Die so erhaltene Form wird ganz dünn mit Graphit überzogen und dadurch leitend gemacht. Hierauf hängt man sie als negative Elektrode in eine Kupfersulfatlösung. Als positive Elektrode dient eine Kupferplatte. Der Strom soll höchstens 1 Ampère pro qdm Oberfläche der Form betragen. Hat der Niederschlag die genügende Dicke erreicht, so läßt er sich leicht abheben.

Eine wichtige Anwendung der Galvanoplastik ist die Vervielfältigung von Holzschnitten und gestochenen Kupferplatten, wodurch es möglich ist, eine große Zahl Abdrücke von gleicher Schärfe herzustellen.

§ 302. **Erites Gesetz Faradays.** Schaltet man in einen Strom- § 302. kreis eine Zersetzungszelle, ein Galvanometer und einen Rheostaten, so kann man das folgende, von Faraday (1834) durch Versuche gefundene Gesetz bestätigen:

Die Menge der durch einen Strom aus einem Elektrolyten ausgeschiedenen Bestandteile ist der Stromstärke und der Zeit proportional.

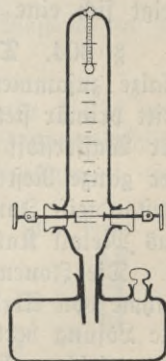
Auf diesem Satz beruht die Anwendung der Voltmeter zur Messung der Stromstärke. Es ist hierzu jede Zersetzungszelle geeignet, bei der man die Mengen der abgeschiedenen Stoffe dem Gewicht oder Volumen nach bestimmen kann. Fig. 363 stellt das Knallgasvoltmeter von Kohlrausch dar. Die Platinelektroden sind um 90° gedreht gezeichnet.

Ein Strom, der mehrere hintereinandergeschaltete Voltmeter durchfließt, die alle dieselbe Flüssigkeit enthalten, zersetzt in allen die gleichen Mengen. Dabei ist die Größe und Gestalt der Elektroden von keinem Einfluß. Es ist dies ein neuer Beweis dafür, daß in allen Querschnitten einer unverzweigten Leitung die gleiche Stromstärke herrscht (s. § 283).

1 Ampère scheidet in 1 Sekunde aus 0,174 ccm Knallgas von 0° und 760 mm Druck.

§ 303. **Zweites Gesetz Faradays.** Enthalten vier hintereinander- § 303.

Fig. 363.



geschaltete Voltameter Salzsäure, angesäuertes Wasser, Höllesteinlösung und Kupfersulfatlösung, so werden in 1 Sekunde von 1 Ampère an der Kathode ausgeschieden

H	Ag	Cu
0,01044 mg	1,118 mg	0,3294 mg.

Auf 1 mg H kommen also 108 mg Ag und 31,5 mg Cu. Man kann deshalb sagen: 108 mg Ag und 31,5 mg Cu sind in elektrolytischer Beziehung äquivalent mit 1 mg H.

In der Chemie nennt man diejenige kleinste Gewichtsmenge eines Elements mit einem mg Wasserstoff äquivalent, die sich mit ihm verbinden oder die es in einer Verbindung ersetzen kann. Es sind aber 108 mg Ag und 31,5 mg Cu auch in chemischer Beziehung äquivalent mit 1 mg H. Wir erhalten demnach den Satz:

Die von gleichen Strömen in gleichen Zeiten ausgeschiedenen Mengen verschiedener Elektrolyte sind chemisch äquivalent.

Daß dieses Gesetz auch für die Zeretzungsprodukte an der Anode gilt, folgt direkt aus der Elektrolyse der Salzsäure. Bei den drei anderen Stoffen veranlassen die durch den Strom primär an der Anode abgeschiedenen Bestandteile SO_4 und NO_3 noch sekundäre chemische Prozesse, deren Verlauf durch das Anodenmaterial bedingt ist. In welcher Weise der Säurerest SO_4 dabei sich verhält, wurde in § 301 angegeben. Der Säurerest NO_3 , der bei der Elektrolyse von Höllestein (AgNO_3) sich spaltet, zerfällt, wenn die Anode aus Platin besteht, den Elektrolyten AgNO_3 nach der Gleichung $\text{NO}_3 + \text{AgNO}_3 = \text{N}_2\text{O}_5 + \text{AgO}$. Dabei scheidet sich das Silbersuperoxyd AgO als schwarzes, kristallinisches Pulver ab, während sich N_2O_5 mit Wasser nach der Gleichung $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} = 2(\text{HNO}_3)$ zu Salpetersäure verbindet. In keinem Falle zeigt sich eine Ausnahme gegen das zweite Faradaysche Gesetz.

§ 304. § 304. **Theorie der Elektrolyse.** Nur Flüssigkeiten, die wie Salze zusammengesetzt sind, leiten elektrolytisch den Strom. Dabei tritt primär stets eine Zerteilung der Molekeln des Elektrolyten ein: der Wasserstoff oder das ihn vertretende Metall geht zur Kathode, der ganze Rest wandert zur Anode. Deshalb nannte Faraday diese Bestandteile Ionen oder auch Zonen, d. h. die Wandernden, und zwar das Metall Kation, den Säurerest Anion.

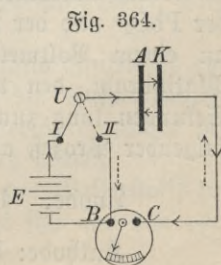
Die Zonenwanderung erklärt sich am einfachsten durch die Annahme von Arrhenius (1887), daß die Molekeln der Elektrolyte durch die Lösung bereits zum Teil in Zonen gespalten werden und dabei eine gleiche, aber entgegengesetzte elektrische Ladung erhalten. Die durch den Strom geladenen Elektroden rufen durch ihre elektrostatische Wirkung eine Bewegung der positiven Zonen zur Kathode, der negativen Zonen zur Anode hervor. Der Teil der Stromenergie, der zur

Überwindung der Reibungswiderstände bei dieser Bewegung verwendet wird, setzt sich in Wärme um. Eine zweite Arbeit muß der Strom leisten, um die an den Elektroden ankommenden und frei werdenden Ionen zu neutralisieren. Dadurch würde das Potential an der Anode sinken, das an der Kathode steigen, also die Potentialdifferenz der Elektroden geringer werden, wenn nicht die elektromotorische Kraft der Stromquelle die ursprüngliche, durch das Ohmsche Gesetz bestimmte Potentialdifferenz aufrecht erhielte, so daß ein dauernder und unveränderter Bewegungszustand sich einstellt, den man als elektrolytische Stromleitung bezeichnet.

Das zweite Faradaysche Gesetz erklärt sich nun am einfachsten durch die weitere Annahme, daß alle einwertigen Ionen die gleiche positive oder negative Ladungsmenge, alle zwei- oder mehrwertigen die doppelte oder entsprechend vielfache Ladung enthalten. Die einem einwertigen Ion anhaftende Ladung verhält sich also wie ein elektrisches, nicht weiter teilbares Atom. Man nennt ein derartiges Elementarteilchen der Elektrizität ein Elektron. Ein Atom, das mit einem Elektron verbunden, also ionisiert ist, verhält sich chemisch völlig anders als im neutralen Zustande. In einer Kochsalzlösung wird das Wasser durch das Ion Na^+ nicht zersetzt, wohl aber durch das gewöhnliche Natriummetall. Gewöhnliches Zink löst sich in Salzsäure auf, nicht aber, wenn man es negativ ladet.

Ein Strom von 1 Ampère, der durch eine wässrige Lösung von Salzsäure fließt, scheidet in 1 Sekunde an der Kathode $M = 1044 \cdot 10^{-8}$ Gramm Wasserstoff ab. Da andererseits 1 Ampère die Ladungsmenge von 0,1 elektromagnetischer Einheiten (s. § 284) mit sich führt, so müssen M Gramm Wasserstoffionen mit dieser Elektrizitätsmenge beladen sein, ein Gramm also mit $\frac{0,1}{M} \sim 10^4$ elektromagnetischen Einheiten. Hieraus folgt für das Verhältnis $\frac{e}{m}$ der Ladung e eines Wasserstoffions zu seiner Masse m der angenäherte Wert 10^4 .

§ 305. **Galvanische Polarisation.** Es wurde in § 276 und § 305. 278 angeführt, daß beim geschlossenen Voltaelement die Potentialdifferenz der Polplatten und damit die Stromstärke rasch abnimmt, weil sich die Kupferplatte mit Wasserstoffbläschen bedeckt. Um den Grund der Stromabnahme genauer kennen zu lernen, schalten wir in den Schließungsbogen einer Stromquelle E (Fig. 364) den Umschalter U , eine Zersetzungszelle mit angesäuertem Wasser, deren Elektroden größere Platinbleche A und K sind, und ein Galvanometer BC . Durch einen Draht verbinden wir noch den Kontakt II von U mit der Galvanometer-

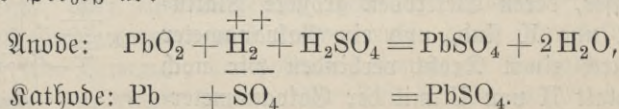


Klemme B. Solange der Kontakthebel auf II liegt, zeigt das Galvanometer keinen Strom an, es besteht also zwischen A und K keine Potentialdifferenz. Wir schieben hierauf den Hebel auf I. Der von E ausgehende Strom fließt dann in der Richtung der ausgezogenen Pfeile durch die Zersetzungszelle und das Galvanometer, und es scheidet sich an der Anode A Sauerstoff, an der Kathode K Wasserstoff ab. Sobald sich die Elektroden mit Gasbläschen beladen haben, unterbrechen wir die Verbindung bei I und stellen den Schluß bei II her. Das Galvanometer gibt jetzt einen Strom in der Richtung der punktierten Pfeile an, also entgegengesetzt dem primären. Dieser sekundäre Strom kann seinen Ursprung allein in der Zersetzungszelle haben, in der er von K nach A fließt, also von dem mit Wasserstoffbläschen überzogenen Platinblech nach dem mit Sauerstoff bedeckten. Man sagt: die Elektroden sind polarisiert. Die Polarisation ruft eine elektromotorische Kraft hervor, die nach Kohlrausch fast 3 Volt beträgt. Deshalb sind zur Wasserzersetzung mindestens 2 Bunsenelemente oder 2 Akkumulatoren erforderlich. Im Voltaelement ist die elektromotorische Gegenkraft beträchtlich geringer. Sie genügt aber, um bei Kurzschluß des Elements den primären Strom in wenigen Minuten fast auf Null herabzudrücken.

In der Zersetzungszelle scheidet der sekundäre Strom bei A Wasserstoff, bei K Sauerstoff ab. Dadurch werden die Platten depolarisiert, und der Sekundärstrom nimmt rasch ab, doch läßt er sich mit einem empfindlichen Galvanometer noch stundenlang nachweisen.

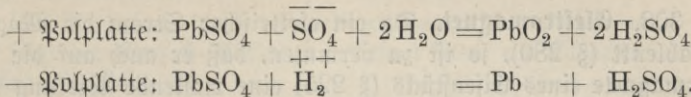
§ 306. § 306. **Akkumulatoren.** Bei Verwendung von Platinelektroden läßt sich ein längere Zeit andauernder kräftiger Polarisationsstrom nicht erzielen. Die besten Resultate ergeben Elektroden aus Blei, was zuerst Sinfbien (1854) bemerkt hat. Stellen wir in ein Glasgefäß mit verdünnter Schwefelsäure (20%) zwei größere Bleiplatten und schicken einen Strom von etwa 5 Ampère einige Minuten hindurch, so nimmt die Anode, an der sich der Sauerstoff entwickelt, eine braune Färbung an, die von Bleisuperoxyd (PbO_2) herrührt, während der frei werdende Wasserstoff die dünne Oxydschicht der Kathode reduziert, mit der jede Bleiplatte, die an der Luft gelegen hat, überzogen ist.

Nach Unterbrechung des primären Stromes können wir zwischen der PbO_2 und der Pb-Platte eine Potentialdifferenz von etwa 2 Volt an einem Voltmeter nachweisen. Ein kurzer, dünner Eisen- oder Platindraht, den wir zwischen die Platten schalten, kommt einige Sekunden lang zum Glühen. Hierbei spielt sich innerhalb der Zelle folgender Prozeß ab:



An beiden Platten wird demnach durch die Entladung Bleisulfat abgeschieden.

Der Vorgang während des hierauf folgenden Ladens läßt sich durch die Gleichungen darstellen:



Nach der Ladung stehen sich also wieder $\overset{+}{\text{PbO}_2}$ und $\overset{-}{\text{Pb}}$ gegenüber.

Die Symbole $\overset{+}{\text{H}_2}$ und $\overset{-}{\text{SO}_4}$ bezeichnen die Zonen, die bei der Entladung durch den Sekundärstrom, bei der Ladung durch den Primärstrom abgeschieden werden und bei dem chemischen Prozeß tätig sind.

Durch wiederholtes Laden und Entladen wird die Oberfläche der Bleiplatten aufgelockert und dadurch befähigt, größere Mengen elektrischer Energie in Form chemischer Energie aufzuspeichern. In dem Plante (1859) diesen Umstand benutzte, gelang es ihm, die ersten Sekundärelemente oder Akkumulatoren von praktischer Bedeutung herzustellen. Faure (1881) kürzte die sogenannte Formierung der Platten dadurch ab, daß er sie von vornherein mit einer Paste von Bleioxyd (PbO) und von Bleisuperoxyd (PbO_2) versah. Letzteres wurde später durch die billigere Mennige (Pb_3O_4) ersetzt.

Für jede Zelle ist zum Laden eine Potentialdifferenz von 2,5 Volt erforderlich. Bei der Entladung beträgt die elektromotorische Kraft einer Zelle anfangs über 2 Volt, sinkt aber rasch auf 1,95 und dann allmählich auf 1,8 Volt. Eine weitere Entladung ist zu vermeiden.

Der innere Widerstand einer Zelle hängt natürlich von der Größe, Anzahl und Entfernung ihrer Platten ab. Er ist meist sehr gering, bei großen Akkumulatoren weniger als 0,001 Ohm. Die Elektrizitätsmenge, die ein Akkumulator abgeben kann, heißt seine Kapazität und wird in Ampèrestunden gemessen.

§ 307. Chemische Vorgänge in den galvanischen Elementen. § 307.

Im Voltaelement scheidet sich an der Kupferplatte H_2 , an der Zinkplatte der Säurerest SO_4 ab, der sich mit Zn zu ZnSO_4 verbindet, das in Lösung geht. Die Polarisation der Kupferplatte bewirkt die rasche Abnahme der Stromstärke beim geschlossenen Element (§ 305).

Im Daniellschen Element werden zersetzt: H_2SO_4 in H_2 und SO_4 , CuSO_4 in Cu und SO_4 . Davon schlägt sich Cu auf der Kupferplatte nieder, $\text{SO}_4 + \text{H}_2$ verbindet sich zu H_2SO_4 , und $\text{SO}_4 + \text{Zn} = \text{ZnSO}_4$ wird gelöst.

Im Grove- und Bunsenelement entsteht ebenfalls Zinksulfat aus $\text{SO}_4 + \text{Zn} = \text{ZnSO}_4$, der Wasserstoff aber reduziert die Salpetersäure: $\text{H}_2 + 2(\text{HNO}_3) = 2\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}_4$, so daß die Salpetersäure infolge des Stromes wasserhaltig wird und Untersalpetersäure auflöst.

In welcher Weise die polarisierende Wirkung des Wasserstoffs bei den letzten drei Elementen verhindert wird, ergibt sich aus den vorstehenden Gleichungen.

F. Wirkungen außerhalb der Strombahn.

1. Elektromagnetismus.

§ 308. § 308. **Elektromagnet.** Da ein elektrischer Strom die Magnetnadel ablenkt (§ 280), so ist zu vermuten, daß er auch auf die Elementarmagnete eines Eisenstücks (§ 225) eine richtende Wirkung ausübt und sie senkrecht zur Stromebene zu stellen sucht. Um möglichst viele Elementarmagnete eines Eisenstabes in seine Längsrichtung zu drehen und ihn so zu einem kräftigen Magneten zu machen, wickeln wir auf ihn einen Kupferdraht in zahlreichen, isolierten Windungen auf und schicken durch die Spule einen Strom. Das Stabende, wo der Strom im Sinne des Uhrzeigers fließt, wird dann ein Südpol, das entgegengesetzte Ende, wo der Strom umgekehrt wie der Uhrzeiger kreist, ein Nordpol (Fig. 365). Dieses Resultat ließ sich auf Grund der Ampèreschen Regel (§ 280) und der Versuche im § 282 voraussagen.



Der erregte Magnetismus nimmt mit der Stromstärke i und der Windungs-

zahl n der Spule zu, doch wächst er nur anfangs proportional mit ni , der Zahl der sogenannten Ampèrewindungen, später langsamer und erreicht endlich einen größten Wert, wenn alle Elementarmagnete gerichtet sind (Sättigungspunkt). Je weicher das verwendete Eisen ist, desto kräftiger wird es unter sonst gleichen Umständen magnetisch. Unterbricht man den Strom, so bleiben in weichen Eisensorten nur geringe Spuren von Magnetismus zurück, indem fast alle Molekeln sich wieder in ihre anfängliche Ruhelage zurückdrehen. Stahl dagegen behält wegen seiner größeren Koerzitivkraft den einmal induzierten Magnetismus fast vollständig.

Ein durch den elektrischen Strom magnetisch gemachter Stab aus weichem Eisen heißt Elektromagnet. Man gibt ihm gewöhnlich die Form des Hufeisens.

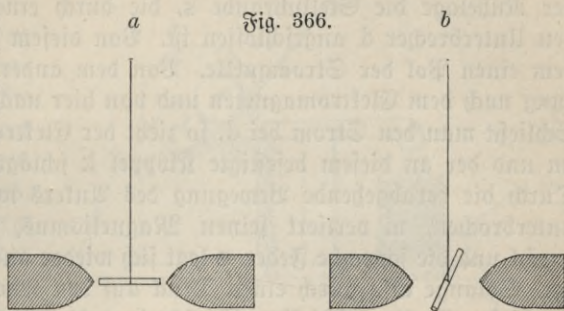
Die Tatsache, daß Stahl und weiches Eisen durch den Strom sich magnetisieren lassen, wurde von Arago (1820) entdeckt.

§ 309. § 309. **Diamagnetismus.** Hängt man an einem Kokonfaden ein Stäbchen aus irgend einem Stoffe zwischen den zugespitzten Polen eines starken Elektromagneten in wagerechter Lage auf, so stellt es sich entweder wie ein Eisenstab so, daß es mit der Verbindungslinie der beiden Pole zusammenfällt (achsil) (Fig. 366a), oder es stellt sich senkrecht gegen diese Linie (äquatorial) (Fig. 366b).

Faraday, dem wir diese Entdeckung verdanken (1845), nannte die Körper der ersten Art paramagnetisch, die der zweiten diamagnetisch. Paramagnetisch

sind außer dem Eisen und den meisten seiner Verbindungen einige Metalle, z. B. Nickel, Kobalt, Platin, und von den Gasen besonders Sauerstoff. Fast alle übrigen Körper sind schwach diamagnetisch, am stärksten verhältnismäßig Wismut.

Über die Ursache dieses verschiedenen magnetischen Verhaltens der Körper gibt folgender Versuch Aufschluß. Bringt man ein Stäbchen aus Glas zwischen die Pole, so zeigt es sich, von Luft umgeben, schwach paramagnetisch wegen der geringen Mengen von Eisen, die es fast immer enthält. Befindet sich jedoch das Glasstäbchen in einer Eisenchloridlösung, die ziemlich stark paramagnetisch ist, so stellt es sich zwischen den Polen äquatorial ein.

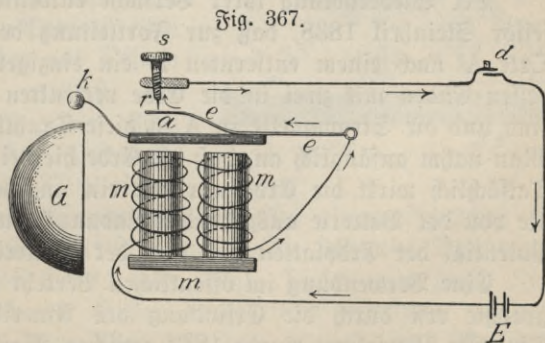


Das magnetische Verhalten eines Stoffes hängt also von dem umgebenden Medium ab. Die gewöhnlich als diamagnetisch bezeichneten Körper sind nur schwerer magnetisierbar als die Luft und, da sie sich auch im luftleeren Raume diamagnetisch zeigen, schwächer magnetisch als der Äther. Die scheinbare Abstoßung, die sie zwischen den Polen erfahren, erklärt sich dadurch, daß das stärker magnetische Medium, die Luft oder der Äther, sie aus der axialen Stellung herausdrängt.

Eine analoge Erscheinung ist der Auftrieb, den ein Körper in einer Flüssigkeit erleidet. Holz und Wasser werden beide von der Erde angezogen. Tauchen wir aber das spezifisch leichtere Holzstück unter Wasser, so wird es scheinbar von der Erde abgestoßen.

§ 310. **Anwendungen des Elektromagnets.** Die vielfachen § 310. praktischen Anwendungen des Elektromagnets beruhen auf der aus-

gezeichneten Eigenschaft des Eisens, nur so lange magnetisch erregt zu bleiben, als der Strom geschlossen ist. Dadurch wird es möglich, an einem entfernten Ort, nach welchem ein Leitungsdraht zu einem Elektromagneten führt, Bewegung hervorzurufen. In welcher Weise sich dies technisch erreichen läßt, dafür mögen folgende Beispiele dienen.



§ 311. § 311. **Klingelapparat.** Vor den Polen des Elektromagneten m (Fig. 367) befindet sich ein eiserner Anker a. Er ist an einer starken Feder e befestigt, deren eines Ende eingeklemmt ist, so daß die Feder und mit ihr der Anker auf- und abschwingen kann. Eine zweite schwächere Feder e (in der Figur ist sie als Fortsetzung der ersten gezeichnet) ist oberhalb an den Anker festgeschraubt und berührt in der Ruhelage die Stellschraube s, die durch einen Leitungsdraht an den Unterbrecher d angeschlossen ist. Von diesem führt ein Draht nach dem einen Pol der Stromquelle. Von dem anderen Pol geht die Leitung nach dem Elektromagneten und von hier nach der starken Feder e. Schließt man den Strom bei d, so zieht der Elektromagnet den Anker a an und der an diesem befestigte Klöppel k schlägt gegen die Glocke G. Durch die herabgehende Bewegung des Ankers wird der Strom bei r unterbrochen, m verliert seinen Magnetismus, der Anker schwingt zurück und die schwache Feder e legt sich wieder an die Kontaktschraube s an. Solange also durch einen Druck auf den Knopf bei d die Leitung an dieser Stelle geschlossen ist, schwingt der Anker auf und ab und schlägt mit seinem Klöppel bei jedem Niedergange an die Glocke. (Über die Wirkung des Extrastromes s. § 323.)

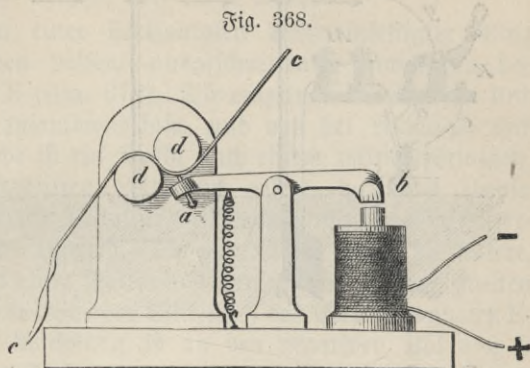
§ 312. § 312. **Telegraphie.** Die Versuche, vermittelst Elektrizität bestimmte Zeichen durch eine Drahtleitung auf große Entfernungen zu übertragen, reichen bis in das 18. Jahrhundert zurück. Den ersten praktisch brauchbaren Telegraphen haben Gauß und Weber 1833 erfunden. Sie benutzten dabei die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom und setzten aus den beiden Zeichen — Ausschlag rechts oder links — das Alphabet zusammen. Die von ihnen eingerichtete telegraphische Verbindung zwischen der Sternwarte und dem physikalischen Institut der Universität Göttingen bestand bis zum Jahre 1845, wo die Leitung durch einen Blitz zerstört wurde. Ihr Verfahren wurde später bei der unterseeischen Kabeltelegraphie angewendet.

Bei Wiederholung ihrer Versuche entdeckte der Münchener Professor Steinheil 1838, daß zur Fortleitung des Stromes von einem Orte A nach einem entfernten B ein einziger Draht genügt, wenn dessen Enden mit zwei in die Erde versenkten Metallplatten verlötet sind und die Stromquelle in A in diese Drahtleitung eingeschaltet ist. Man nahm anfänglich an, daß die Erde hierbei den Strom zurückleite. Tatsächlich wirkt die Erde nur wie ein ungeheurer Behälter, in den die von der Batterie ausgehenden Ladungsmengen abströmen, da das Potential der Erdplatten von dem der Batteriepole verschieden ist.

Eine Verwendung im öffentlichen Verkehr hat die elektrische Telegraphie erst durch die Erfindung des Amerikaners Morse erlangt. Die erste Morselinie wurde 1844 zwischen Washington und Baltimore eröffnet. Da auch gegenwärtig Morseapparate noch häufig in Gebrauch sind, so geben wir das Wesentliche hierüber an.

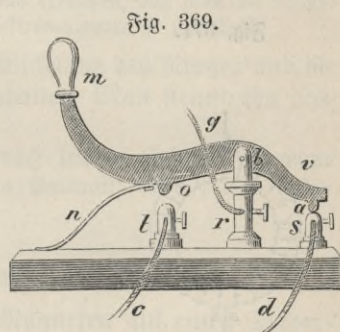
Auf der Station A ist eine galvanische Batterie aufgestellt, von der der eine Poldraht nach einer in der Erde liegenden Metallplatte, der andere nach der Station B führt und dort mit dem einen Ende der Spirale eines Elektromagneten verbunden ist, während das andere Ende, wieder mit einer Metallplatte versehen, in die Erde versenkt ist.

Dicht über den Polen des Elektromagneten hängt, ohne sie jedoch zu berühren, der Anker an dem einen Arm eines Hebels, dessen anderer Arm eine Stahlspitze oder ein mit Farbe versehenes Rädchen trägt (Fig. 368).



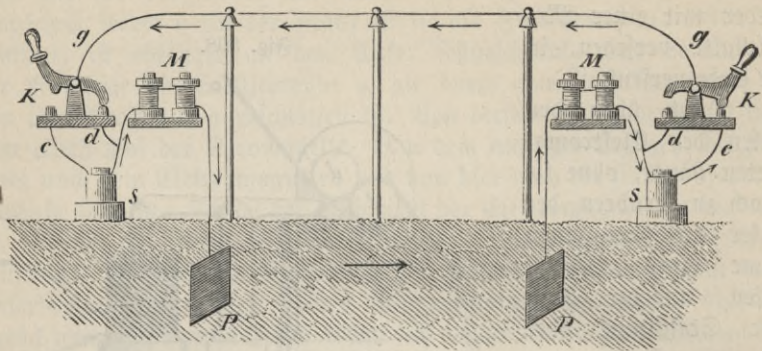
Stahlspitze oder Rädchen drücken, wenn der Anker des Hebels bei b angezogen wird, gegen einen Papierstreifen *cc*, der zwischen zwei durch ein Uhrwerk entgegengesetzt gedrehten Walzen *dd* langsam hindurchgezogen wird, und machen hier einen Punkt oder Strich, je nachdem die Batterie nur einen Augenblick oder längere Zeit geschlossen gehalten und damit der Anker bei b angezogen wird. Der Telegraphist im Orte A ist also imstande, durch Schließen und Öffnen des Stromes auf dem Papierstreifen im Orte B willkürlich Punkte und Striche zu erzeugen. Durch Zusammensetzungen von solchen Punkten und Strichen hat man die Buchstaben des Alphabets ausgedrückt und kann also Nachrichten auf den Papierstreifen schreiben. Das Schließen und Öffnen des Stromes wird mittelst des sogenannten Schlüssels (Fig. 369)

ausgeführt, der in den Leitungsdraht *c* und *g* (Fig. 370) eingeschaltet ist und folgende Einrichtung hat: Auf einem Brettchen ist eine kleine Messingsäule *r* befestigt, welche die stählerne Drehungsachse *b* des messingenen Hebels *mov* trägt. Dieser wird durch eine Feder *n* in der durch die Figur dargestellten Stellung erhalten und stützt sich mit dem Messingknopfe *a* auf die Messingsäule *s*. Bei dieser Stellung ist die metallische Verbindung zwischen A und B unterbrochen. Sobald aber der Hebel an dem Griffe *m*



niedergedrückt wird und der Messingknopf *o* die Messingsäule *t* berührt, ist die Verbindung der Drähte *c* und *g* (Fig. 370) hergestellt und der Strom geschlossen.

Fig. 370.



Die Drahtverbindung zwischen den beiden Stationen ist durch Fig. 370 dargestellt.

PP sind in die Erde versenkte Metallplatten, S die Stromquelle, K der Schlüssel, M der Elektromagnet.

So oft eine Depesche vom Orte A aus nach B abgeschickt werden soll, drückt der Telegraphist im Orte A den Schlüssel mehrmals hintereinander nieder, wodurch der über dem Elektromagneten in B befindliche Hebel in klappernde Bewegung gerät. Hierauf setzt der Telegraphist in B das den Papierstreifen bewegende Uhrwerk in Gang.

Fig. 371.

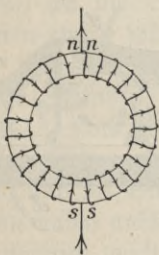
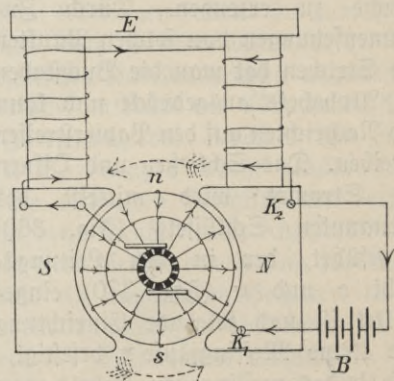


Fig. 372.



§ 313. § 313. **Elektromotor.** Eine besondere Art von Elektromagnet erhält man durch Bewickelung eines eisernen Ringes mit einer in sich selbst geschlossenen Drahtspule. Verbindet man zwei um 180° voneinander entfernte Punkte der Wickelung mit den Polen einer

Stromquelle, so teilt sich der bei s eintretende Strom in zwei Zweige, von denen der eine die linke, der andere die rechte Hälfte des Ringes umkreist (Fig. 371). Bei n vereinigen sich die Zweigströme und fließen dann nach dem negativen Pol ab. Wie sich aus den Stromrichtungen ergibt, entsteht bei s ein Südpol, bei n ein Nordpol.

Ein derartiger, auf einer horizontalen Achse befestigter Ring befindet sich zwischen den passend ausgeschnittenen Polschuhen des Hufeisenelektromagneten E (Fig. 372). Die einzelnen Windungen sind in Gruppen, z. B. 12, zusammengefaßt, und von der Anfangs- und Endwindung jeder Gruppe ist ein Draht nach einem zylinderförmigen, auf der Ringachse aufgekeilten Leiterstück gelegt, das aus ebenso vielen, voneinander isolierten Metallstreifen besteht. Auf diesem Leiterstück schleifen zwei federnde Bürsten. Die eine, in der Figur die untere, ist mit dem positiven Pol einer Batterie B verbunden, von der zweiten führt ein Draht nach einem Ende der Wicklung des Elektromagneten E . Das andere Ende dieser Wicklung ist an den negativen Pol von B angeschlossen. Der Strom fließt von der unteren Bürste in die Spule des Ringankers und ruft an der Eintrittsstelle einen Südpol s , an der Austrittsstelle einen Nordpol n hervor. Im Hufeisenelektromagneten erregt er links einen Südpol S , rechts einen Nordpol N . Da s von N angezogen, von S abgestoßen und n von N abgestoßen, von S angezogen wird, so rotiert der Ring links herum.

Aufgabe. Warum ist es für die Rotationsrichtung des Ringes gleichgültig, ob die Klemme K_1 oder K_2 (Fig. 372) mit dem positiven Pol der Batterie verbunden wird?

Durch welche einfache Einrichtung läßt es sich erreichen, daß man die Stromrichtung entweder nur im Ringanker oder im Elektromagneten E umkehrt?

Bei dem beschriebenen Motor ist die Wicklung des Ringes und die des Elektromagneten E hintereinandergeschaltet. Man nennt ihn deshalb einen Serienmotor.

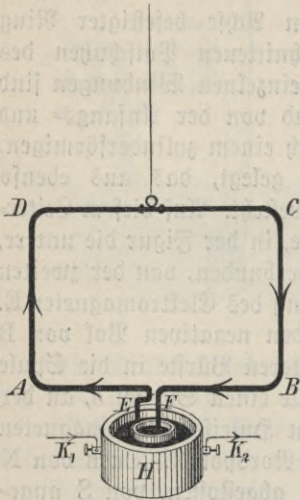
Der Ringanker heißt der Grammesche nach seinem Erfinder Gramme (1871). Eine ganz ähnliche Konstruktion von Pacinotti (1860) war unbekannt geblieben.

2. Elektrodynamik.

§ 314. **Mechanische Wirkung eines Magneten auf einen Strom-** § 314.
leiter. Die Ampèresche Regel (§ 280) bezieht sich auf die Bewegung, die ein feststehender Stromkreis einer drehbaren Magnetnadel erteilt. Auf Grund des Gesetzes von der Aktion und Reaktion muß ein frei drehbarer Stromleiter in der Nähe eines festen Magneten sich so einstellen, daß beide dieselbe gegenseitige Lage haben wie in dem umgekehrten Falle, wo der Stromkreis fest und der Magnet beweglich ist. Um diese Folgerung durch den Versuch zu beweisen, müssen wir einen Stromleiter möglichst leicht beweglich machen.

Die Figur 373 zeigt, in welcher Weise dies geschehen kann. Das Rechteck ABCD aus starkem Aluminiumdraht ist an einem Kofonsfaden so aufgehängt, daß die Seiten AD und BC vertikal stehen. An den Enden E und F

Fig. 373.

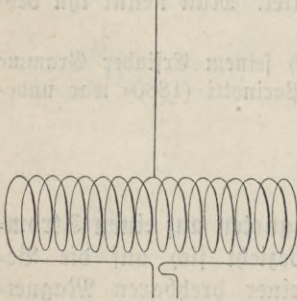


des Leiters sind Silberspitzen eingeschraubt, die in zwei mit Quecksilber gefüllte Vertiefungen des Holzzyllinders H tauchen. Von den Klemmen K_1 und K_2 , die zur Stromzuführung dienen, steht K_1 durch einen in den Holzzyllinder eingelassenen Draht mit dem Quecksilber der äußeren Rinne in Verbindung, K_2 mit dem Quecksilber in der mittleren Ausbohrung.

Legt man einen Magnetstab unter das zunächst stromlose Viereck, parallel der untersten Seite AB, so dreht es sich bei Stromschluß so, daß eine in der untersten Seite mit dem Strome schwimmende und nach unten blickende Person den Nordpol zur Linken hat. Die in der Figur gezeichnete Stellung würde das Viereck einnehmen, wenn der Magnetstab senkrecht zur Zeichenebene mit dem Nordpol nach vorn auf den Holzzyllinder gelegt worden wäre.

Bei ausreichender Stromstärke stellt sich der Leiter allein unter dem Einfluß des Erdmagnetismus senkrecht zum magnetischen Meridian. Für einen nach Norden blickenden Beschauer kreist dann der Strom in der Richtung des Uhrzeigers. Soll dieser Versuch bei Anwendung eines schwächeren Stromes gelingen, so benutzt man statt einer einzigen Drahtwindung ein sogenanntes Solenoid (Fig. 374).

Fig. 374.



Sobald wir den Strom schließen, stellt sich dieses mit seiner Längsachse wie eine Magnetnadel in die Ebene des magnetischen Meridians, und zwar zeigt das Ende nach Süden, wo der Strom in der Richtung der Uhrzeigerbewegung fließt. Bei Umkehrung des Stromes dreht sich das Solenoid um 180° . Von einem genäherten Nordpol wird das Südende angezogen, das Nordende abgestoßen.

Ein Stück unmagnetisches Eisen wird von beiden Enden angezogen. Demnach verhält sich ein stromdurchflossener Schraubendraht wie ein Magnet. Die Kraftlinien im magnetischen Felde eines Solenoids zeigen denselben Verlauf wie bei einem Stabmagneten. Während man aber bei diesem nur vermuten konnte,

daß innerhalb die Kraftlinien parallel der Achse gerichtet sind, lehrt dies bei einem Solenoid der Augenschein.

Ein Eisenstab, der in seiner Längsrichtung leicht verschiebbar ist, wird bei Stromschluß in eine Drahtspule hineingezogen (Fig. 375). Hiervon macht man vielfach Anwendung, z. B. bei der selbsttätigen Regulierung von Bogenlampen, bei der Konstruktion von Strom- und Spannungsmessern.

Fig. 375.

§ 315. **Mechanische Wirkung zweier Stromleiter aufeinander.** Da elektrische Ströme magnetische Wirkungen zeigen, so vermutete Ampère (1820), daß sie sich gegenseitig anziehen oder abstoßen müssen, und es gelang ihm, folgende Gesetze durch den Versuch nachzuweisen:

1. Parallele Ströme von gleicher Richtung ziehen sich an, solche von entgegengesetzter stoßen sich ab.

2. Gekreuzte Ströme suchen sich parallel und in dieselbe Richtung zu stellen.

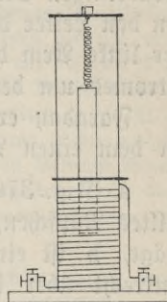
Das zweite Gesetz kann man auch so aussprechen: Die Teile des Leitungsdrahtes, in denen der Strom zugleich nach dem Kreuzungspunkte hin oder zugleich von ihm weg fließt, ziehen sich an; die Teile, in denen die Stromrichtung in bezug auf den Kreuzungspunkt entgegengesetzt ist, stoßen sich ab.

Beide Gesetze lassen sich an dem Apparate Fig. 373 zeigen.

§ 316. **Ampères Theorie des Magnetismus.** Nach § 225 muß § 316. man annehmen, daß jede Molekel eines Magneten selbst ein vollständiger Magnet ist. Da sich nun ein Magnetstab wie ein stromdurchflossenes Solenoid verhält, so kann man sich vorstellen, daß jede Molekel des Stabes von einem elektrischen Strome umkreist ist. Im unmagnetischen Eisen heben sich die Wirkungen der Molekularströme gegenseitig auf, da sie die verschiedensten Richtungen zueinander haben. Bei der Magnetisierung suchen sich die Molekeln so zu drehen, daß ihre Ströme, vom Südpol aus gesehen, wie der Uhrzeiger kreisen. Die Gesamtwirkung ist dann dieselbe, als ob ein einziger Strom solenoidartig den Magneten umfließt.

Nach dieser Ansicht ziehen sich die gegeneinander gehaltenen, entgegengesetzten Pole zweier Magnete an, weil in ihnen die Ströme gleiche Richtung haben; die gegeneinander gehaltenen, gleichnamigen Pole stoßen sich ab, weil ihre Ströme entgegengesetzte Richtungen haben.

Auch den Erdmagnetismus kann man sich als Wirkung eines um die Erde kreisenden elektrischen Stromes denken. Da der magnetische



§ 315.

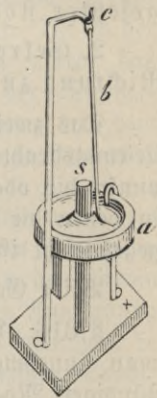
Südpol der Erde im Norden liegt, so würde dieser Strom von Osten nach Westen fließen.

§ 317. § 317. **Rotation beweglicher Magnete und Ströme.** Die magnetischen Kraftlinien eines geraden Stromleiters sind konzentrische Kreise (s. § 281). Könnte man einen einzelnen Magnetpol in die Nähe eines geradlinigen Stromes bringen, so müßte sich der Pol in einem Kreise um den Leiter drehen. Die Drehungsrichtung eines Nordpols würde der linke Arm der Ampèreschen Figur und die Drehungsrichtung des Stromes um den Nordpol würde der rechte Arm angeben.

Faraday erzielte solche Drehungen, indem er den Strom nahe an dem einen Pole eines Magneten vorbeiführte.

a (Fig. 376) ist ein kreisrundes, hölzernes, mit Quecksilber gefülltes Näpfschen, dessen Mitte einen aufrecht stehenden Magneten (s) trägt, b ist ein Kupferdraht, der in dem Haken c senkrecht über dem Magneten hängt und mit einer Platinspitze in das Quecksilber taucht. Leitet man nun einen Strom durch b, indem man den positiven Poldraht mit dem Quecksilber, den negativen mit dem Haken c in Verbindung setzt, so dreht sich der Draht b um den Magneten, und zwar, wenn der Südpol desselben oben steht, in der Richtung von Süd nach West, Nord, Ost. Der ausgestreckte linke Arm der in b aufrecht stehenden und nach s blickenden Figur zeigt die Drehungsrichtung des Stromes.

Fig. 376.



§ 318. § 318. **Größe der elektromagnetischen Kräfte.**

Ein Kreisstrom von i elektromagnetischen Einheiten übt auf einen Magnetpol von der Stärke m eine Kraft von $\frac{2\pi im}{r}$

Dyn senkrecht zur Stromebene aus, wenn der Radius des Kreises r cm beträgt und der Pol sich im Mittelpunkte befindet (§ 284).

Denken wir uns den Stromleiter in $\frac{2r\pi}{\lambda}$ Bogenelemente von der Länge

λ cm zerlegt und die Kraft durch die Summe der $\frac{2r\pi}{\lambda}$ gleichen Kräfte k

hervorgerufen, mit der jedes einzelne Element auf m wirkt, so muß $k = \frac{2\pi im}{r} \cdot \frac{2r\pi}{\lambda} = \frac{m}{r^2} i \lambda$ Dyn sein. Ebenso groß, doch entgegengesetzt gerichtet,

ist nach dem Gesetz von der Aktion und Reaktion auch die Kraft, die der Pol m auf ein Stromelement ausübt. Da in jedem Punkte eines solchen

Elements das durch den Pol erregte Kraftfeld die Stärke $F = \frac{m}{r^2}$ besitzt,

so folgt $k = Fi \lambda$ Dyn.

Die von den Stromelementen geschnittenen Kraftlinien des Poles m sind radial gerichtet, also senkrecht zu den Stromelementen. Nehmen wir λ

genügend klein an, so können wir ferner das Magnetfeld in der Umgebung eines Elements als homogen ansehen.

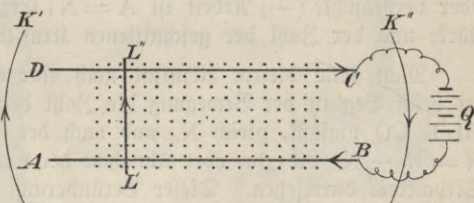
Die gleichen physikalischen Bedingungen sind erfüllt für einen geraden stromführenden Draht, der sich senkrecht zur Kraftlinienrichtung in einem ausgedehnten homogenen Magnetfeld befindet. Deshalb muß auch in diesem Falle das Feld eine Kraft $k = Fi\lambda$ Dyn auf den Stromleiter ausüben, die senkrecht zur Feld- und Stromrichtung ist.

Mit einer nicht zu unempfindlichen Wage läßt sich die elektrodynamische Wirkung des homogenen Magnetfeldes der Erde nachweisen. Legt man einen geraden, etwa 100 cm langen Kupferdraht senkrecht zum magnetischen Meridian auf die eine Wagschale und führt ihm, nachdem Gleichgewicht hergestellt ist, durch ein Bündel Kamettafäden einen Strom von einer elektromagnetischen Einheit (10 Ampère) zu, so ist die auf ihn in vertikaler Richtung wirkende Kraft $k = 100 H$ Dyn, wo H die horizontale Intensität des Erdmagnetismus bezeichnet, die hier allein in Betracht kommt, für $H = 0,2$ [CGS] ist $k = 20$ Dyn. Je nach der Stromrichtung äußert sich diese Kraft als eine scheinbare Zu- oder Abnahme des Kupferdrahtgewichtes um etwa 2 Zentigramm.

Ein angenähert homogenes Magnetfeld läßt sich künstlich erzeugen, wenn man einen hufeisenförmigen Elektromagneten mit passenden Polschuhen ver-
sieht. Sind diese vertikal

übereinander angeordnet, so sind auch die zwischen ihnen liegenden Kraftlinien vertikal gerichtet. In der Fig. 377 sollen sie von vorn nach hinten verlaufen, eine Magnetnadel würde also mit ihrem Nordpol vom Beschauer wegzeigen. Zeichnerisch sind die Kraft-

Fig. 377.



linien durch die Punkte dargestellt, in denen sie die Papierebene durchsetzen. AB und CD sind zwei horizontal und parallel im Abstande von λ cm befestigte Messingrohre. Sie werden überbrückt durch ein kurzes Metallrohr $L'L''$, das auf ihnen wie auf Schienen rollen kann. Ihre Enden B und C sind mit der Stromquelle Q verbunden. Sobald wir den Strom schließen, rollt bei der durch Pfeile angegebenen Stromrichtung $L'L''$ von rechts nach links. Dies ließ sich voraussehen. Denn denken wir uns das homogene Magnetfeld durch einen sehr großen Kreisstrom in seiner Mitte erzeugt, der in der Figur durch die Kreisbogen K' und K'' angedeutet ist, so muß dieser Strom im Sinne der Uhrzeigerbewegung fließen (s. Fig. 341). Von K' wird $L'L''$ bei der gezeichneten Stromrichtung angezogen, von K'' abgestoßen, deshalb bewegt sich $L'L''$ von rechts nach links.

Rehrt man entweder die Richtung des Stromes oder die des Magnetfeldes um, so rollt das Rohr $L'L''$ von links nach rechts. In jedem Falle läßt sich die Bewegungsrichtung nach der sogenannten linken Handregel (vgl. § 280) feststellen:

Man lege die **linke Hand** so auf den beweglichen Leiter, daß die vom Nordpol ausgehenden Kraftlinien zuerst die **Sinnenfläche** treffen und die ausgestreckten Finger die **Strom-**

richtung angeben, dann zeigt der Daumen die Bewegungsrichtung an.

Verschieben wir das Leiterstück $L'L''$ s cm der Kraft k entgegen, so leisten wir dabei die Arbeit $A = ks = F\lambda s$ Erg. Die gleiche Arbeit leistet die elektromagnetische Kraft, wenn sie $L'L''$ um s cm bewegt. Im ersten Falle wird Arbeit verbraucht, im zweiten Arbeit gewonnen.

Der Größe $F\lambda s$ läßt sich eine sehr anschauliche Bedeutung unterlegen, wenn man die Stärke des Magnetfeldes an irgend einer Stelle durch die Anzahl der Kraftlinien mißt, die 1 qcm der zugehörigen Potentialfläche an dieser Stelle treffen. Ein Blick auf ein Kraftlinienbild, das vermittelt Eisenfeilspäne erhalten worden ist, zeigt, daß die Kraftlinien sich dort am dichtesten zusammendrängen, wo die Feldstärke am größten ist, und umgekehrt. Man hat nun willkürlich festgesetzt: 1 qcm einer Niveauläche wird von F Kraftlinien durchsetzt, wenn die Feldstärke F Dyn beträgt.

Bei obiger Versuchsanordnung überstreicht der Leiter $L'L''$, wenn er in der Richtung der elektromagnetischen Kraft oder entgegengesetzt um s cm bewegt wird, eine Fläche von λs qcm, die senkrecht zu den Kraftlinien liegt. Er durchschneidet also $N = F\lambda s$ Kraftlinien. Die hierbei gewonnene (+) oder verbrauchte (-) Arbeit ist $A = Ni$ Erg, d. h. proportional der Stromstärke und der Zahl der geschnittenen Kraftlinien.

Man kann diesem Resultat noch eine etwas andere Form geben. Es sei beim Beginn der Bewegung die Zahl der Kraftlinien, die der Stromkreis $BL'L''CQ$ umfaßt, gleich N_0 und nach der Verschiebung gleich N_t , dann ist $N = N_t - N_0$, die Zu- oder Abnahme der Kraftlinienzahl, die den geschlossenen Stromkreis durchsetzen. Dieser Veränderung der Kraftlinienzahl ist demnach die Arbeit der elektromagnetischen Kraft proportional.

3. Induktion.

§ 319. § 319. Entstehung von Induktionsströmen. Im Tagebuch Faradays findet sich bereits aus dem Jahre 1822 die Bemerkung: Verwandle Magnetismus in Elektrizität. Dieses Ziel verlor Faraday

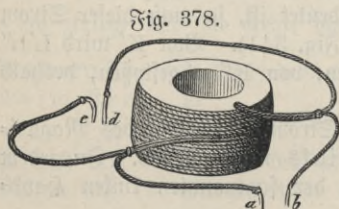


Fig. 378.

seitdem nicht mehr aus den Augen. Seine hierauf bezüglichen Entdeckungen fallen aber erst in das Jahr 1831. Sie bilden den Kern eines neuen, großen Kapitels der Elektrizitätslehre. Auf ihnen beruhen die glänzenden Ergebnisse der heutigen Elektrotechnik.

Wir besprechen zunächst die experimentell von Faraday festgestellten Tatsachen.

1. a) Zwei voneinander isolierte, etwa 10—20 m lange Drähte ab und cd (Fig. 378) sind gleichlaufend in Kreisen zu einer Spule aufgewickelt.

Es genügt ein Bündel der in der Telephonie benutzten Doppelleitungsdrähte. Die Enden a und b werden mit einem empfindlichen Galvanometer, c und d unter Zwischenschaltung eines Unterbrechers und eines Rheostaten mit den Polen einer Batterie verbunden. Im Augenblick des Stromschlusses schlägt die Galvanometernadel aus, macht einige Schwingungen und kehrt wieder in ihre natürliche Lage zurück. Aus der Richtung des Ausschlags erkennt man, daß ein Stromstoß, entgegengesetzt dem Hauptstrom, durch den Nebendraht ab gegangen ist. Unterbricht man den Hauptstrom, so schlägt die Nadel sofort nach der anderen Seite aus, zeigt also einen gleichgerichteten Stromstoß an.

Es ist übrigens nicht nötig, den Hauptstrom vollständig zu unterbrechen. Man erhält entsprechende Stromstöße in ab, allerdings von geringerer Stärke, durch plötzliches Ein- und Ausschalten von Widerstand in den Hauptstrom cd.

b) Dieselben Erscheinungen werden beobachtet, wenn zwei Drähte auf verschiedene Holzzylinder A und B (Fig. 379) aufgewickelt sind und der

Fig. 379.

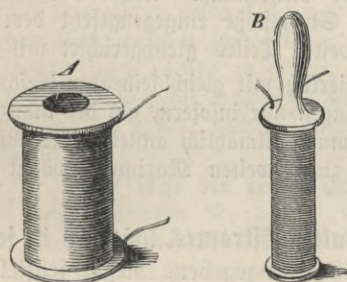
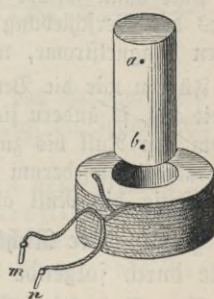


Fig. 380.



eine B, durch den der Batteriestrom fließt, rasch in die Hohlung des anderen A geschoben oder daraus entfernt wird. Dabei bringt das Hineinschieben dieselbe Wirkung hervor wie im vorigen Versuch das Schließen des Hauptstromes, das Herausziehen dieselbe wie das Unterbrechen. B heißt die primäre oder induzierende, A die sekundäre oder Induktionsspule, die erzeugten Stromstöße werden Induktionsströme genannt.

2. Auch der um einen Magneten kreisende, fingierte Strom (§ 316) kann Stromstöße induzieren.

a) Verbindet man die beiden Enden m und n einer Drahtspirale (Fig. 380) mit einem Galvanometer und schiebt das eine Ende des Magnetstabes ab in die Hohlung, so zeigt die Galvanometernadel einen Induktionsstrom an, der entgegengesetzt gerichtet ist wie der um den Magneten kreisende, fingierte Strom. Sobald man den Magneten herauszieht, weicht die Nadel nach der anderen Seite ab. In jedem Falle kehrt sie nach einigen Schwingungen in ihre natürliche Lage zurück.

b) Die gleichen Erscheinungen treten ein, wenn man einen Stab aus weichem Eisen in die Hohlung der Spirale bringt und in dem Stabe

Magnetismus bald hervorrufen, bald wieder verschwinden läßt, indem man einen Magnetpol dem einen Stabende nähert und wieder von ihm entfernt.

c) Wir senken den Magnetstab ab in die Spirale und warten, bis die Galvanometernadel zur Ruhe gekommen ist. Nähern wir hierauf dem einen Pol des Stabes einen Anker oder ein Blech aus weichem Eisen, so zeigt das Galvanometer wieder einen Induktionsstrom an, der mit dem durch das Einsenken des Magneten erzeugten gleiche Richtung hat. Beim Entfernen des Ankers entsteht ein entgegengesetzter Stromstoß.

d) Wir benutzen eine schmale Spirale, die nur einen geringen Teil des Magneten umschließt. Nähern wir sie ruckweise dem einen Pol eines Magnetstabes, dessen Achse senkrecht zur Mitte der Windungsebene liegt, so nehmen die erzeugten Induktionsströme an Intensität zu, erreichen ein Maximum, wenn die Spirale über den Pol wandert, und nehmen dann bei weiterer Verschiebung bis zur Indifferenzstelle an Stärke bis Null ab. Setzt man die ruckweise Bewegung über diese Stelle hinaus nach dem anderen Pole hin fort, so kehrt sich die Stromrichtung um, die Stromstärke wächst, wird ein Maximum, wenn die Spirale über den zweiten Pol geht, und sinkt dann wieder mit zunehmender Entfernung. Während des ersten Theiles der Verschiebung verlaufen die Stromstöße entgegengesetzt dem sinnigerten Magnetstrom, während des zweiten Theiles gleichgerichtet mit ihm.

Führen wir die Bewegung kontinuierlich mit gleichbleibender Geschwindigkeit aus, so ändern sich die Erscheinungen nur insofern, als der induzierte Strom von Null bis zum ersten Maximum allmählich ansteigt, hierauf bis Null abfällt, wiederum von Null bis zum zweiten Maximum wächst und dann stetig bis Null abnimmt.

§ 320. § 320. Die Richtung des Induktionsstromes läßt sich in jedem Falle durch folgende von Lenz (1834) angegebene Regel feststellen:

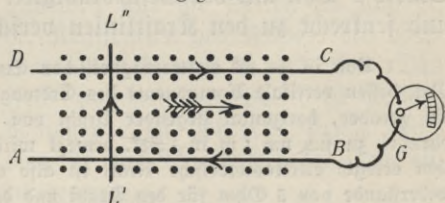
Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er die ihn erzeugende Bewegung zu hemmen sucht.

Diese Regel ergibt sich aus den elektrodynamischen Gesetzen (§ 315) und den in § 319 besprochenen Versuchen. Da durch Annäherung eines geschlossenen Leiters an einen stromdurchflossenen Draht oder einen Magneten ein Strom von entgegengesetzter Richtung induziert wird, so suchen sich der primäre und der sekundäre Strom abzustößen und wirken deshalb hemmend auf die ursprüngliche Bewegung. Entsteht der sekundäre Strom durch Entfernung von dem primären, so sind beide Ströme gleichgerichtet, insoledessen ziehen sie sich an, und die erzeugende Bewegung erfährt eine Hemmung. Ruft man durch Schließen und Öffnen eines Stromkreises in einem benachbarten Leiter Induktionsströme hervor, so wirkt das Schließen genau so, als ob man die primäre Spule gleichsam aus dem Unendlichen in einem Augenblick an die sekundäre heranbewegt hätte, das Öffnen wie ein momentanes Entfernen bis ins Unendliche. Im ersten Falle sind die Ströme entgegengesetzt, im zweiten gleichgerichtet. Es bestätigt sich also auch hier die Lenz'sche Regel.

§ 321. **Elektromotorische Kraft des Induktionsstromes.** Wenn § 321. ein elektrischer Strom auf irgend eine in § 319 angegebene Art erzeugt wird, so können wir annehmen, daß in sehr vielen Punkten des Leiterkreises Kräfte erregt werden, die das Strömen elektrischer Ladungen in der einen oder der entgegengesetzten Richtung veranlassen. Die algebraische Wirkungssumme dieser Kräfte nennt man die elektromotorische Kraft des Induktionsstromes (vgl. § 275).

Um das Gesetz kennen zu lernen, das für die Größe der induzierten elektromotorischen Kräfte maßgebend ist, empfiehlt sich eine möglichst leicht zu übersehende Versuchsanordnung. Wir benutzen die in § 318 beschriebene, verbinden aber die Leiterenden B

Fig. 381.



und C nicht mit einer Stromquelle, sondern einem Galvanometer G (Fig. 381). Die Kraftlinien des homogenen Magnetfeldes sollen wieder von vorn nach hinten verlaufen. Verschieben wir den beweglichen Leiter L'L'' auf den Schienen AB und CD von links nach rechts in der Pfeilrichtung, so zeigt während der Bewegung das Galvanometer einen Strom an, der von L' nach L'' abfließt. Hieraus folgt die sogenannte rechte Handregel:

Man lege **die rechte Hand** so auf den beweglichen Leiter, daß die vom Nordpol ausgehenden Kraftlinien zuerst die Innenfläche treffen und der Daumen die Bewegungsrichtung angibt, dann zeigen die ausgestreckten Finger die Richtung des Induktionsstromes an.

Diese Regel wird bestätigt, wenn man entweder die Richtung der Bewegung oder die des Magnetfeldes umkehrt.

Fließt durch den geschlossenen Leiterkreis ein Strom von L' nach L'', so übt nach § 318 das Magnetfeld eine Kraft aus, die das bewegliche Leiterstück L'L'' von rechts nach links treiben würde. Um einen Strom in der Richtung L'L'' zu induzieren, muß man den Leiter von links nach rechts verschieben, also der entstehenden elektromagnetischen Kraft entgegen. Dabei leistet man eine Arbeit von $Filv$ Sekunden-Erg, wenn F die Feldstärke in Dyn, i die Stromstärke in elektromagn. Einh., l den Schienenabstand in cm und v die Geschwindigkeit [cm sec⁻¹] der als gleichförmig vorausgesetzten Bewegung bezeichnet (§ 318). Beträgt die induzierte elektromotorische Kraft e elektromagn. Einh., so ist ei Sekunden-Erg (§ 296) die Arbeitsfähigkeit des Induktionsstromes, von der im vorliegenden Falle ein kleiner Teil zur Ablenkung der Galvanometernadel verwendet wird, während der Rest die Leitung erwärmt. Nach dem Energieprinzip ist für diese Leistung ein gleich großer Arbeitsaufwand nötig. Da der Strom lediglich durch die Bewegung im Magnetfelde zustande kommt, die den Arbeitsaufwand von $Filv$ Sekunden-Erg erfordert, so folgt $ei = Filv$, also $e = Flv =$ der Kraftlinienanzahl N , die der bewegliche Leiter L'L'' in 1 Sek. durchschneidet.

Nehmen wir an, daß die Fläche $L'BGCL''$ in einem bestimmten Augenblick von N_0 Kraftlinien und t Sek. später von N_t durchsetzt wird, dann gibt $N = \frac{N_t - N_0}{t}$ die Zu- oder Abnahme der Kraftlinienzahl in 1 Sek. an, die der geschlossene Leiterkreis umfaßt. Die Änderung dieser Kraftlinienzahl in der Zeiteinheit ist also maßgebend für die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft.

Für $F = 1$ Dyn, $\lambda = 1$ cm, $v = 1$ [cm sec⁻¹] ist auch $e = 1$. Hiernach wird die elektromagnetische Einheit der elektromotorischen Kraft z. B. erzeugt, wenn man einen zu den Kraftlinien senkrechten geraden Leiter von 1 cm Länge in einem homogenen Magnetfeld von der Stärke 1 Dyn mit der Geschwindigkeit 1 [cm sec⁻¹] sich selbst parallel und senkrecht zu den Kraftlinien verschiebt.

1 Volt ist = 10^8 elektromagnetischen Einheiten (vgl. § 291 u. 296). An einem Ort, dessen vertikale Komponente des Erdmagnetismus $0,41$ [CGS] beträgt, schneidet ein gerader, horizontal liegender Draht von 1 m Länge, wenn er horizontal und parallel zu sich um 1 m in 1 Sek. bewegt wird, $N = 0,41 \cdot 10^4$ Kraftlinien, die in ihm erregte elektromotorische Kraft ist also $0,41 \cdot 10^{-4}$ Volt. Bei einem Gesamtwiderstande von 5 Ohm für den Draht und das angeschlossene Galvanometer ergibt sich mithin eine Stromstärke von 8 Milliontel Ampère.

Man kann obigen Versuch in mannigfacher Weise abändern, indem man den Gleitschienen AB und CD verschiedene Lagen zur Feldrichtung gibt, man kann ferner den Abstand von AB und CD oder die Länge des Verschiebungsweges vergrößern oder verkleinern, man kann endlich das Gleitstück $L'L''$ um eine zur Leiterfläche vertikale Achse drehen. In allen Fällen zeigt sich:

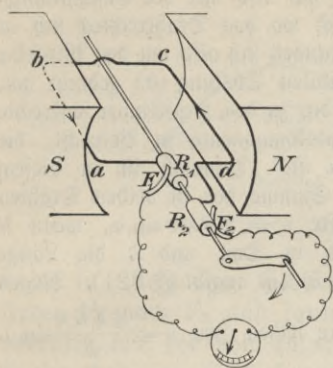
Der absolute Wert der induzierten elektromotorischen Kraft hängt allein ab von der in 1 Sek. erfolgenden Änderung der Kraftlinienzahl, die den Leiterkreis durchsetzt.

Dieses Resultat wurde unter der Voraussetzung abgeleitet, daß ein gerader Leiter in einem homogenen Magnetfeld gleichförmig fortschreitend bewegt wird. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, dann bleiben die Größen e und i nicht mehr konstant. Für einen bestimmten Augenblick der Bewegung gilt dann die Gleichung $e = \frac{dN}{dt}$, wo dN die Veränderung der Kraftlinienzahl während des unendlich kleinen Zeitelements dt bedeutet. Während der endlichen Bewegungsdauer t stellt $e_m = \frac{N_t - N_0}{t}$ die konstante mittlere elektromotorische Kraft dar, die in t Sek. die gleiche Ladung durch den Leiterkreis treiben würde wie die veränderliche Kraft e .

Um an einem einfachen Beispiel zu zeigen, wie sich die veränderlichen Größen e und i bestimmen lassen, wählen wir folgenden für die Theorie der Dynamomaschinen grundlegenden Versuch.

§ 322. Das Faradaysche Modell. Zwischen den zylinderförmig § 322. ausgeschnittenen Polschuhen N und S eines kräftigen Magneten

Fig. 382.



kann das Drahtrechteck $abcd$ (Fig. 382) um eine horizontale Achse durch eine Kurbel bewegt werden. Jedes Drahtende ist an einem von zwei Metallringen, R_1 und R_2 , angelötet, die isoliert auf der Achse festzigen. Auf den Ringen schleifen die Federn F_1 und F_2 . Der diese verbindende Draht schließt den Stromkreis. Bei der Rotation schneiden nur die Seiten ab und cd die Kraftlinien des Feldes, die horizontal von N nach S verlaufen. Das Feld zwischen den Polen ist nahezu homogen. In höherem Grade trifft dies für das Magnetfeld der Erde zu,

das Faraday bei seinen Versuchen benutzte.

Das Rechteck soll im Sinne der Uhrzeigerbewegung rotieren, wie der Pfeil an der Kurbel angibt. Passiert es eine der beiden vertikalen Lagen, so bewegen sich die Drähte ab und cd parallel den Kraftlinien, es kann also in ihnen kein Strom erregt werden. Beim Durchgang durch eine der beiden horizontalen Lagen werden die Kraftlinien senkrecht geschnitten, der induzierte Strom erreicht deshalb in diesem Augenblick einen größten Wert. Nach der Handregel (§ 321) muß er bei der in der Figur gezeichneten Stellung in ab von hinten nach vorn, in cd von vorn nach hinten fließen. Die in beiden Drähten erregten elektromotorischen Kräfte addieren sich also, sie wirken gerade so, als ob zwei Elemente hintereinander geschaltet wären. Hat das Rechteck sich aus der gezeichneten Stellung um 180° gedreht, so ist wiederum der induzierte Strom ein Maximum, er fließt aber nun in ab von vorn nach hinten, in cd von hinten nach vorn, also umgekehrt wie vorher. In den Zwischenlagen ist der Strom um so schwächer, je mehr sich das Rechteck der vertikalen Stellung nähert, denn in diesem Falle werden die Kraftlinien unter Winkeln geschnitten, die nur wenig von 0° oder 180° abweichen. Die Stromrichtung kehrt sich bei jeder Umdrehung zweimal um, nämlich dann, wenn das Rechteck vertikal steht. Gleichzeitig wechselt der von den Federn F_1 und F_2 abgenommene Strom im Schließungsdraht die Richtung. Man nennt ihn deshalb einen Wechselstrom.

Die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft und Stromstärke ändert sich in jedem Augenblick. Das Gesetz, nach dem dies geschieht, kann man aus der Fig. 383 ableiten, die einen zur Drehachse senkrechten Schnitt

der Spule des Faradayschen Modells darstellt. Mit $O, P, 1$ sind die Querschnitte der wirksamen Drähte ab und cd in drei verschiedenen Lagen der Spule bezeichnet, die mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit ω (§ 41) im Sinne des Pfeiles rotiert. Jeder Punkt der Drähte ab und cd beschreibt dabei einen Kreis vom Radius r cm, bewegt sich also mit der Geschwindigkeit $v = r\omega$ [cm sec⁻¹]. In dem Augenblick, wo das Drahtrechteck sich in der Lage P befindet, sich also um den Winkel α aus der vertikalen Stellung (O) gedreht hat, kommt allein die zu den Kraftlinien senkrechte Geschwindigkeitskomponente in Betracht, die gleich $v \sin \alpha$ ist. Demnach ist in diesem Moment die Summe der in beiden Drähten erregten Kräfte $e = 2F\lambda v \sin \alpha$, wenn F die Feldstärke in Dyn und λ die Länge jedes Drahtes in cm angibt (§ 321). Wegen

$$i = \frac{e}{w} \text{ ist zur selben Zeit } i = \frac{2F\lambda v}{w} \sin \alpha.$$

Die Größen e und i sind also im vorliegenden Falle proportional $\sin \alpha$, sie stimmen, wie man sagt, in der Phase überein. Für $\alpha = 0$ oder π sind e und i Null und wechseln das Vorzeichen. Den größten Wert erlangen e und i für $\alpha = \frac{\pi}{2}$

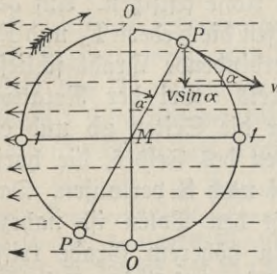
und $\frac{3\pi}{2}$, nämlich $E = 2F\lambda v$ und $J = \frac{2F\lambda v}{w}$. Hiernach ist $e = E \sin \alpha$ und $i = J \sin \alpha$.

Man erhält e und i als Funktionen der Zeit t , in der sich die Spule um den Winkel α dreht, wenn man $\alpha = \omega t$ setzt. Es ist dann $e = E \sin \omega t$ und $i = J \sin \omega t$. In Fig. 384 sind für eine Umdrehung die Sinuskurven von e und i gezeichnet.

Macht die Spule n Umdrehungen in 1 Sek., also 1 Umdrehung in $T = \frac{1}{n}$ Sek., so kehrt stets die gleiche Phase nach T Sek. wieder, und es ist T die Dauer einer Periode und n die Periodenzahl in 1 Sek., die man auch als Frequenz des Wechselstromes bezeichnet, während $2n$ die Wechselzahl in einer Sek. angibt.

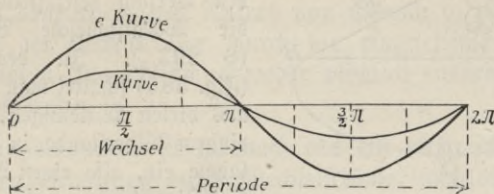
Die mittlere elektromotorische Kraft während einer Drehung um den Winkel π aus der vertikalen Stellung (O) ist $e_m = (N_\pi - N_0) : \frac{1}{2} T$ (§ 321). Für N_0 haben wir die Kraftlinienzahl $F \cdot 2r\lambda$ zu setzen, die die Spulensfläche in der Stellung (O) einschließt. Nach einer Drehung um den Winkel π ist diese Zahl $N_\pi = -F \cdot 2r\lambda$, denn die Spule hat dann ihre Seiten in bezug auf den Eintritt der Kraftlinien vertauscht. Es ist also der absolute Wert von $e_m = 2F \cdot 2r\lambda : \frac{1}{2} T = 4F\lambda v : \pi$ und, wenn wir $2F\lambda v$ durch E ersetzen, $e_m = \frac{2}{\pi} E$. Für die mittlere Stromstärke folgt hieraus $i_m = \frac{2}{\pi} J$.

Fig. 383.



Befestigt man auf der Achse statt der beiden geschlossenen Metallringe R_1 und R_2 (Fig. 382) zwei voneinander isolierte Halbringe (Fig. 385), die mit den Drahtenden des Rechtecks verbunden

Fig. 384.



sind, so fließt im Schließungsdraht der Strom stets von der Feder F_1 nach F_2 und kann nun dauernd dieselben Wirkungen hervorrufen wie der von galvanischen Elementen erzeugte Strom. Die Kurve des im Schließungsdraht pulsierenden Gleichstroms ist in Fig. 385 a gezeichnet.

Fig. 385.

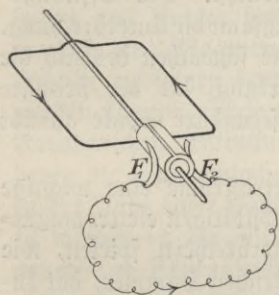
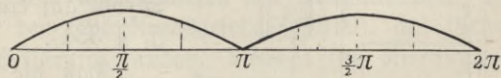


Fig. 385 a.

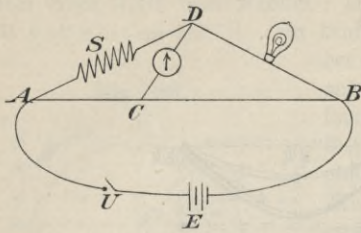


§ 323. **Selbstinduktion.** Durch Schließen und Öffnen eines Stromes oder auch durch die Zu- und Abnahme seiner Stärke werden nicht nur in einem zweiten benachbarten Draht Ströme erregt, der primäre Strom wirkt auch auf den eigenen Leiter induzierend, und zwar um so stärker, in je mehr Windungen dieser aufgewickelt ist. Man bezeichnet die Erscheinung als Selbstinduktion und die induzierten Ströme als Extrastrome.

Schließt man ein Element durch einen kurzen Draht, so erhält man bei der Unterbrechung nur einen winzigen Funken, und wenn man gleichzeitig mit jeder Hand eins der beiden Enden des Verbindungsdrahtes berührt, so merkt man keinen Schlag. Der Funken wird aber beträchtlich größer, wenn man zwischen die Pole eine Spirale aus vielen Drahtwindungen einschaltet, und bei Berührung der Enden der Spule fühlt man einen Schlag, so oft

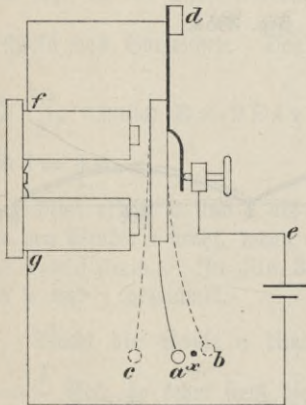
der Strom unterbrochen wird. Der Schließungs-*extra*strom ruft diese physiologische Wirkung nicht hervor, da der größte Teil durch die Spule abfließt.

Fig. 386.



Kontakt *C* auf *AB*, bis das Galvanometer stromlos ist. Unterbricht man bei *U* den Strom der Batterie *E*, so zeigt der Nadelauschlag, daß ein dem primären Strom gleichgerichteter Stromstoß die Spirale durchläuft, beim Schließen ein entgegengesetzter. Diese Wirkungen werden beträchtlich verstärkt, wenn die Spule einen Eisenkern enthält.

Fig. 387.



Der Schließungs-*extra*strom verhindert, daß der Hauptstrom sofort auf seine volle Stärke anwächst. Der Öffnungs-*extra*strom verlangsamt die Unterbrechung. Beide *Extra*ströme schwächen deshalb die induzierende Wirkung, die der primäre Strom auf eine sekundäre Spule ausübt (s. § 331).

Daß die *Extra*ströme eine wichtige Rolle bei allen selbsttätigen elektromagnetischen Stromunterbrechern spielen, wie z. B. dem Wagnerschen Hammer, hat zuerst Rayleigh (1877) bemerkt. Beobachtet man den schwingenden Anker eines Klingelapparates (Fig. 387), so überzeugt

man sich bald, daß der Elektromagnet nichts zu der fortdauernden Bewegung beitragen könnte, wenn der Hauptstrom allein wirksam wäre. Denn dann würde der Elektromagnet den Anker nur so lange anziehen, als der Strom geschlossen ist, also nur während der Bewegung des Klöppels von *a* nach *b* und von *b* zurück nach *a*. In jedem beliebigen Punkte *x* dieser Bahn müßte die anziehende Kraft des Elektromagneten auf den Anker beim Hingange nach *b* gerade so groß sein wie beim Rückgange nach *a*. Im ersten Falle wird die Bewegung verzögert, im zweiten um gleichviel beschleunigt. Die Gesamtwirkung des Elektromagneten wäre also Null, und der Anker müßte nach kurzer Zeit wegen der Reibungswiderstände zur Ruhe kommen. Daß dies tatsächlich nicht eintritt, hat zwei Ursachen: daß

magnetische Verhalten der Eisenkerne und die Entstehung der Extraströme. Der dem Hauptstrom entgegengerichtete Schließungsextrastrom verringert die hemmende Wirkung des Elektromagneten auf dem Wege von a nach b, der gleichgerichtete Öffnungsextrastrom vergrößert während der allerdings sehr kurzen Dauer des Öffnungsfunkens die günstige Wirkung auf dem Wege des Ankers von a nach c. Unterstützt wird der Einfluß der Extraströme durch die magnetische Trägheit der Eisenkerne, deren Magnetismus weder plötzlich entsteht, noch augenblicklich verschwindet.

Ein Klingelapparat ist hiernach als ein elektrischer Motor anzusehen, dessen Bewegung durch Wechselströme, nämlich die der Richtung nach entgegengesetzten Extraströme, unterhalten wird¹⁾.

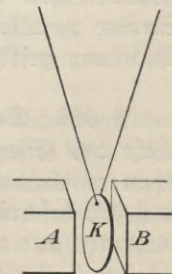
Man kann das Vorhandensein der Öffnungsextraströme sehr fühlbar nachweisen, wenn man an zwei Punkten d und e oder auch f und g Drähte befestigt, die mit metallischen Handhaben versehen sind, wie sie bei den Induktionsapparaten benutzt werden. Faßt man die Handhaben an, so erhält man kräftige Erschütterungen.

§ 324. **Foucault'sche Ströme.** Arago hatte im Jahre 1824 beobachtet, daß die Schwingungen einer Kompaßnadel, deren Buffolenboden aus Kupfer bestand, stark gedämpft wurden. Umgekehrt fand er, daß eine Magnetnadel, unter der eine Kupferscheibe rotierte, der Scheibe zu folgen suchte und so in eine drehende Bewegung versetzt werden konnte. Diese Erscheinungen bildeten den Ausgangspunkt der Faradayschen Entdeckung der Induktionsgesetze (§ 319), auf Grund deren sie eine einfache Erklärung fanden. Bewegt sich ein Magnet in der Nähe einer Metallmasse oder diese in der Nähe eines Magneten, so werden in ihr wirbelartig verlaufende Ströme induziert, die sogenannten Foucault'schen Ströme, die nach der Lenz'schen Regel die Bewegung zu hemmen suchen.

Hängt man z. B. eine Kupferscheibe K (Fig. 388) an zwei Fäden auf und läßt sie zwischen den Polen A und B eines zunächst nicht erregten Elektromagneten hin und her pendeln, so kommt sie fast augenblicklich zwischen den Polen zur Ruhe, sobald man den Strom des Elektromagneten schließt. Führt man sie wie eine Säge zwischen den Polen hin und her, so bemerkt man einen deutlichen Widerstand, als ob die Scheibe sich in einer zähen Flüssigkeit befände.

Da die in einer ausgedehnten Metallmasse entstehenden Induktionsströme einen sehr geringen Widerstand erfahren, so können sie eine bedeutende Stärke erreichen

Fig. 388.



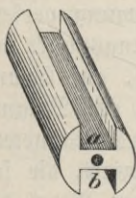
¹⁾ Dvorák: Zeitschrift f. Instrumentenkunde. Jahrg. 10, Seite 43, u. Jahrg. 11, Seite 423. Koppe: Postesche Zeitschrift. Jahrg. 2, Seite 232.

und eine sehr auffällige Erwärmung veranlassen. Ein zum Teil ausgebohrter Kupferzylinder, der vermittelt einer Zentrifugalmaschine zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten in rasche Rotation versetzt wird, erhitzt sich in wenigen Minuten so stark, daß eine die Höhlung fast ausfüllende Masse aus Woodschem Metall geschmolzen wird.

§ 325. § 325. **Siemensscher Doppel-T-Anker.** Eine Vermehrung der Windungen bei dem Faradayschen Modell (§ 322) bewirkt eine proportionale Steigerung der elektromotorischen Kraft der induzierten Ströme (§ 321). Die Leistungsfähigkeit läßt sich ferner dadurch erhöhen, daß man die Drähte isoliert auf einen eisernen Anker aufwickelt. Da die Kraftlinien im Eisen einen etwa 800 mal kleineren Widerstand erfahren als in Luft, so wächst dementsprechend die Stärke des Magnetfeldes, in dem der Anker rotiert, und damit bei gleicher Geschwindigkeit die elektromotorische Kraft und Stärke der Ströme.

Die von W. Siemens im Jahre 1857 konstruierte magnet-

Fig. 389.



elektrische Maschine besitzt einen Doppel-T-Anker, so genannt wegen der Querschnittsform des Eisenzylinders, in den längs der Achse zwei sich gegenüberliegende Nuten a und b (Fig. 389) tief eingeschnitten sind. Diese werden durch die Wicklung ausgefüllt. Das Magnetfeld wird durch eine Anzahl nebeneinandergestellter Stahlmagnete von Hufeisenform hervorgerufen, zwischen deren zylindrisch ausgebohrten Polen der Anker sich drehen kann. Wie bei dem Faradayschen Modell sind nur die Drahtteile der Spule wirksam, die parallel der Achse liegen. Je nachdem die beiden Spulenenden mit zwei metallenen Vollringen (Fig. 382) oder zwei Halbringen (Fig. 385) verbunden sind, auf denen die stromabnehmenden Bürsten schleifen, liefert die Maschine Wechselstrom oder einen pulsierenden Gleichstrom.

Der Eisenkern ist nicht massiv, sondern besteht aus doppel-T-förmigen Eisenblechscheiben, die man durch Papier voneinander isoliert hat. Dadurch verhindert man die schädliche Bildung von Foucaultschen Strömen. In einem massiven Kern verlaufen diese Ströme parallel der Achse und erzeugen eine für die Isolation der Wicklung gefährliche Wärme.

§ 326. § 326. **Das dynamoelektrische Prinzip** beruht auf der Eigenschaft des Eisens, geringe Spuren von Magnetismus zu behalten, wenn es einmal magnetisch erregt worden ist. Ersetzt man bei der in § 325 beschriebenen Maschine die Stahlmagnete durch einen Elektromagneten und verbindet dessen Wicklung in geeigneter Weise mit den Bürsten (s. § 327), so entstehen bei Inangabe der Maschine in der

Ankerspule infolge des remanenten Magnetismus der Elektromagnetkerne anfangs sehr schwache Ströme. Diese, durch die angegebene Vorrichtung (Fig. 385) gleichgerichtet, durchfließen nun die Wicklung des Elektromagneten und verstärken dessen Magnetismus. Deshalb wächst auch die Stärke der Induktionsströme, und so findet, ähnlich wie bei der Holzschen Influenzmaschine (§ 249 und 250), eine Art von Multiplikation der Wirkung statt, bis in kurzer Zeit ein Maximum erreicht ist.

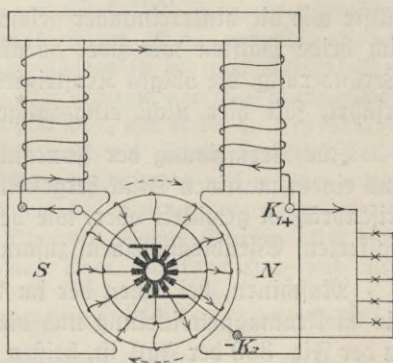
Für die Technik ist dieses von W. Siemens 1866 entdeckte Prinzip von weittragendster Bedeutung geworden. Da Eisen viel kräftiger magnetisch erregt werden kann als Stahl (s. § 234), so übertrifft die Leistungsfähigkeit einer Maschine, deren Feld durch Elektromagnete hervorgerufen wird, bei weitem die einer gleich großen Maschine mit Stahlmagneten.

In beiden Arten von Maschinen wird mechanische Arbeit in elektrische Energie umgewandelt, und insofern sind beide als Dynamomaschinen zu bezeichnen. Es ist aber üblich, nur die mit Elektromagneten ausgerüsteten Maschinen so zu nennen.

§ 327. Die Grammesche Gleichstrommaschine. Der Doppel- T -Anker hat den Nachteil, daß bei jeder Umdrehung die Stromstärke zweimal auf Null herabsinkt. Für gewisse Zwecke kann dies sehr störend sein. Beim Betriebe von Glühlampen z. B. würde die stoßweise Wirkung des Stromes ein fortwährendes Schwanken der Beleuchtungsstärke zur Folge haben, was auf die Dauer unerträglich wäre. Deshalb war es ein bedeutender technischer Fortschritt, als Gramme 1871 einen Anker erfand, der die Erzeugung fast konstanter Ströme ermöglichte.

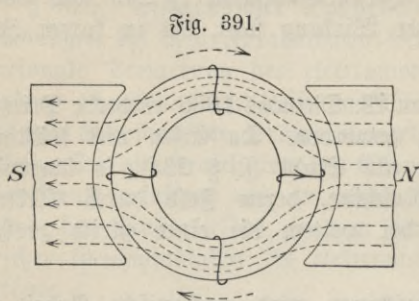
Wir haben die Grammesche Maschine bereits in § 313 beschrieben und ihre Verwendung als Elektromotor besprochen. Jeder Elektromotor kann auch umgekehrt dazu dienen, mechanische Energie in elektrische umzusetzen (s. Fig. 377 und 381). Wird der Ringanker (Fig. 390) zwischen den Polschuh N und S des Elektromagneten z. B. rechts herum gedreht, so entstehen in seinen Spulen Ströme, deren Richtung in der Figur durch Pfeile angegeben ist. Sie fließen sämtlich nach der oberen Bürste ab, durch-

Fig. 390.



laufen die Wicklung des Elektromagneten, treten bei K_1 in die äußere Leitung und gelangen über K_2 nach der unteren Bürste, wo sie sich in die rechte und linke Windungshälfte verzweigen.

Die Wirksamkeit der einzelnen Spulen läßt sich am einfachsten übersehen, wenn man sich durch ein Kraftlinienbild (Fig. 391) die



Veränderungen veranschaulicht, die ein eiserner Ring in einem homogenen Magnetfeld hervorruft. Da der Luftraum innerhalb des Ringes wegen der Schirmwirkung des Eisens (§ 229) so gut wie vollständig frei von Kraftlinien ist, so können in den nach innen gelegenen Windungsteilen keine Ströme

erregt werden. Auch die über die vordere und hintere Stirnfläche des Ringes geführten Drähte schneiden bei ihrer Bewegung keine Kraftlinien und tragen deshalb nichts zur Stromerzeugung bei. Wirksam sind nur die seitlichen, auf der Außenfläche des Ringes befindlichen Drähte. Sie werden in derselben Weise induziert wie die Drahtstücke ab und cd des Faradayschen Modells (§ 322). Die Ströme der linken Windungshälfte laufen deshalb von hinten nach vorn, die der rechten von vorn nach hinten. Während sich die elektromotorischen Kräfte in den Spulen jeder einzelnen Ringhälfte wie die hintereinander geschalteter Elemente addieren, verhalten sich beide Hälften wie zwei parallel verbundene Batterien. Auf die Veränderung, die obiges Kraftlinienbild durch die entstehenden Ströme erfährt, soll hier nicht eingegangen werden.

Zur Vermeidung der Foucault'schen Ströme wird der Ring nicht aus einem massiven Stück hergestellt, sondern entweder aus gefirnizten Eisendrähten gewickelt oder, wie beim Doppel-T-Anker (s. § 325), aus isolierten Eisenblechscheiben zusammengesetzt.

Maschinen, bei denen der im Anker erzeugte Strom nacheinander die Elektromagnetwicklung und die Außenleitung durchfließt, wie dies in der Fig. 390 der Fall ist, heißen Serien- oder Hauptschlußmaschinen. Sie werden aus naheliegenden Gründen nur dann angewendet, wenn der äußere Widerstand sich wenig während des Betriebes ändert. Trifft dies nicht zu, wie z. B. bei Beleuchtungsanlagen, so benutzt man Nebenschlußmaschinen. Bei diesen ist zur Erregung des Elektromagneten ein Teil (etwa 5—8%) des Ankerstromes von den Bürsten abgezweigt. Ein in den Nebenschluß eingeschalteter Rheostat gestattet die Stärke des Magnetfeldes innerhalb weiter Grenzen zu verändern

und so die Spannung an den Klemmen der Maschine konstant zu erhalten.

§ 328. **Übertragung elektrischer Energie.** Die elektrische Energie § 328. besitzt für die technische Verwendung zwei ausgezeichnete Eigenschaften: sie kann leicht in alle anderen Energieformen umgewandelt werden, sie läßt sich ferner sicher und einfach vermittelt Drähte auf große Entfernungen fortleiten. Wird in einem Orte A eine Dynamomaschine durch einen mechanischen Motor angetrieben, z. B. durch eine Dampf- oder Gaskraftmaschine, ein Mühlrad, eine Wasserturbine, und leitet man den in ihr erzeugten Strom nach einem entfernten Orte B, so kann er hier zu einer beliebigen Arbeitsleistung verwendet werden. Allerdings ist auch beim elektrischen Arbeitstransport die in B gewonnene Energie stets kleiner als die in A in die Leitung hineingeschickte. Selbst bei den sorgfältigst ausgeführten Anlagen lassen sich Verluste durch mangelhafte Isolation namentlich auf größeren Strecken nicht ganz vermeiden. Vor allem aber wird in der Leitung selbst ein gewisser Teil der elektrischen Energie stets in nutzlose Wärme umgesetzt. In jedem Leiter erfährt der elektrische Strom einen Potentialabfall (§ 292), der proportional dem Widerstande ist, der also mit der Länge des Leitungsweges wächst. Beträgt der Potentialverlust e Volt, der Widerstand w Ohm, die Stromstärke i Ampère, so werden in der Leitung $ie = i^2w = \frac{e^2}{w}$ Watt verzehrt (§ 296). Hieraus geht hervor,

daß zur Übertragung großer Energiemengen auf weite Entfernungen nur hochgespannte Ströme von praktischer Bedeutung sind.

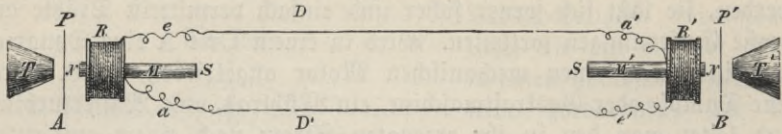
Bei dem Versuch, den man zum erstenmal 1891 in großem Maßstabe zwischen Lauffen am Neckar und Frankfurt am Main anstellte, also auf eine Entfernung von ungefähr 175 km, standen in L. etwa 200 000 Watt, also fast 300 Pferdestärken an elektrischer Energie zur Verfügung. Hätte man diese vermittelt Gleichstroms von 500 Volt, wie er bei unseren Straßenbahnen üblich ist, übertragen wollen, so wäre ein Strom von 400 Ampère erforderlich gewesen, und bei einem Leitungswiderstande von w Ohm würden $i^2w = 160 000 w$ Watt auf Erwärmung des Leitungsweges verloren gegangen sein, also bereits bei $w = \frac{5}{4}$ Ohm die gesamte Energie. Um diesen negativen Erfolg zu erzielen, hätte man einer kupfernen Hin- und Rückleitung einen Querschnitt von $q = \frac{1}{w} \cdot \frac{1}{60} = 350 000 \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{1}{60}$ qmm oder fast 47 qcm geben müssen.

Tatsächlich benutzte man zur Fortleitung Wechselströme von durchschnittlich 27 000 Volt und einer Stromstärke von 8 Ampère. Für die Fernleitungen genügten Drähte von 4 mm Durchmesser, in denen der Energieverlust nur etwa 25% betrug.

§ 329. **Telephon und Mikrophon.** Eine besondere Form elektrischer Energieübertragung durch Wechselströme findet beim Fernsprechen statt. § 329.

a) An zwei Orten A und B sind zwei gleiche Apparate von folgender Konstruktion aufgestellt: Ein kräftiger Stahlmagnet M (Fig. 392) ist an dem einen Polende mit einer Induktionsrolle R umgeben.

Fig. 392.

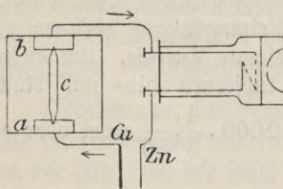


Unmittelbar vor dem Pol befindet sich ein papierdünnes Eisenblech P, das senkrecht zur Magnetachse mit seinem Rande in ein Holzgehäuse festgeklemmt ist. Vor der freien Mitte des Plättchens ist ein trichterförmiges Mundstück T angebracht. Die beiden Enden der Spule R in A sind durch zwei Telegraphendrähte D und D' mit den Enden der Spule R' in B verbunden.

Wird nun in A durch das Mundstück gegen das Eisenplättchen gesprochen, so erzeugen die Schallwellen jedes Lautes ebenso viele Schwingungen des Plättchens P, von denen jede beim Annähern von P an den Pol einen Induktionsstrom in der Spule R hervorruft und beim Zurückgehen einen entgegengesetzten. Dadurch wird die Polstärke des Magneten in B einmal verstärkt und einmal geschwächt, also das Plättchen P' einmal angezogen und einmal losgelassen. Es macht mithin P' ebenso viele Schwingungen wie P und erzeugt deshalb Luftwellen, die auf den Hörer in B denselben Schalleindruck hervorbringen, als ob er sich in A befände.

Das erste Telephon konstruierte 1860 Phil. Reis; das oben beschriebene wurde 1875 von Graham Bell erfunden.

Fig. 393.



b) Die Wirkung des Telephons wird durch Anwendung des von Hughes 1878 erfundenen Mikrophons bedeutend verstärkt. In seiner ursprünglichen Form besteht das Mikrophon aus einem Kohlenstäbchen c, das zwei andere Kohlenstückchen a und b, die auf einer dünnen Holzplatte befestigt sind, lose berührt. Diese Vor-

richtung und ein zum Hören bestimmtes Telephon werden in den Stromkreis einer kleinen galvanischen Batterie eingeschaltet (Fig. 393). Solange die Berührung der Kohlen unverändert ist, behält der Strom dieselbe Stärke. Wird aber die Berührung durch irgend eine Veranlassung inniger, so vermindert sich der Leitungswiderstand der Kohlen, und der Strom nimmt an Stärke zu; umgekehrt, entfernen sich die Kohlen

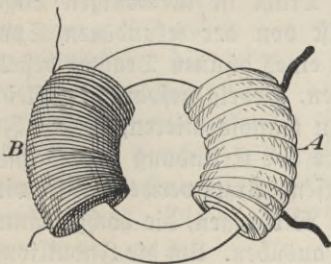
etwas voneinander, so vermehrt sich ihr Widerstand, und die Stromstärke nimmt ab. In einem Falle wird die Kraft des Telephonmagneten verstärkt, im anderen geschwächt. Bringt man also durch irgend einen Schall die Kohlen in Bewegung, so muß in dem Telephon das Eisenplättchen in Schwingungen geraten und dadurch den Schall wiedergeben. Die beiden Apparate, durch die der Ton vermittelt wird, sind also verschieden; das Mikrophon dient zum Tonsenden, das Telephon zum Tonempfangen.

Die Wirkung läßt sich noch steigern, wenn man den Mikrophonstromkreis durch eine Spule aus verhältnismäßig wenigen Windungen schließt, die einen Eisenkern enthält und von einer zweiten Spule mit zahlreichen Windungen umgeben ist. Durch die Schwankungen des primären Stromes werden in der sekundären Spule höher gespannte Induktionsströme hervorgerufen (s. § 330), die man nach der entfernten Station leitet und dort durch das Telephon gehen läßt.

Da man auf jeder der beiden Stationen sprechen und hören will, so müssen an jeder ein Mikrophon, ein Telephon und eine Batterie vorhanden sein. Außerdem ist jede Station mit einem elektrischen Läutewerk versehen, das zum Anrufen dient.

§ 330. **Transformatoren für Wechselstrom.** Wechselströme § 330. können durch sehr einfache Apparate, die keiner Wartung bedürfen, da sie keine beweglichen Teile besitzen, in schwächere Ströme von höherer Spannung oder stärkere Ströme von geringerer Spannung umgesetzt werden. Eine hierzu geeignete Vorrichtung wurde bereits von Faraday benutzt, allerdings nur zum Nachweis von Induktionsströmen. Sie bestand aus einem Ring aus weichem Eisen, der mit zwei Spulen A und B teilweise bewickelt war (Fig. 394). Die

Fig. 394.



geschlossene Form des Eisenkerns wird auch gegenwärtig verwendet, man setzt ihn aber zur Vermeidung der Foucault'schen Ströme aus isolierten Eisendrähten oder Eisenblechscheiben zusammen, genau so wie einen Grammeschen Ring, und nutzt den ganzen Raum zur Bewicklung aus. Die eine Spule A besteht aus wenigen Windungen dickeren Drahtes, die andere B

aus n mal soviel Windungen dünneren Drahtes. Sendet man durch A einen Wechselstrom, dessen sogenannte effektive Spannung und Stromstärke, die durch geeignete Meßinstrumente angegeben wird, e Volt und i Ampère beträgt, so induziert dieser durch seine Stromschwankungen in B einen Wechselstrom

von angenähert n facher Spannung und der Stromstärke $\frac{i}{n}$. Das Umgekehrte findet statt, wenn der primäre Strom durch die Spule B geleitet wird. Der Energieverlust beläuft sich etwa auf 3—5%.

Die Transformatoren sind bei der Übertragung elektrischer Energie auf weitere Entfernungen von großer Bedeutung. Sie können einmal dazu dienen, den durch rotierende Maschinen in der Zentralstation erzeugten und niedrig gespannten Wechselstrom in hochgespannten zu verwandeln, wie er für die Fernleitung nötig ist (s. § 328), sie haben ferner den Zweck, am Verwendungsort den für die direkte Benutzung nicht geeigneten und außerdem auch sehr gefährlichen, hochgespannten Strom in niedriger gespannten umzusetzen, wie es gerade dem Bedürfnis entspricht.

§ 331. § 331. **Transformatoren für Gleichstrom.** Schickt man durch eine der Spulen des Apparates Fig. 394 einen Gleichstrom, so wirkt dieser nur während des Anschlusses erregend auf die zweite Spule. Sobald er konstant geworden ist, bleibt der Kraftlinienfluß, der den Eisenring und demnach auch die Windungen der sekundären Spule durchsetzt, unverändert. Induktion findet erst statt, wenn man den eingeleiteten Strom in einen pulsierenden verwandelt, was am ausgiebigsten durch fortgesetztes Unterbrechen und Schließen geschieht. Gewöhnlich verwendet man hierzu selbsttätige Unterbrecher, z. B. den Wagnerschen Hammer.

Als Eisenkern benutzt man nicht einen Ring, sondern ein stabförmiges Eisendrahtbündel. Denn da die Stöße des Gleichstroms den Eisenkern stets in derselben Richtung umkreisen, so ist der remanente Magnetismus weit stärker als beim Betriebe mit Wechselstrom, und in einem Ringe würden die magnetischen Schwankungen raschen Unterbrechungen nicht folgen können.

Die primäre Spule aus dickerem Draht ist in wenigen Lagen auf den Eisenkern aufgewickelt. Sie ist von der sekundären Spule umgeben, die aus sehr zahlreichen Lagen eines dünnen Drahtes besteht.

Derartige Apparate, die dazu dienen, niedrig gespannten Gleichstrom in hochgespannten Wechselstrom zu transformieren, heißen Induktionsapparate. Sie sind bereits lange vor Erfindung der Wechselstromtransformatoren in Gebrauch gewesen. Ärzte verwenden sie vielfach wegen der heilsamen physiologischen Wirkungen, die hochgespannte und schwache Ströme in gewissen Fällen ausüben. Um die Induktionswirkungen beliebig abtufen zu können, macht man entweder die sekundäre Spule verschiebbar (Schlittenapparat) oder umgibt das Eisen drahtbündel mit einem Messingrohr, das in der Richtung der Spulenachse beweglich ist. Je nachdem man das Rohr mehr oder weniger tief in die primäre Spule einführt, umhüllt es einen größeren oder kleineren Teil des Eisenkerns und wird von stärkeren oder schwächeren

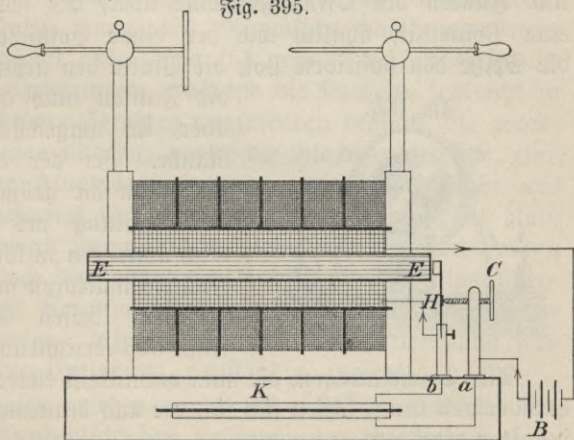
Foucault'schen Strömen durchflossen, die stets in entgegengesetztem Sinne auf die sekundäre Spule wirken wie der Hauptstrom.

Schalten wir unseren Körper zwischen die Enden der sekundären Spule ein, so empfinden wir beim Öffnen des Hauptstromes weit heftigere Erschütterungen als beim Schließen. Es rührt dies von der Selbstinduktion der primären Spule her (§ 323). Der beim Schließen in ihr erregte Extrastrom kann sich vollständig entwickeln, denn er findet eine geschlossene Leitung vor, und da er dem Hauptstrom entgegengerichtet ist, so verhindert er das plötzliche Anwachsen desselben und setzt deshalb beträchtlich die induzierende Wirkung auf die sekundäre Spule herab. Auch der Öffnungsextrastrom wirkt ungünstig, denn er ist dem primären Strome gleichgerichtet und verzögert also die Unterbrechung. Da er aber nur während der kurzen Dauer des Öffnungsfunkens besteht, so ist sein schwächender Einfluß geringer.

Die Elektrizitätsmenge, die in dem sekundären Draht beim Öffnen und Schließen bewegt wird, ist in beiden Fällen dieselbe. Denn schaltet man ein Galvanometer ein, so zeigt dies keinen dauernden Ausschlag. Infolge der Extraströme fließt aber der Öffnungsstrom weit rascher ab als der Schließungsstrom, deshalb ist die elektromotorische Kraft jenes Stromes erheblich größer. Man überzeugt sich hiervon, wenn man den einen Zuleitungsdraht zum Galvanometer nicht in direkte metallische Berührung mit der Galvanometerklemme bringt, sondern einen noch mit Seide umspinnenen Teil des Drahtes um die Klemme herumlegt. Die Schließungsströme vermögen dann nicht die dünne Isolationshülle zu durchbrechen, wohl aber die Öffnungsströme, wie man an der Ablenkung der Galvanometernadel erkennt.

Apparate, bei denen die elektromotorische Kraft der induzierten Ströme groß genug ist, um eine zwischen die Enden der sekundären Spule eingeschaltete Luftstrecke zu durchbrechen, heißen Funkeninduktoren. Die ersten derartigen Apparate wurden von Rühmkorff (1851) gebaut. Eine wesent-

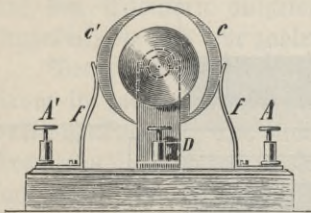
liche Verbesserung hat Fizeau (1853) bei ihnen angebracht, indem er zwischen zwei Punkten des primären Stromkreises, die durch die Unterbrechungsstelle getrennt sind, einen Kondensator einschaltete.



In der Fig. 349 geht der Strom von der Batterie B nach der Kontaktschraube C, zur Hammerfeder H der Unterbrechungsvorrichtung und von hier durch die primäre Spule zurück zur Batterie. Von den Punkten a und b führen metallische Zuleitungen nach den beiden Belägen des Kondensators K. Der sekundäre Draht, der bei großen Apparaten eine Länge bis 100 km hat, ist nicht fortlaufend in Lagen übereinander gewickelt, sondern in Abteilungen, die durch Hartgummi-scheiben isoliert sind. Jede Abteilung ist mit der nächstfolgenden in geeigneter Weise verbunden. Man verhindert durch diese Art Wickelung, daß die Potentialdifferenz benachbarter Drähte eine die Isolation gefährdende Höhe erreicht. Die Enden der sekundären Spule sind an einen Entlader angeschlossen, der gewöhnlich aus Platte und Spitze besteht.

Der Kondensator hat den Zweck, den Öffnungsfunken des primären Stromes zu verkürzen. Sobald die Unterbrechung erfolgt, gleichen sich die Elektrizitätsmengen, die der Öffnungsextrastrom nach C und H treibt, zum größten Teil nicht durch die Luft aus, sondern fließen nach den Belägen des Kondensators ab. Wir können auch sagen: der Kondensator vergrößert die Kapazität des primären Stromkreises, vermindert also die Potentialdifferenz an der Unterbrechungsstelle. Dadurch wird die Länge und Dauer des Öffnungsfunkens herabgesetzt und so die schädliche Wirkung des Öffnungsextrastromes fast vollständig beseitigt. Der Unterschied in der elektromotorischen Kraft der sekundären Öffnungs- und Schließungsströme ist deshalb bei Induktoren mit Kondensator wesentlich größer als bei denen ohne Kondensator. Zieht man Platte und Spitze etwas auseinander, so gehen nur Funken der Öffnungsströme über, der Funkenstrom zeigt also eine Polarität, ähnlich wie der einer Holtz'schen Maschine. Bildet die Spitze den positiven Pol, die Platte den negativen, dann springen die Funken nach der Mitte der Platte über, im umgekehrten Falle nach dem Rande. Bei der ersten Schaltung erzielt man die größte Funkenlänge. Um die Richtung des primären Stromes rasch umkehren zu können, sind die meisten Funkeninduktoren mit einem Kommutator versehen, dessen Einrichtung aus der Fig. 396 ersichtlich ist.

Fig. 396.

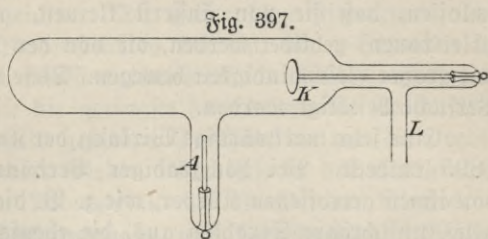


Alle Erscheinungen, die man vermitteltst elektrostatischer Maschinen hervorrufen kann, lassen sich sicherer und bequemer mit einem Funkeninduktor erzeugen.

§ 332.

§ 332. Die Entladungsercheinungen hochgespannter Ströme in Gasen hängen sehr wesentlich von der chemischen Beschaffenheit und dem Druck der Gase ab. Bei den bekannten Geißler'schen

Röhren, von denen eine zur spektroskopischen Untersuchung geeignete Form in Fig. 292 dargestellt ist, beträgt der Druck etwa 2—4 mm Quecksilber. Zur Stromzuführung sind in die Glaswandung zwei Platindrähte eingeschmolzen. In Röhren, die hoch evakuiert werden sollen, versieht man die Platindrähte mit Elektroden aus Aluminium, da dieses Metall weniger als alle anderen durch die elektrischen Entladungen zerstäubt wird. Fig. 397 stellt ein derartiges Rohr dar. Als Anode A dient ein Aluminiumdraht, als Kathode K eine Scheibe aus Aluminium-



blech, der man häufig eine hohlspiegelartige Form gibt. Vermittelt des Ansatzes L wird das Rohr an eine Quecksilberluftpumpe angeschlossen. Ist die Entfernung der Elektroden größer als die Schlagweite des benutzten Funkeninduktors, so finden anfangs keine Entladungen statt. Verdünnt man allmählich die Luft, so nimmt ihr Widerstand zunächst ab, und es setzt bald ein laut prasselnder Funkenstrom ein, der in einem helleuchtenden, rötlich-violetten Bogen A mit K verbindet. Etwa bei 15 cm Quecksilber Druck wird das Geräusch der Funken schwächer, und der Funkenstrom verwandelt sich in eine scheinbar kontinuierliche Lichtlinie, die bei weiterem Pumpen in ein breites, rötlich gefärbtes Band übergeht. Mit wachsender Verdünnung zieht sich dieses mehr nach der Anode zurück und zerfällt in hin- und herzuckende Schichten, senkrecht zur Röhrenachse. Die Kathode aber umgibt, durch einen dunklen Raum von dem Anodenlicht getrennt, ein bläulich leuchtendes Glimmlicht, das immer mehr das Anodenlicht verdrängt. Bei etwa 0,1 mm Druck ist dieses zu einem Punkt zusammengeschrumpft, während die Kathode, senkrecht zu ihrer Oberfläche, unsichtbare Strahlen auszusenden beginnt, die geradlinig das Rohr durchsetzen und da, wo sie die Glaswand treffen, eine schwache, gelblich-grüne Fluoreszenz erzeugen, wenn das Rohr aus thüringischem Glase gefertigt ist. Englisches Glas fluoresziert blau. Die Erscheinung nimmt an Intensität zu, wenn man die Verdünnung noch weiter treibt. Doch darf man eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Je besser das Vakuum wird, desto mehr wächst der Widerstand des Entladungsweges, bis endlich, selbst bei Verwendung sehr großer Induktoren, die Entladung vollständig aussetzt.

Die Kathodenstrahlen wurden von Hittdorf (1869) entdeckt. Sie folgen nicht wie das Anodenlicht den Krümmungen des Rohres, sondern werden durch jeden in ihren Weg gestellten Körper aufgehalten. Hat man zwischen der Kathode und der gegenüberliegenden Glaswand einen kleinen Schirm aus Metall oder Glimmer angebracht, so erscheint

auf der Glaswand ein scharf begrenzter Schatten. Die Kathodenstrahlen üben auch da, wo sie auffallen, einen mechanischen Druck aus, der imstande ist, leichte Körper in Bewegung zu setzen (Crookes 1879). Sehr beträchtlich sind die Wärmewirkungen, die sie bei ihrem Aufsprallen hervorrufen. Konzentriert man die Strahlen durch eine sphärisch gekrümmte Kathode auf einem Platinblech, so wird dieses glühend. Aus der Richtung der Ablenkung, die die Kathodenstrahlen in einem magnetischen oder elektrischen Felde erfahren, hat man geschlossen, daß sie von äußerst kleinen, negativ geladenen Teilchen (Elektronen) gebildet werden, die von der Kathode aus sich geradlinig mit großer Geschwindigkeit bewegen. Diese Ansicht ist auch durch andere Versuche bestätigt worden.

Eine sehr merkwürdige Wirkung der Kathodenstrahlen hat Röntgen 1895 entdeckt. Bei hochgradiger Verdünnung der Luft senden die von ihnen getroffenen Körper, wie z. B. die fluoreszierende Glaswand, neue, unsichtbare Strahlen aus, die ebenfalls Fluoreszenz zu erregen vermögen, im Gegensatz zu den Kathodenstrahlen aber magnetisch nicht ablenkbar sind. Dagegen besitzen sie in weit höherem Grade als die Kathodenstrahlen die Fähigkeit, die Stoffe zu durchdringen, und zwar um so besser, je spezifisch leichter diese sind. Hierauf beruht der große praktische Wert der Röntgenstrahlen. Läßt man sie auf die Rückseite eines mit Bariumplatinzinnur belegten Pappschirmes auffallen, so leuchtet die präparierte Seite in einem lebhaften grünlichen Licht. Bringt man einen Körper, z. B. die Hand, zwischen Röhre und Schirm, so werden die Strahlen durch die Weichteile nur wenig geschwächt, dagegen sehr merklich durch die Knochen. Man erhält deshalb ein Schattenbild auf dem Schirm, bei dem die dunkel erscheinenden Knochen sich deutlich von den helleren Weichteilen abheben. Da die Röntgenstrahlen die photographische Platte schwärzen, so kann man den Leuchtschirm durch eine derartige Platte ersetzen und eine Photographie des Schattenbildes herstellen.

Werden zwei Metallplatten, die durch eine hinreichend dicke Luftschicht getrennt sind, auf ein verschiedenes Potential gebracht, so findet ein Ausgleich der Ladungen im allgemeinen nicht statt. Läßt man aber durch die Luftschicht Röntgenstrahlen hindurchgehen, so kann man einen kontinuierlichen elektrischen Strom zwischen den Platten nachweisen. Man nimmt an, daß diese Elektrizitätsleitung sich in ähnlicher Weise vollzieht wie in einem Elektrolyten. Während sich die Gase unter gewöhnlichen Umständen wie Isolatoren verhalten, erlangen sie eine gewisse Leitfähigkeit, wenn sie durch irgend eine Ursache, z. B. durch Röntgenstrahlen, ionisiert, d. h. in positiv und negativ geladene Teilchen zerfallen werden. Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes wandern diese in entgegengesetzten Richtungen bis zu den Elektroden, werden dort neutralisiert und vermitteln so einen Ladungsausgleich der Elektroden. Die Ionisierung der Luft läßt sich am einfachsten durch die Entladung eines Elektroskops zeigen.

Im Jahre 1896 entdeckte Becquerel, daß von dem Uran und seinen Verbindungen unsichtbare Strahlen ausgehen, die ähnliche Wirkungen ausüben wie die Kathoden- und Röntgenstrahlen. Wie diese schwärzen sie die photographische Platte, rufen Fluoreszenz hervor und entladen elektrische Körper. Fast millionenmal stärker radioaktiv als das Uran und seine Salze ist ein von dem Ehepaar Curie entdecktes Element, das Radium, dessen Chlorid aus Uranpechblende hergestellt wird. Das Radium sendet drei verschiedene Strahlenarten aus, die man mit den Buchstaben α , β , γ bezeichnet. Die β -Strahlen stimmen in ihren Eigenschaften mit den Kathodenstrahlen überein, die γ -Strahlen mit den Röntgenstrahlen. Am stärksten ionisierend auf Gase wirken die α -Strahlen, doch besitzen sie die geringste durchdringende Kraft. Man hält sie für materielle, positiv geladene Teilchen, die von dem radioaktiven Körper ausgeschleudert werden. Die Ursache der Strahlungsenergie sieht man in dem Atomzerfall des strahlenden Stoffes.

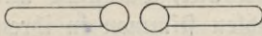
§ 333. Elektrische Schwingungen und fortschreitende Wellen. § 333.

In einem Leiter, der von Wechselströmen durchflossen wird, ändert sich in jedem Augenblick sowohl die Stromstärke als auch die Spannung. Diese Änderungen geschehen periodisch, d. h. nach Ablauf einer gewissen Zeit befindet sich dieselbe Stelle des Leiters immer wieder in dem gleichen elektrischen Zustande. Bei einem elastischen Körper, der in Schwingungen versetzt wird, z. B. bei einer tönenden Saite oder Stimmgabel, beobachten wir periodische Änderungen der Lage der Teilchen zueinander und der elastischen Spannungen zwischen den einzelnen Teilchen. In Anlehnung an diese Erscheinungen bezeichnet man die regelmäßig sich wiederholenden Schwankungen in der Spannung und Stromstärke eines Wechselstromes als elektromagnetische Schwingungen. Wir wissen, daß sie imstande sind, in einem benachbarten Leiter Wechselströme, also elektromagnetische Schwingungen, zu induzieren, die um so wirkungsvoller sind, je rascher die Änderungen im primären Draht verlaufen. Bei den in der Technik verwendeten Wechselströmen beträgt die Schwingungszahl nur etwa 50 bis 100 in 1 Sekunde. Um dabei kräftige Induktionswirkungen zu erzielen, muß die primäre Leitung möglichst nahe der sekundären liegen. Eine Untersuchung, in welcher Weise sich die elektrische Energie von dem ersten nach dem zweiten Draht fortpflanzt, ist unter diesen Umständen ausgeschlossen. Benutzt man aber Wechselströme, die in einer Sekunde viele millionenmal ihr Vorzeichen ändern, so lassen sich Induktionswirkungen auch auf größere Entfernungen hervorrufen. Die Möglichkeit, Ströme von sehr hoher Wechselzahl zu erzeugen, bietet der elektrische Funke.

Wir haben in § 267,⁶ erwähnt, daß es bereits Feddersen (1859) gelang, den oszillatorischen Charakter, den die Funkenentladung einer Leidener Flasche unter geeigneten Bedingungen zeigt, experimentell

nachzuweisen. Je kleiner die Kapazität und Selbstinduktion des sich entladenden Stromkreises ist, desto kürzer ist die Dauer einer Schwingung. Herz (1886—88) benutzte bei seinen berühmten Versuchen über Strahlen elektrischer Kraft die Funkenentladungen eines Ruhmkorff'schen Induktors, dessen sekundäre Polklemmen er mit einem Entlader von der Form Fig. 398 verbunden hatte. Dieser stellt

Fig. 398. eine Leidener Flasche von geringer Kapazität und Selbstinduktion dar: die beiden metallischen Teile bilden die Belege, die umgebende Luft das isolierende Mittel. Bei einem Entlader von bestimmten Abmessungen ergab sich für die theoretisch berechnete Dauer einer Schwingung der Wert $2,2 \cdot 10^{-9}$ Sekunden.



Derartige rasche Schwingungen pflanzen sich nicht in die Drahtleitung der sekundären Spule fort, obgleich diese mit dem Entlader in metallischer Verbindung steht. Der Grund hierfür ist die große Selbstinduktion der Spule. Eine Stimmgabel, die auf einem Bleifloß befestigt ist, überträgt ihre Bewegung um so weniger auf den Klotz, je schwerer dieser ist.

Zum Nachweis der Induktionswirkungen, die von der Funkenstrecke ausgehen, bediente sich Herz eines einfachen, fast zum Kreise gekrümmten Drahtes, der an seinen Enden zwei kleine, sich nahe gegenüberstehende Kugeln trug. Sobald ein Funke zwischen den Kugeln des Entladers überging, konnte Herz auch einen Funken zwischen den Kugeln des Drahtkreises wahrnehmen, selbst wenn dieser mehrere Meter vom Erreger entfernt war. Um die günstigste Wirkung zu erhalten, mußte dem Durchmesser des Drahtkreises eine bestimmte Länge gegeben werden, die durch die Abmessungen des Entladers bedingt war. Herz erkannte hierin eine Resonanzwirkung, die sich in ähnlicher Weise erklärt wie die entsprechenden akustischen Erscheinungen.

Eine angestrichene Stimmgabel veranlaßt eine andere Gabel am besten zum Mitschwingen, wenn beide auf denselben Ton abgestimmt sind. Die von der ersten Gabel verursachten Verdichtungen und Verdünnungen der Luft treffen in einem bestimmten Takt die Zinken der zweiten. Jeder einzelne Impuls würde, wenn er kräftig genug wäre, die Eigenschwingungen dieser Gabel erregen. In Wirklichkeit ruft er nur eine unmerkliche Bewegung hervor. Da aber alle Impulse im günstigen Augenblick erfolgen, so addieren sich ihre Wirkungen, und wir hören die zweite Gabel fort tönen, wenn die erste angehalten wird. Noch augenscheinlicher läßt sich der Einfluß einer großen Zahl schwacher Anstöße, die zur rechten Zeit erfolgen, bei einem Pendel beobachten. Bewegen wir einen leichten Fächer an einem schweren Pendel in demselben Takt vorbei, in dem dieses selbst zu schwingen vermag, so können wir es durch den verursachten Luftzug allmählich in Bewegung setzen.

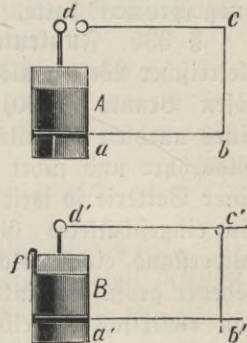
Wie eine schwingende Stimmgabel in der umgebenden Luft nach allen Richtungen fortschreitende Verdichtungen und Verdünnungen

hervorruft, so bewirken die elektrischen Schwingungen des Entladers periodische Veränderungen im elektrischen Zustande des Aethers, die sich wellenartig nach allen Seiten hin ausbreiten. Diese Wellen sind nicht direkt wahrnehmbar. Sie verraten aber ihre Existenz, wenn sie auf einen Körper treffen, in dem sie durch Resonanz kräftige Schwingungen zu erregen vermögen. Das ist bei dem Herzschen Drahtkreise (Resonator) der Fall, an dessen Unterbrechungsstelle der Ausgleich der induzierten Schwingungen in Gestalt eines Funkenchens erfolgt.

Zur Demonstration der Resonanz eignet sich folgender Versuch von Lodge:

Die Leidener Flasche A (Fig. 399) und das Drahtrechteck $abcd$ bilden einen Schwingungskreis, der eine regulierbare Funkenstrecke bei d enthält. Ein zweiter, dem ersten parallel aufgestellter Schwingungskreis besteht aus der Flasche B und dem Drahtrechteck $a'b'c'd'$, dessen Selbstinduktion durch die verschiebbare Drahtbrücke $b'e'$ verändert werden kann. Die Funkenstrecke dieses Kreises ist dadurch hergestellt, daß ein an die innere Flaschenbelegung geklebter Stanniolstreifen über den Rand führt und nahe dem äußeren Belag in einer Spitze f endet. Schließt man die Beläge der Flasche A an die Enden der sekundären Spule eines Induktors an, so erregen die von den Entladungsfunken bei d ausgehenden Wellen in dem abgestimmten zweiten Kreise elektrische Schwingungen, wie man an den bei f auftretenden Funken erkennt. Die Abstimmung geschieht durch Verschieben der Brücke $b'e'$.

Fig. 399.

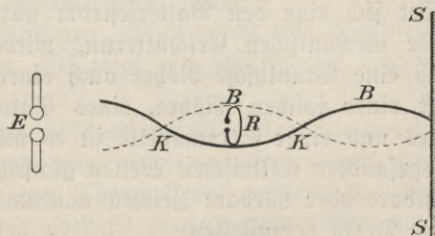


Eine dünne Metallplatte, die man zwischen die Schwingungskreise schiebt, hebt die Wirkung vollständig auf. Durch Platten aus isolierenden Stoffen gehen die elektrischen Wellen fast ungeschwächt hindurch.

§ 334. **Stehende elektrische Wellen.** Den überzeugendsten Beweis von dem Vorhandensein elektrischer Wellen erbrachte Herz, als es ihm gelang, stehende Wellen hervorzurufen. In geeigneter Entfernung von dem vertikal angeordneten

Fig. 400.

§ 334.



Erreger E (Fig. 400) stellte er vertikal den Metallschirm S auf. Die von E ausgehenden Transversalwellen, die senkrecht auf den Schirm trafen, wurden in der Einfallrichtung zurückgeworfen

und bildeten mit den direkten Wellen durch Interferenz stehende Wellen. Als Herz den Raum zwischen Erreger und Schirm mit dem Resonator untersuchte, konnte er Bäuche B und Knoten K der elektrischen Kraft nachweisen und so die Wellenlänge λ messen, die gleich dem doppelten Abstände zweier benachbarten Knoten ist (§ 102). Sie betrug bei dem einen Versuch 66 cm, die theoretisch berechnete Schwingungsdauer $t = 2,2 \cdot 10^{-9}$ Sekunden. Hieraus ergab sich für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen in Luft der Wert $c = \frac{\lambda}{t} = 300000 \text{ [km sec}^{-1}\text{]}$, also derselbe Wert wie für die Lichtgeschwindigkeit.

Indem Herz ferner experimentell zeigte, daß für die Strahlen elektrischer Kraft dieselben Gesetze der Reflexion, Brechung, Interferenz und Polarisation gelten wie für die Licht- und Wärmestrahlen, gewann die Ansicht von der Wesensgleichheit dieser Erscheinungen, die Maxwell, gestützt auf rein theoretische Erwägungen, bereits 1873 ausgesprochen hatte, einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit.

§ 335.

§ 335. **Funkentelegraphie.** Ein weit empfindlicherer Anzeiger elektrischer Wellen als der Herz'sche Resonator wurde von dem Franzosen Branly (1890) erfunden. Schüttet man ein grobes Pulver eines unedlen Metalls, z. B. Nickel- oder Eisenfeilspäne, lose in eine Glasröhre und führt in diese von beiden Seiten her die Poldrähte einer Batterie so weit ein, daß sie in das Pulver eintauchen, so zeigt ein eingeschaltetes Galvanometer keinen Ausschlag. Der elektrische Widerstand eines solchen Metallpulvers ist also für gewöhnlich ungeheuer groß. Er sinkt aber auf wenige Ohm herab, sobald die Röhre von elektrischen Wellen bestrahlt wird. Um den anfänglichen Zustand wiederherzustellen, muß man die Röhre durch einen leichten Schlag erschüttern.

Nach Lodge läßt sich die Erscheinung durch das Auftreten winziger Fünkchen erklären, die zwischen den Pulverkörnern durch die Bestrahlung hervorgerufen werden. Indem diese Fünkchen die äußerst feinen Spitzen einzelner Metallkörnchen gleichsam zusammenschweißen, bildet sich eine den Batteriestrom gut leitende Brücke, die erst bei einer mechanischen Erschütterung wieder zerfällt. Man nennt deshalb eine Branly'sche Röhre auch einen Fritter (Kohärer). Vermittelt einer solchen Röhre, eines Galvanometers oder Klingelapparates und einer Stromquelle ist es möglich, die von einem Erreger ausgesandten elektrischen Wellen günstigenfalls auf etwa 100 m durch sichtbare oder hörbare Zeichen nachzuweisen und so eine Telegraphie ohne Draht herzustellen.

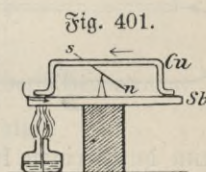
Marconi gelang es bereits bei seinen ersten Versuchen 1896, die Entfernung auf einige Kilometer auszudehnen und die Herz'sche Entdeckung (§ 333) für die praktische Anwendung geeignet zu machen.

Er erreichte diesen Erfolg hauptsächlich durch Anbringung eines sogenannten Sende- und Fangdrahtes. Es sind dies zwei vertikal aufgespannte Drähte, die von dem einen Ende des Erregers und dem einen Ende der Frittröhre ausgehen (Antennen). Die beiden anderen Enden von Erreger und Fritter werden gewöhnlich mit der Erde leitend verbunden. Der Stromkreis der Frittröhre enthält ein empfindliches Relais. Sobald der Auffangedraht von elektrischen Wellen getroffen wird, sinkt der Widerstand des Fritters, der Relaisanker wird angezogen und schließt einen zweiten Stromkreis, in den ein elektromagnetischer Klopfer und parallel zu ihm ein Morfesreiber eingeschaltet ist. Jeder Schlag des Klopfers erschüttert den Fritter, dieser erlangt den ursprünglichen großen Widerstand, der Relaisanker schnell zurück, und der zweite Stromkreis wird unterbrochen.

Seit den ersten erfolgreichen Versuchen Marconis sind in der drahtlosen Telegraphie besonders durch die Arbeiten Brauns sehr bedeutende Fortschritte gemacht worden, so daß man gegenwärtig bereits auf Entfernungen von über 3000 km Nachrichten übermittelt hat.

G. Thermoelektrizität.

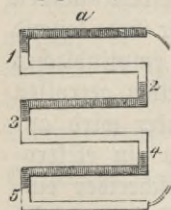
§ 336. Werden die beiden Enden eines Metallbügels Cu (Fig. 401) § 336. an die Enden eines Stabes Sb aus einem anderen Metall befestigt, so entsteht bei Erwärmung einer der Berührungsstellen ein elektrischer Strom von bestimmter Richtung, bei Abkühlung derselben Stelle ein entgegengesetzt gerichteter Strom (Seebeck 1821). Von den Metallen: Wismut, Konstantan, Platin, Kupfer, Zink, Eisen, Antimon liefern je zwei einen Strom, der an der wärmeren Berührungsstelle vom vorhergehenden nach dem folgenden Metall fließt, also in der Figur vom Kupfer zum Antimon. Man nennt eine Verbindung zweier Metalle, wie sie die Fig. 401 zeigt, ein geschlossenes Thermo-



element. Lötet man zwei Drähte aus verschiedenen Metallen nur mit dem einen Ende zusammen, so kann man die freien Enden mit einem Galvanometer verbinden und den Thermoström messen, der durch Erwärmung oder Abkühlung der Lötstelle erzeugt wird. Man hat so gefunden, daß die erregte elektromotorische Kraft innerhalb gewisser Temperaturgrenzen um so größer ist, je weiter die beiden Metalle in obiger Reihe voneinander abstehen, und daß sie proportional mit der

Temperaturänderung der Lötstelle wächst. Bei einer Erwärmung um 1° C beträgt sie für Antimon und Wismut etwa 0,12, für Eisen und Konstantan 0,052 Millivolt.

Fig. 402.

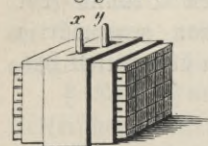


Um die elektromotorische Kraft zu erhöhen, schaltet man eine größere Zahl von Elementen hintereinander, indem man Stäbchen aus zwei verschiedenen Metallen in abwechselnder Reihenfolge mit ihren Enden zickzackförmig verlötet (Fig. 402 und 403), so daß sich die ungeraden Lötstellen auf der einen Seite, die geraden auf der entgegengesetzten befinden. Sind die Lötstellen der einen Seite wärmer

als die der anderen, so werden in allen Elementen Thermoströme von gleicher Richtung hervorgerufen, wenn die freien Enden (x, y Fig. 403)

durch einen Leitungsdraht verbunden sind. Die elektromotorische Kraft einer aus n Elementen bestehenden Säule ist dann n mal so groß wie die eines einzelnen Elements. Nobili (1834) benutzte eine aus Antimon- und Wismutstäbchen aufgebaute Säule in Verbindung mit einem empfindlichen Galvanometer von kleinem Widerstande zum Nachweis sehr geringer Temperaturdifferenzen.

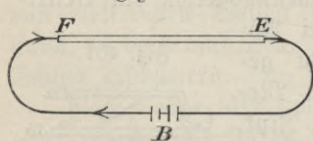
Fig. 403.



Eine theoretisch wichtige, die Entdeckung Seebecks ergänzende Beobachtung hat Peltier (1834) gemacht. Läßt man durch einen Eisen-

draht FE (Fig. 404), an dessen Enden zwei Kupferdrähte gelötet sind, den Strom einer Batterie B gehen, so zeigt sich an der Lötstelle F, wo der Strom vom Kupfer zum Eisen fließt, eine Abkühlung, bei E eine Erwärmung. Die Temperaturänderung an den Lötstellen ist also derjenigen entgegengesetzt, die einen Thermoström erzeugen würde, und man kann durch einen kräftigen, längere Zeit fließenden Batteriestrom ein Thermoelement gewissermaßen laden wie einen Akkumulator.

Fig. 404.



H. Dimensionsformeln der absoluten magnetischen, elektrostatischen und elektromagnetischen Einheiten.

§ 337. § 337. a) Magnetische Einheiten. 1. Nach dem Coulombschen Gesetz stoßen sich zwei gleichnamige Pole von der Stärke m in der Entfernung von r cm mit der Kraft $K = \frac{m^2}{r^2}$ Dyn ab, also ist

$$\text{die Polstärke } m = r \sqrt{K \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]}.$$

2. Das magnetische Moment $M = m l \left[\text{cm}^{\frac{5}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$.

3. Die Kraftäußerung eines magnetischen Feldes von der Intensität J auf einen Pol von der Stärke m ist $K = m \cdot J$, demnach ist

$$\text{die Feldintensität } J = \frac{K}{m} \left[\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

b) Elektrostatische Einheiten. 1. Nach dem Coulombschen Gesetz üben zwei gleich große elektrische Ladungsmengen e in der Entfernung r cm eine abstoßende oder anziehende Wechselwirkung von $K = \frac{e^2}{r^2}$ Dyn aus (§ 253), es ist also

$$\text{die Ladungsmenge } e = r \sqrt{K} \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

$$1 \text{ Coulomb ist gleich } 3 \cdot 10^9 \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

2. Unter Stromstärke i versteht man die Ladungsmenge, die in 1 Sec = 1 Sekunde durch den Querschnitt eines Leiters fließt. Gehen also in t Sekunden e Einheiten durch den Querschnitt, so ist

$$\text{die Stromstärke } i = \frac{e}{t} \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-2} \right].$$

3. Sind $e_1, e_2, e_3 \dots$ die punktförmigen Ladungen eines Körpers und $r_1, r_2, r_3 \dots$ cm ihre Entfernungen von irgend einem Punkte außerhalb, so hat das Potential in diesem Punkte den Wert $V = \sum \frac{e}{r}$ (§ 258). Demnach ist

$$\text{das Potential } V = \sum \frac{e}{r} \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

$$1 \text{ Volt ist gleich } \frac{1}{3000} \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

4. Ein Leiter, dem die Ladungsmenge E das Oberflächenpotential V erteilt, besitzt die Kapazität $C = \frac{E}{V}$ (§ 258). Es ist also

$$\text{die Kapazität } C = \frac{E}{V} \left[\text{cm} \right].$$

5. Für die elektrische Energie einer Ladung E vom Potentiale V gilt die Beziehung $A = \frac{1}{2} V \cdot E \left[\text{cm}^2 \text{gr} \text{sec}^{-2} \right]$ (§ 264).

c) Elektromagnetische Einheiten. 1. Ein Strom, der in einem kreisförmigen Leiter vom Radius r cm fließt, besitzt die Stromstärke i , wenn er auf einen Magnetpol von der Stärke $m \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$ in seinem Mittelpunkt eine Kraft $K = \frac{2\pi i m}{r}$ Dyn ausübt (§ 284). Es ist also

$$\text{die Stromstärke } i = \frac{rK}{2\pi m} \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

$$1 \text{ Ampère ist gleich } 10^{-1} \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right].$$

2. Fließt in t Sekunden durch den Querschnitt eines Leiters die Ladungsmenge E , so ist die Stromstärke $i = \frac{E}{t}$, also ist

$$\text{die Ladungsmenge } E = it \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \right].$$

3. Wird ein geradliniger Leiter von l cm Länge, der in einem homogenen Magnetfeld von der Stärke $F \left[\text{cm}^{-\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$ senkrecht zur Richtung der Kraftlinien liegt, mit der Geschwindigkeit $v \left[\text{cm sec}^{-1} \right]$ senkrecht zu den Kraftlinien bewegt, so wird an seinen Enden eine Potentialdifferenz $V = Flv$ hervorgerufen (§ 321). Hiernach ist

$$\text{die Potentialdifferenz } V = Flv \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-2} \right].$$

$$1 \text{ Volt ist gleich } 10^8 \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-2} \right].$$

4. Nach dem Ohm'schen Gesetz erfährt ein Strom von der Stärke $i \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$ in einem Leiter, an dessen Enden die Potentialdifferenz $V \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-2} \right]$ herrscht, einen Widerstand $w = \frac{V}{i}$ (§ 292₃). Es ist also

$$\text{der Widerstand } w = \frac{V}{i} \left[\text{cm sec}^{-1} \right].$$

$$1 \text{ Ohm ist gleich } 10^9 \left[\text{cm sec}^{-1} \right].$$

5. Ein Strom von der Stärke $i \left[\text{cm}^{\frac{1}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-1} \right]$ fließt in einem Leiter, an dessen Enden die Potentialdifferenz $V \left[\text{cm}^{\frac{3}{2}} \text{gr}^{\frac{1}{2}} \text{sec}^{-2} \right]$ besteht, in jeder Sekunde die Arbeit $L = Vi$ (§ 296). Demnach ist

$$\text{der Stromeffekt } L = Vi \left[\text{cm}^2 \text{gr sec}^{-3} \right].$$

1 Volt-Ampère ist gleich $10^7 \left[\text{cm}^2 \text{gr sec}^{-3} \right] = 10^7 \text{ Sekunden-Erg} = 1 \text{ Watt}$.

1 Pferdestärke ist gleich 736 Volt-Ampère.

Gesetz von der Erhaltung der Energie.

§ 338. Zwei große Gesetze beherrschen die Erscheinungen in der § 338. Natur: das Gesetz von der Erhaltung des Stoffes und das von der Erhaltung der Energie. Während das erste besonders für die Chemie von grundlegender Bedeutung ist, hat sich das zweite hauptsächlich bei der Erforschung physikalischer Vorgänge als fruchtbar erwiesen.

Erkannt wurde die Richtigkeit des Energiegesetzes zunächst auf dem Gebiete der Mechanik. Um die Feststellung seiner allgemeinen Gültigkeit haben sich namentlich drei Männer verdient gemacht: R. Mayer, Foule und Helmholtz. Während Mayer vorwiegend durch spekulative Betrachtungen zur tieferen Auffassung des Gesetzes gelangt ist, hat es Foule durch sorgfältige und zahlreiche Versuche experimentell begründet. Helmholtz hat ihm endlich die mathematische Form gegeben und deduktiv aus ihm die verschiedenen Erscheinungen abgeleitet.

Man versteht unter Energie die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. In der Mechanik konnten wir zwei Formen der Energie unterscheiden: die kinetische und die potentielle. Für beide gilt als Maßeinheit im praktischen System das Kilogrammmeter, im CGS-System das Erg.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß zunächst alle Vorgänge in der Mechanik nur Umwandlungen einer Energieform in die andere darstellen, wobei die Summe der potentiellen und kinetischen Energie unverändert bleibt, nämlich gleich der ursprünglich vorhandenen Energie (s. § 39, 40 und 69).

Außer der mechanischen Energie haben wir noch eine Reihe anderer Energiearten kennen gelernt: die Wärme, die magnetische, elektrische und chemische Energie. Auch bei diesen kann man von einer kinetischen und potentiellen Form sprechen. In einer geladenen Leidener Flasche z. B. ist die elektrische Energie potentiell vorhanden, sie ist in dem Isolator, der die beiden Beläge trennt, gleichsam aufgespeichert, etwa wie mechanische Energie in einer gespannten Feder. Entladen wir die Flasche, so setzt sich ihre potentielle Energie in die kinetische des elektrischen Stromes um und kann als solche Licht, Wärme, Magnetismus, Elektrizität, mechanische Bewegung und chemische Wirkungen erzeugen. Beim Betriebe einer Dampfmaschine wird ein Teil der chemischen Energie, die potentiell zwischen dem Heizmaterial und dem Sauerstoff der Luft besteht, in kinetische Energie der Molekeln des Wasserdampfes umgewandelt. Indem der Dampf sich ausdehnt, schiebt er den Kolben zurück und leistet so eine gewisse mechanische Arbeit. Dabei verliert er an Wärme, d. h. die kinetische Energie der Dampfmolekeln nimmt ab und setzt sich zum Teil in die Bewegungsenergie des Kolbens um. — Die zum Schmelzen von Eis verbrauchte Wärme erteilt dem

entstehenden Wasser einen höheren, potentiellen Energieinhalt, und der Ueberschuß erscheint wieder in kinetischer Form als Wärme, wenn das Wasser gefriert.

Als Maßeinheit für die Wärmeenergie dient die Kilogramm- oder Grammkalorie, für die elektrische Energie das Volt=Coulomb. Die chemische Energie wird durch die Wärmemenge in Kalorien gemessen, die bei der Verbindung zweier Stoffe entsteht. Man hat nun gefunden, daß bei allen Umwandlungen einer oder mehrerer Energiearten in eine oder mehrere andere 10^7 Erg stets äquivalent sind 0,24 Grammkalorien oder 1 Volt=Coulomb. Diese durch zahlreiche Versuche festgestellten Tatsachen bilden die Grundlage des Gesetzes von der Erhaltung der Energie:

Die Summe der verbrauchten Energiemengen ist stets gleich der Summe der neu erzeugten.

Wenn also auf irgend eine Weise Arbeit im physikalischen Sinne geleistet wird, d. h. wenn die potentielle oder kinetische Energie einer Masse oder eines Massensystems um eine bestimmte Größe zunimmt, so ist dies nur dadurch möglich, daß einer oder mehreren anderen Massen die gleiche Energiemenge entzogen wird. Eine Maschine kann deshalb auch im besten Falle immer nur so viel Arbeit hervorbringen, als in sie hineingesteckt wird, ein perpetuum mobile ist physikalisch unmöglich.

Soweit unsere Erkenntnis reicht, beruhen alle Veränderungen in der Natur, mögen sie nun mit oder ohne unser Eingreifen geschehen, auf Energieumwandlungen. Deshalb erscheint der Schluß berechtigt, daß die in der Natur vorhandene Energie summe ebenso unveränderlich ist wie der vorhandene Stoff.

Maß- und Gewichtstabelle.

Ein Meter ist der zehnmillionste Teil des Quadranten eines Erdmeridians.

Längenmaß.	Flächenmaß.	Körpermaß.
1 Kilometer (km) = 1000 Meter (m).	1 Quadratkilometer (qkm) = 10 ⁶ Quadratmeter (qm).	1 Kubikmeter (cbm) = 1000 Kubikdezim (cdm).
1 Meter = 10 Dezim. (dm).	1 Quadratmeter = 100 Quadratdezim. (qdm).	1 Kubikdezim. = 1000 Kubikzent. (ccm).
1 Dezimeter = 10 Zentim. (cm).	1 Quadratdezimeter = 100 Quadratzentim. (qcm).	1 Kubikzentim. = 1000 Kubikmill. (ccm).
1 Zentimeter = 10 Millim. (mm).	1 Quadratzentimeter = 100 Quadratmill. (qmm).	1 Kubikdezim. = 1 Liter (l).

Preussisches Maß durch Metermaß ausgedrückt.	Metermaß durch preussisches Maß ausgedrückt.
1 preuß. Fuß = 0,31385 Meter.	1 Meter = 3,18620 Fuß = 38,234 Zoll = 458,81 Linien preuß.
1 " Zoll = 0,02615 "	1 Quadratmeter = 10,1519 Quadratfuß = 1461,87 Quadrat Zoll "
1 " Linie = 0,00218 "	1 Kubikmeter = 32,3459 Kubikfuß = 55893,7 Kubik Zoll "

Gewichte.
1 Quadratzoll preuß. = 0,09850 Quadratmeter.
1 Quadrat Zoll " = 6,841 Quadratzentimeter.
1 Kubikfuß preuß. = 0,03092 Kubikmeter.
1 Kubik Zoll " = 17,891 Kubikzentimeter.
1 deutsche Bahnmeele = 7532 Meter.
1 geographische Meile, d. i. der 15. Teil eines Äquator-grades = 7420 Meter.

Ein Kilogramm (kg) ist das Gewicht eines Kubikdezimeters, d. i. eines Liters reinen Wassers bei seiner größten Dichtigkeit (4° C).

- 1 Tonne (t) = 1000 Kilogramm (kg).
- 1 Kilogramm = 1000 Gramm (g).
- 1 Gramm = 1000 Milligramm (mg).

Alphabetisches Register.

A.

Aberration, sphärische 251.
Abplattung der Erde 81.
Absolute Festigkeit 95.
Absolute Feuchtigkeit 219.
Absolute Temperatur 181.
Absolutes Maßsystem 27.
Absolut schwarzer Körper 229, 296.
Absorption der Gase 135.
Absorption strahlender Energie 294, 295.
Absorptionsspektrum 299.
Ächromasie 257.
Achse einer Linse 245.
Achse eines Hohlspiegels 233.
Aderhaut 261.
Adhäsion 93.
Aggregatzustände 90, 186.
Akkommodation 262.
Akkumulator 358, 386.
Aktion und Reaktion 29.
Alkoholometer 116.
Ampère, Einheit der Stromstärke 362.
Ampèremeter 364, 372.
Ampères elektrodynamische Gesetze 395.
Ampères Schwimmregel 359.
Ampères Theorie des Magnetismus 395.
Ampèrewindung 388.
Amplitude 17.
Amylazetatlampe 227.
Analytator 287.
Andrews, kritische Temperatur 198.
Aneroidbarometer 124.
Anion 384.
Anker eines Magneten 307, 390, 391.
Anker, Siemenscher Doppel-T= 408.
Anker, Grammescher Ring 409.
Anode 380.
Antrieb der Kraft 30.
Äquivalente, chemische 384.
Äquivalenz von Wärme und mechanischer Arbeit 204.

Arago, Elektromagnetismus 388.
Arago, Rotationsmagnetismus 407.
Aräometer 116.
Arbeit, Begriff 30, 37.
Arbeit, Satz von der Erhaltung 55.
Arbeitseffekt 31.
Arbeitsfähigkeit des elektr. Stromes 376.
Archimedes, Hebelsatz 45.
Archimedisches Prinzip 112.
Astasierung 363.
Astronomisches Fernrohr 272.
Äther 137, 207, 278, 295, 347, 389, 421.
Atmosphäre, Dichtigkeit 125.
Atmosphäre, Druck einer 124.
Atmosphärische Elektrizität 347.
Atmosphärische Strahlenbrechung 242.
Atome 91.
Atomwärme 185.
Atwoodsche Maschine 24, 27, 57, 61, 103.
Auflösung 119.
Auftrieb 113.
Auge 261.
Augustisches Psychrometer 221.
Ausdehnungskoeffizient 177.
Ausdehnung beim Erstarren 190.
Ausfluggeschwindigkeit 111.
Äußerer Widerstand 367, 371, 373.
Außerordentlicher Strahl 289.

B.

Barometer 122.
Barometrische Höhenmessung 126.
Barometrische Maxima und Minima 217.
Batterie Leidener Flaschen 343.
Bequerelstrahlen 419.
Beharrungsvermögen 20.
Beleuchtungsstärke 227.
Bellsches Telephon 412.
Beschleunigung 5, 8, 14, 16, 58, 68.
Beugung des Lichtes 283.
Beugungsspektrum 286.

Bewegung, allgemeine Central= 74.
 Bewegung, geradlinige 3.
 Bewegung, gleichförmige Kreis= 13, 68.
 Bewegung, gleichförmige, auf einer Kurve 73.
 Bewegung, ungleichförmige, auf einer Kurve 73.
 Bewegung, Dreh= 58.
 Bewegung, Fall= 22.
 Bewegung, Wurf= 23.
 Bewegungsgesetze Newtons 20, 27, 29.
 Bewegungsgröße 30, 99.
 Biegsamkeit 95.
 Bild, reelles und virtuelles 231.
 Bilder durch kleine Öffnungen 226.
 Bilder kleiner Flächen 234, 248.
 Blasinstrumente 164.
 Blinder Fleck 264.
 Blig, Bligableiter 349, 350.
 Blutwärme 203.
 Bodendruck 106.
 Bodentemperatur 213.
 Bogenlicht 378.
 Bolometer 295.
 Bouguers Photometer 228.
 Bourdon's Aneroidbarometer 124.
 Boyle'sches Gesetz 125.
 Branly'sche Röhre 422.
 Brechung des Lichtes 236.
 Brechung, doppelte, des Lichtes 288.
 Brechung einer ebenen Welle 148.
 Brechung elektrischer Wellen 422.
 Brechungsgesetz, Snellius'sches 238.
 Brechungsquotient, Bestimmung 238, 245.
 Breguet's Metallthermometer 179.
 Brennweite und Brennpunkt 234, 248.
 Brewster's Stereoskop 267.
 Brewster'scher Winkel 287.
 Brillengläser 263.
 Brücke, Wheatstone'sche 373.
 Brückenwaage 48.
 Brunnen, artesische 112.
 Bunsen, Spectralanalyse 297.
 Bunsenbrenner 294.
 Bunsen'sches Galvanometer 185.
 Bunsen'sches Element 357.
 Bunsen'sches Photometer 229.
 Bunsen's Ballot's Windgesetz 217.
 Büschelentladung 328.

C.

Camera obscura 271.
 Cavendish, Drehwaage 81.
 Celsius, Thermometer 175.

CGS-System 28.
 Chemische Stromwirkungen 380.
 Chemische Vorgänge in galvanischen Elementen 387.
 Chemische Wirkungen des Lichtes 272, 295, 300.
 Chemisches Maß der Stromstärke 383.
 Chladni'sche Figuren 164.
 Chromatische Abweichung bei Linsen 258.
 Chromatische Polarisation 291.
 Coulomb, das 330, 363.
 Coulomb'sches Gesetz 305, 328.
 Crookes 418.

D.

Daguerre 272.
 Dalton's Gesetz 134, 193.
 Dampfdichte 195.
 Dämpfe, Eigenschaften 193.
 Dämpfe, Verflüchtigung 197.
 Dampfmaschine 207.
 Dampfspannung 194.
 Daniell'sches Element 357.
 Dauer des elektrischen Funkens 346, 420.
 Dauer des Lichteindrucks 264.
 Davy's Eischnmelzungsversuch 203.
 Davy's Entdeckung von K und Na 382.
 Davy's Sicherheitslampe 201.
 Davy'scher Lichtbogen 378.
 Declination 308, 311.
 Destillation 192.
 Deutliche Sehweite 263.
 Dewar'sche Flasche 199, 201.
 Dezimalwaage 48.
 Diamagnetische Körper 388.
 Diapason 158.
 Diatonische Tonleiter 162.
 Dichte 28.
 Dichte der Erde 81.
 Dichte des Wasserdampfes 195.
 Dichte, elektrische 316.
 Dielektrikum 346.
 Dielektrische Konstante 341.
 Differentialflaschenzug 50.
 Differentialthermometer 295.
 Differenztöne 169.
 Diffraction des Lichtes 283.
 Diffuse Zurückwerfung des Lichtes 229.
 Dimensionsbegriff 28.
 Dimensionsformeln magnetischer und elektrischer Einheiten 424.
 Dioptrie 248, 263.
 Dispersion 252.
 Döbereiner's Zündmaschine 136.

Doppelbrechung 288.
 Doves Winddrehungsgeſetz 219.
 Drehbewegungen 58.
 Drehung der Polarifationsebene 293.
 Drehungsmoment 46.
 Drehwage 81, 329.
 Druck der Atmoſphäre 124.
 Druck der Flüſſigkeiten 105.
 Druck, elektroſta tiſcher 320.
 Druckfeſtigkeit 95.
 Druckpumpe 130.
 Duſay 314.
 Dulong-Petitſches Geſetz 185.
 Durchſichtigkeit 224.
 Dyn 28.
 Dynamoelektriſches Prinzip 408.
 Dynamomaſchine 409.

G.

Ebbe und Flut 87.
 Ebene, ſchiefe 51, 103.
 Echo 156.
 Effekt 31.
 Effektive Leiſtung 210.
 Galorimeter 185.
 Gaſmaſchinen 193.
 Elaſtiſcher Stoß 99.
 Elaſtizität 94.
 Elektriſche Dichte 316.
 Elektriſche Erregung auf chem. Wege 351.
 Elektriſche Erregung durch Induktion 398.
 Elektriſche Erregung durch Inſtuenz 316.
 Elektriſche Erregung durch Reibung 312.
 Elektriſche Kapazität 332, 336.
 Elektriſche Kraft 328.
 Elektriſche Schirmwirkung 319.
 Elektriſche Wellen 419.
 Elektriſcher Zuſtandsgrad 331.
 Elektriſches Feld 337.
 Elektriſches Licht 377.
 Elektriſches Potential 333.
 Elektriſiermaſchinen 322, 324.
 Elektroden 380.
 Elektrodynamik 393.
 Elektrolyſe, Theorie der 384.
 Elektromagnet 388.
 Elektromagnet iſches Maßſyſtem 362, 396,
 401, 425.
 Elektrometer 330.
 Elektromotor 392.
 Elektromotoriſche Kraft 354.
 Elektromotoriſche Kraft des Induktions-
 ſtromes 401.

Elektromotoriſche Kraft von Thermo-
 elementen 423.
 Elektron 385, 418.
 Elektrophor 321.
 Elektroſtop 314.
 Elektroſtatiſt 312.
 Elektroſtatiſcher Druck 320.
 Elektroſtatiſches Maßſyſtem 329, 333, 334,
 425.
 Elemente, galvan iſche 356, 387.
 Emission und Abſorption 294.
 Emissionshypothese 278.
 Energie des elektriſchen Stromes 376.
 Energie, elektriſche Ladungs- 340.
 Energie, Geſetz von der Erhaltung 57,
 99, 202, 401, 427.
 Energie, ſtrahlende 295.
 Energie, Übertragung elektriſcher 411.
 Entfernungsſchätzung 267.
 Entladung durch Funken 328, 343, 346, 415.
 Entladungserscheinungen in Gaſen 299,
 328, 417.
 Erdbefchleunigung 22, 27, 66, 81.
 Erdfernrohr 273.
 Erdmagnetismus 308.
 Erdbſchwere 80.
 Erg 31.
 Ergänzungsfarben 257.
 Erhaltung der Energie 57, 99, 204, 401,
 427.
 Erhaltung der Materie 26, 427.
 Erſtarren 187.
 Erſtarrensverzug 188.
 Erſter Hauptſatz der mechaniſchen Wärme-
 theorie 205.
 Experimentum crucis 255.
 Extraordinärer Strahl 289.
 Extraſtröme 405.

H.

Fahrenheit's Thermometer 175.
 Fallmaſchine, Atwoods 24, 27, 57, 61, 103.
 Fallverſuche Galileis 22.
 Farad 336.
 Faradays elektrolytiſche Geſetze 383.
 Faradaysches Gefäß 320.
 Faradaysches Modell 403.
 Farben der Körper 295.
 Farben dünner Blättchen 282.
 Farbenerſcheinungen im polarifirten Licht
 291.
 Farbenringe, Newton'sche 283.
 Farbenscheibe 257, 328.

- Farbenzerstreuung, Grundversuche 252.
 Fata morgana 242.
 Fedderjenische Versuche 346.
 Feld, elektrisches 337, 347.
 Feld, magnetisches 306, 308.
 Feld, magnetisches, eines Stromes 359, 396.
 Fernpunkt des Auges 262.
 Fernrohre 272.
 Fernsprecher 412.
 Fernwirkungen 136.
 Feste Körper 90.
 Festigkeit 95.
 Fetteslecfphotometer 229.
 Feuchtigkeit der Luft 219.
 Feuersprige 131.
 Fieberthermometer 176.
 Figuren, Chladnische 164.
 Fizeau, Geschwindigkeit des Lichtes 276.
 Fizeau, Kondensator 415.
 Flächensatz 74.
 Flageolett-Töne 164.
 Flamme, empfindliche 154.
 Flamme, manometrische 166.
 Flamme, tönende 167.
 Flasche, Dewarsche 199, 201.
 Flasche, Leidener 342.
 Flaschenzug 50.
 Fluida, elektrische 317.
 Fluoreszenz 300.
 Flüssigkeitswellen 137.
 Flut 87.
 Foucault, Lichtgeschwindigkeit 277.
 Foucault, Pendelversuch 73.
 Foucaultsche Ströme 407.
 Franklin 319, 347, 350.
 Franklinsche Tafel 342.
 Fraunhoferische Beugungserscheinungen 285.
 Fraunhoferische Linien 255, 299.
 Frequenz eines Wechselstromes 404.
 Fresnels Erweiterung des Huygensschen Prinzips 145.
 Fresnels Spiegelversuch 280.
 Fresnelsche Beugungserscheinungen 284.
 Fritter 422.
 Funkeninduktor 414.
 Funken Telegraphie 422.
- 6.**
- Galileis Fallversuche 22.
 Galileis Pendelversuche 62.
 Galileisches Fernrohr 273.
 Galvanis Beobachtung 351.
 Galvanischer Strom 354.
 Galvanometer 364.
 Galvanoplastik 383.
 Gase 121.
 Gasmotor 211.
 Gay-Lussacs Gesetz 180.
 Gedeckte Pfeifen 166.
 Gefäße, kommunizierende 109.
 Gefrieren des Wassers 180, 188, 190.
 Gegenwirkung 29.
 Gehörorgan 170.
 Geißlerische Röhren 299, 416.
 Gekreuzte Prismen 256.
 Gekrümmte Strahlen 242.
 Gelber Fleck 262.
 Geometrische Bewegungslehre 3.
 Gesättigter Dampf 194.
 Gesättigter Wasserdampf, Spannkraft 196.
 Geschwindigkeit 3, 4, 7.
 Geschwindigkeit des Lichtes 274.
 Geschwindigkeit des Schalles 142, 155.
 Geschwindigkeit elektrischer Wellen 422.
 Geschwindigkeit von Seilwellen 141.
 Geschwindigkeit von Wasserwellen 138.
 Gesichtswinkel 265.
 Gewicht 27.
 Gewicht spezifisches 28, 115.
 Gewichtsverlust 112, 132.
 Gewitter 349.
 Gilbert 302, 312.
 Gitterpektrum 286.
 Gleichförmig beschleunigte Bewegung 5.
 Gleichförmige Bewegung 3.
 Gleichförmige Drehungen 58.
 Gleichförmige Kreisbewegung 13, 68.
 Gleichgewicht fester Körper in Flüssigkeiten 112.
 Gleichgewichtsarten 41.
 Gleichstrommaschine 405, 409.
 Gleisförmige Bewegung 190.
 Glümladung 328, 417.
 Glühlampe 377.
 Glühlampe, Kernische 366, 378.
 Gradient 217.
 Grammescher Ring 409.
 Gramm-Kraft 27.
 Gramm-Masse 28.
 Grauglut und Rotglut 264.
 Graupeln 222.
 Gravitationsgesetz 78.
 Gravitationskonstante 81.
 Gray 313.

Grenzwinkel 241, 253.
 Grundeis 216.
 Grundton 162.
 v. Guericke, Luftpumpe 133.

G.

Haarhygrometer 221.
 Haarröhrchen 119.
 Hagel 222.
 Halbschatten 226.
 Handregel 359, 397, 401.
 Harmonische Obertöne 167.
 Härte 93.
 Hauptschlusmaschine 410.
 Hauptschnitt eines Kristalls 289.
 Hauptschnitt eines Prismas 243.
 Hebel 44.
 Hebelwage 47.
 Heber 129.
 Heberbarometer 123.
 Hefnerkerze 227.
 Helligkeit 228.
 Henrys Absorptionsgesetz 135.
 Heronsball 130.
 Herzische Versuche 420, 421.
 Höfe von Sonne und Mond 286.
 Höhenmessung, barometrische 126.
 Hohlspiegel 233.
 Holländisches Fernrohr 273.
 Holzische Influenzmaschine 324.
 Homozentrische Strahlenbüschel 231.
 Hornhaut 261.
 Hughes, Mikrophon 412.
 Huygenssches Okular 270.
 Huygenssches Prinzip 144.
 Hydraulische Presse 105.
 Hygrometer 221.
 Hypsometrisches Thermometer 191.

H.

Jahrestemperatur 213.
 Identische Stellen der Nethaut 266.
 Indifferentes Gleichgewicht 41.
 Indifferenzzone eines Magneten 302.
 Indizierte Leistung 210.
 Induktion, elektrische 398.
 Influenz, elektrische 316.
 Influenzmaschine 324.
 Inklination 308, 311.
 Innerer Widerstand 367, 371, 373.
 Interferenz des Lichtes 280.
 Interferenz des Schalles 168.

Interferenz elektrischer Wellen 421.
 Interferenz von Wasserwellen 143.
 Intervall, musikalisches 161.
 Ionen 384.
 Ionisierung der Luft 349, 418.
 Joule, das 31.
 Joules Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents 206.
 Joulesches Gesetz 375.
 Irradiation 265.
 Isobaren 217.
 Isochimenen, Isotheren, Isothermen 213.
 Isochrome Schwingungen 17, 62, 65, 139, 160.
 Isodynamen, Isogonen, Isoklinen 309.
 Isolator 313.

K.

Kalkspat, Doppelbrechung 288.
 Kalmen 218.
 Kalorimeter 184.
 Kalorimetrie 182.
 Kältemischungen 189.
 Kammerton 163.
 Kapazität eines Akkumulators 387.
 Kapazität, elektrische 332, 336.
 Kapazität, Wärme- 185.
 Kapillarität 119.
 Kathode 380.
 Kathodenstrahlen 417.
 Kation 384.
 Kehlkopf 171.
 Keil 53.
 Keplers Fernrohr 272.
 Keplersche Regeln 76.
 Kernschatten 226.
 Kilogramm 28.
 Kilogrammter 31.
 Kimmung 242.
 Kinetische Energie 57.
 Kirchhoffs Gesetz über Emission und Absorption 296, 299.
 Klangfarbe 168.
 Klangfiguren 164.
 Kleistsche Flasche 342.
 Klemmenspannung 371.
 Klingelapparat 390, 406.
 Knallgasvoltmeter 383.
 Knoten stehender elektrischer Wellen 422.
 Knoten stehender Wellen 150.
 Knoten stehender Wellen in Pfeifen 165.
 Knoten stehender Wellen von Platten 164.
 Knoten stehender Wellen von Saiten 164.

Kohärer 422.
 Kohäsion 92.
 Kolloide 119.
 Kombinationsstöne 169.
 Kommunizierende Gefäße 109.
 Kommutator 416.
 Kompensationspendel 179.
 Komplementärfarben 257.
 Kompressibilität von Flüssigkeiten 106.
 Kompressionspumpe 132.
 Kondensation der Dämpfe 197.
 Kondensator einer Dampfmaschine 208.
 Kondensator, elektrischer 340.
 Konduktor 313.
 Königsche Peise 166.
 Konisches Pendel 70.
 Konkavspiegel 233.
 Konstante Elemente 357.
 Kontinuierliches Spektrum 254, 297.
 Konvexspiegel 236.
 Körperliches Sehen 266.
 Kraft, elektrische 328.
 Kraft, elektromotorische 354, 401, 424.
 Kraft, lebendige 32.
 Kraft, magnetische 305.
 Kraft, mechanische 19.
 Krasteinheit 27.
 Kräftemittelpunkt 39.
 Kräftepaar 40.
 Kräfteparallelogramm 35.
 Kraftlinien des Erdfeldes 86.
 Kraftlinien eines elektrischen Stromes
 359, 360.
 Kraftlinien, elektrische 338.
 Kraftlinien, magnetische 306.
 Kraftübertragung, elektrische 411.
 Kran 52, 96.
 Kristalloide 119.
 Kritische Temperatur 198.
 Krummlinige Bewegungen 68.
 Krümmung von Lichtstrahlen 242.
 Kubischer Ausdehnungskoeffizient 177.
 Kundsche Staubfiguren 166.

Q.

Labiles Gleichgewicht 42.
 Ladung, Dichte der 316.
 Ladung, Sitz der 315.
 Ladungseinheit, elektromagnetische 363,
 426.
 Ladungseinheit, elektrostatische 329.
 Ladungsenergie, elektrische 340.
 Landbrise 218.

Lanesche Maßflasche 343.
 Lebendige Kraft 32.
 Leidener Flasche 342.
 Leidenfroische Erscheinung 196.
 Leiter der Elektrizität 313.
 Leiter 1. und 2. Ordnung 365.
 Leitung der Wärme 199.
 Leitungswiderstände, elektrische 364.
 Lenzische Regel 400.
 Leslies Differentialthermometer 295.
 Leuchtkraft 227.
 Licht, Ansichten über die Natur des
 Lichtes 278.
 Licht und Lichtempfindung 224.
 Lichtbogen, elektrischer 378.
 Lichteinheit 227.
 Lichtgeschwindigkeit 274.
 Lichtstrahlen 146, 225.
 Linearer Ausdehnungskoeffizient 177.
 Linienpektrum 297.
 Linsen 245.
 Lippenpeise 165.
 Lochkamera 227.
 Lodge, Resonanzversuch 421.
 Longitudinalschwingungen 141.
 Lösung 119.
 Luft, spezifisches Gewicht der 125.
 Luftballon 133.
 Luftdruck, Anwendungen 129.
 Luftdruck, Messung 124.
 Luftpumpe 131.
 Luftspiegelung 243.
 Lufttemperatur 216.
 Lummer: Brauglut und Rotglut 264.
 Lummer: Strahlung des abs. schwarzen
 Körpers 297.
 Lupe 269.

M.

Machsches Pendel 63.
 Magdeburger Halbkugeln 131.
 Magnetische Kraft 305.
 Magnetische Schirmwirkung 307.
 Magnetische Wirkungen des Stromes 359,
 388.
 Magnetisches Feld 306.
 Magnetisches Moment 309.
 Magnetismus 302.
 Malus, Polarisation durch Reflexion 287.
 Manometer 128.
 Marconi, drahtlose Telegraphie 422.
 Mariottescher Fleck 264.
 Mariottesches Gesetz 126.

Maschinen, einfache 43.
 Masse 25.
 Massenanziehung 77.
 Maßsystem, elektromagnetisches 362, 396,
 401, 425.
 Maßsystem, elektrostatisches 329, 333, 334,
 425.
 Maßsystem, terrestrisches und absolutes 27.
 Mathematisches Pendel 63.
 Maximum der Dampfdichte 194.
 Maximum der Stromstärke 374.
 Maximum und Minimum, barometrisches
 217.
 Maximum- und Minimumthermometer
 176.
 Maxwell 280, 422.
 Mechanischer Wirkungsgrad 211.
 Mechanisches Wärmeäquivalent 204.
 Meidingersches Element 357.
 Meridian, magnetischer 308.
 Metallthermometer 179.
 Meteorologische Erscheinungen 212.
 Mikrofarad 336.
 MikrometerSchraube 55.
 Mikrophon 412.
 Mikroskope 269.
 Minimum der Ablenkung in Prismen 245.
 Mischen farbiger Lichter 257.
 Mischen von Farbstoffen 295.
 Mischungsmethode 182.
 Mitschwingen, elektrisches 420.
 Mitschwingen fester Körper 157.
 Mittelpunkt paralleler Kräfte 39.
 Molekeln 91.
 Molekularbewegung 93.
 Molekularkräfte 92.
 Molekularmagnete 303.
 Moment, Drehungs- 46.
 Moment, magnetisches 309.
 Mondfinsternis 226.
 Mondhöfe 286.
 Monochord 159.
 Morse-Telegraph 390.
 Motor, elektrischer 392.
 Motor, Gas- 211.
 Multiplikationsprinzip 323.
 Multiplikator 363.

N.

Nachbilder 265.
 Nahepunkt des Auges 263.
 Natürlicher Magnet 302.
 Nebel 221.

Nebelregenbogen 261.
 Nebenschlußmaschine 410.
 Kernstiche Glühlampe 378.
 Netzhaut 262, 264.
 Newtomens Dampfmaschine 207.
 Newtons Bewegungsgesetze 20, 27, 29.
 Newtons Farbenringe 283.
 Newtons Gravitationsgesetz 77.
 Newtons Spiegelteleskop 274.
 Newtons Versuche über Farbenzerstreuung
 253.
 Nicol'sches Prisma 290.
 Niveauflächen 86, 338.
 Normalbeschleunigung 73.
 Normales Spektrum 286.
 Rörrernbergs Polarisationsapparat 287.

O.

Oberfläche einer Flüssigkeit 104.
 Oberflächenspannung 118.
 Obertöne 167.
 Objektiv 270, 272, 273.
 Oerstedts Entdeckung 358.
 Offene Pfeifen 166.
 Öffnungsfunkte 378.
 Öffnungsstrom 405.
 Ohm, Widerstandseinheit 365, 375.
 Ohm'sches Gesetz 367.
 Ohr 170.
 Okular 270, 272, 273.
 Operngunder 273.
 Optische Achse 288, 290.
 Optischer Mittelpunkt 246.
 Optometer 263.
 Ordentlicher Strahl 289.
 Orgelpfeifen 165.
 Osmose 120.
 Oszillatorische Entladung 346, 420.
 Ozon 345.

P.

Papins Dampfmaschine 207.
 Papin'scher Topf 191.
 Parallelogramm der Beschleunigungen 11.
 Parallelogramm der Bewegungen 8.
 Parallelogramm der Geschwindigkeiten 10.
 Parallelogramm der Kräfte 35.
 Parallelschaltung 353.
 Paramagnetische Körper 388.
 Pascalscher Apparat 107.
 Passatwinde 218.
 Peltiereffekt 424.

Pendel, einfaches 61.
 Pendel, konisches 70.
 Pendel, physisches 64.
 Pendel, Reversions- 66.
 Pendeluhr 67.
 Periode eines Wechselstromes 404.
 Perpetuum mobile 428.
 Pferdestärke 32.
 Phase einer Schwingung 17.
 Phosphoreszenz 301.
 Photographie 272.
 Photometrie 228.
 Polarisation des Lichtes 286.
 Polarisation, galvanische 385.
 Polarisationsebene 287, 290.
 Polarisationsebene, Drehung der 293.
 Polarifator 287.
 Polarität, Gesetz der 303.
 Polstärke 305.
 Porosität 91.
 Portas Dunkelkammer 272.
 Potential der Erdschwere 83.
 Potential, elektrisches 333.
 Potentialdifferenz 352, 354.
 Potentialflächen 84, 334, 337.
 Potentielle Energie 57.
 Prinzip der Aktion und Reaktion 29.
 Prinzip der virtuellen Verschiebungen 55.
 Prinzip von der Superposition der Schwingungen 143.
 Prinzip von der Unabhängigkeit der Bewegungen 9.
 Prisma 243, 253.
 Prisma, Minimum der Ablenkung 245.
 Prisma, Nicol'sches 290.
 Prismen, gekreuzte 256.
 Prismenfernrohr 274.
 Probefugel 316.
 Projektionsapparat 271.
 Psychrometer 221.
 Pyrometer 182.

R.

Radioaktivität 419.
 Radiometer 296.
 Reaktion 29.
 Réaumur 175.
 Reduktionsfaktor 363.
 Reduzierte Pendellänge 65.
 Reelles Bild 231.
 Reflexion des Lichtes 229.
 Reflexion des Schalles 156.
 Reflexion durch Stoß 101, 148.
 Reflexion elektrischer Wellen 421.

Reflexion, totale 241.
 Reflexion von Flüssigkeitswellen 146.
 Reflexion von Seilwellen 150.
 Regulation des Eises 190.
 Regen 222.
 Regenbogen 258.
 Reibung 20, 102.
 Reif 223.
 Relative Feuchtigkeit 219.
 Remanenz 304.
 Resonanz, elektrische 420.
 Resonanz, akustische 158.
 Resonatoren 167, 421.
 Reversionspendel 66.
 Rezipient 131.
 Rheoford 367.
 Rheostat 366.
 Richmann'sche Regel 183, 184.
 Rolle 49.
 Römer, Geschwindigkeit des Lichtes 274.
 Röntgenstrahlen 418.
 Rostiges Metall 188.
 Rotation beweglicher Magnete und Ströme 396.
 Rückstand, elektrischer 346.
 Rühmforff's Funkeninductor 415.
 Rumford's Photometer 229.

S.

Saitenschwingungen 163.
 Sackcharimeter 293.
 Sammellinse 247.
 Saugpumpe 130.
 Säule, Thermo- 424.
 Säule, Zamboni'sche 353.
 Schallfortpflanzung 155.
 Schallgeschwindigkeit 143, 156.
 Schallstärke 156.
 Schallwellen 142, 154.
 Schaltung von Leibner's Flaschen 343.
 Schaltung von Elementen 352, 373.
 Schatten 225.
 Schätzung der Entfernung 267.
 Scheinbare Größe 265.
 Scheiner'scher Versuch 264.
 Schiebersteuerung 209.
 Schiefe Ebene 51.
 Schirmwirkung, elektrische 319.
 Schirmwirkung, magnetische 307.
 Schlittenapparat 414.
 Schmelzen 187.
 Schmelzwärme 188.
 Schnee 222.

- Schraube 54.
 Schraubenleere 55.
 Schwebungen 169.
 Schwerpunkt 40.
 Schwingungen des Äthers 137, 207, 278,
 295, 421.
 Schwingungen eines Seiles 140, 150.
 Schwingungen, einfache 15.
 Schwingungen, elastische 139.
 Schwingungen elastischer Scheiben 164.
 Schwingungen, transversale und longi-
 tudinale 140.
 Schwingungen von Luftsäulen 164.
 Schwingungen von Saiten 163.
 Schwingungen, Zusammenziehung 18, 140.
 Schwingungsdauer 17.
 Schwingungsmittelpunkt 16.
 Schwingungszahl der Farben 282.
 Schwingungszahl der Töne 163.
 Schwungrad 59.
 Seebriese 218.
 Segnersches Wasserrad 109.
 Sehen, körperliches 266.
 Sehen mit zwei Augen 266.
 Sehnerv 262, 264.
 Sehweite, deutliche 263.
 Seilmaschinen 49.
 Seilwellen 140, 150.
 Seitendruck 108.
 Sekundenpendel 64.
 Selbstinduktion 405.
 Selen, Widerstand 366.
 Serienmaschine 410.
 Serienmotor 393.
 Sertant 232.
 Sicherheitslampe, Davysche 201.
 Sieden 190.
 Siedepunkte 191.
 Siemens, dynamoelektrisches Prinzip 408.
 Siemens, Widerstandseinheit 364.
 Siemensscher Doppel-T-Anker 408.
 Singende Flamme 167.
 Sirene 160, 161.
 Sitz der elektrischen Ladung 315.
 Snellius, Brechungsgeßez 238.
 Solarkonstante 202.
 Solenoid 394.
 Solwage 116.
 Sonnenfinsternis 226.
 Sonnenhalbmesser und Sonnenmasse 83,
 84.
 Sonnenmikroskop 270.
 Sonnenspektrum 255, 295, 299.
 Sonnentemperatur 202, 297.
 Spannung der Dämpfe 193.
 Spannungsdifferenz, elektrische 354.
 Spannungskoeffizient der Gase 181.
 Spektralanalyse 297.
 Spektralapparat 298.
 Spektrale Farben, Vereinigung 256.
 Spektrum, Beugungs= 286.
 Spektrum, Brechungs= 252.
 Spektrum, Reinheit 254.
 Spezifische Wärme 183.
 Spezifische Wärme der Gase 186, 204.
 Spezifischer Leitungswiderstand 365.
 Spezifisches Gewicht 28.
 Spezifisches Gewicht, Bestimmung 115.
 Spezifisches Wärmeleitungsvermögen 200.
 Sphärische Abweichung 250.
 Spiegel, ebener 230.
 Spiegel, Kugel= 233.
 Spiegel, parabolischer 236.
 Spiegel, unbelegter 232.
 Spiegelbilder 231.
 Spiegelteleskop 274.
 Spitzenwirkung, elektrische 320.
 Springbrunnen 112.
 Stäbchen der Nethaut 264.
 Stabiles Gleichgewicht 42.
 Stabilität 42.
 Stahlmagnete 302, 304.
 Stärke des magnetischen Feldes 306.
 Stärke des Schalles 156.
 Stationäre Strömung 358, 370.
 Staubfiguren, Kundtsche 166.
 Stechheber 130.
 Stehende elektrische Wellen 421.
 Stehende Wellen 150.
 Steinschleuder 69.
 Stereoskop 267.
 Stimmorgan 171.
 Stoß 97.
 Strahlenbrechung, atmosphärische 242.
 Strahlende Energie 295.
 Strahlungsgeßeze des absolut schwarzen
 Körpers 297.
 Stromeffekt 376.
 Stromstärke 358.
 Stromstärke, chemisches Maß 383.
 Stromstärke, Messung in absoluten Ein-
 heiten 362.
 Stromunterbrecher, selbsttätige 390, 406,
 414.
 Stromverzweigung 372.
 Subjektive Farben 265.

Sublimation 187.
 Superposition von Schwingungen 144.
 Symmetrische Hypothese 317.

I.

Tafel, Franklinsche 342.
 Tangentenbussole 360.
 Tau 222.
 Tauchelement 356.
 Taupunkt 219.
 Teilbarkeit 91.
 Telegraphie 390.
 Telegraphie ohne Draht 422.
 Telephon 411.
 Temperatur 175.
 Temperatur, absolute 181.
 Temperatur der Atmosphäre 216.
 Temperatur der Gewässer 215.
 Temperatur des Erdbodens 213.
 Temperatur, kritische 198.
 Temperaturstrahler 294.
 Terrestrisches Fernrohr 273.
 Terrestrisches Maßsystem 27.
 Thermischer Wirkungsgrad 206.
 Thermoelement 423.
 Thermometer, Thermoskop 174.
 Ton 153.
 Tonleiter 161.
 Torricellischer Versuch 122.
 Torsion 97.
 Totalreflexion 241.
 Trägheit 20.
 Trägheitsmoment 58.
 Trägheitsmoment, Bestimmung 59, 66.
 Trägheitswiderstand 29.
 Transformator für Gleichstrom 414.
 Transformator für Wechselstrom 413.
 Transversalschwingungen 140.
 Trockenelement 357.
 Tropfen, Leidensfrostscher 196.
 Tropfenbildung 117.
 Turmalinzange 288.

II.

Übereinanderlagerung elektrischer Felder 339.
 Übereinanderlagerung von Schwingungen 143.
 Überhitzter Dampf 194.
 Überflüchtig 263.
 Uhr 67.
 Ultrarote und ultraviolette Strahlen 295.

Unformer 413.
 Umkehrbarkeit des Lichtweges 238.
 Umkehrung der Spektrallinien 299.
 Unabhängigkeitsprinzip 9.
 Unbelegte Spiegel 232.
 Undulationshypothese 278.
 Unelastischer Stoß 98.
 Ungleichförmige Bewegung 4.
 Ungleichförmige Drehungen 58.
 Unitarische Hypothese 319.
 Unterbrecher, selbsttätiger 390, 406, 414.
 Uranstrahlen 419.

B.

Variationen des Erdmagnetismus 311.
 Varignon, Momentensatz 45.
 Veränderung des Aggregatzustandes 186.
 Verbreitung der Wärme 199.
 Verbrennungskraftmaschinen 211.
 Verbrennungswärme 202.
 Verdampfung 190.
 Verdampfungswärme 192.
 Verdunsten 192.
 Verflüssigung von Gasen 197.
 Vergrößerung, optische 268.
 Verzögerte Bewegung 6.
 Virtuelles Bild 231.
 Volt, das 334, 337, 369, 376, 402.
 Volt-Ampère 376.
 Voltaelement 351.
 Voltmeter 383.
 Voltas Entdeckung 351.
 Voltmeter 372.
 Volumenelastizität 106.
 Volumeter 116.

W.

Wage 47.
 Wagnerscher Hammer 406, 414.
 Wanderung der Zonen 384.
 Wärme, Ansichten über die Natur der 206.
 Wärme, tierische 203.
 Wärmeäquivalent 204.
 Wärmeeinfluß auf die elektrische Leitfähigkeit 366.
 Wärmeeinheit 182.
 Wärmekapazität 185.
 Wärmekraftmaschinen 207.
 Wärmeleitung 199.
 Wärmequellen 202, 203.
 Wärmestrahlung 199, 295.

Wärmeströmung 199, 201.
 Wärmewirkungen des galvanischen
 Stromes 375.
 Wasser, größte Dichtigkeit 180.
 Wasserstoffthermometer 181.
 Wasserwellen 137.
 Wasserwert eines Kalorimeters 185.
 Wasserzerlegung 380.
 Watt, das 32, 335, 376.
 Wattische Dampfmaschine 208.
 Wattische Schiebersteuerung 209.
 Wechselströme 403, 407, 411, 414.
 Wechselströme, Transformator für 413.
 Weitsichtigkeit 263.
 Wellenlänge, Begriff 138.
 Wellenlänge eines Tones 161.
 Wellenlänge elektrischer Wellen 422.
 Wellenlänge strahlender Energie 295.
 Wellenlänge von Farben 281.
 Wellrad 50.
 Wetterleuchten 350.
 Wheatstone'sche Brücke 373.
 Widerstand, elektrischer 364.
 Widerstandseinheit 364, 375.
 Wind, Entstehung 217.
 Winde 51.
 Winkelbeschleunigung 58.
 Winkelgeschwindigkeit 58.

Winkelspiegel 232.
 Wirkungsgrad, mechanischer 211.
 Wirkungsgrad, thermischer 206.
 Wolken 221.
 Wood'sches Modell 188.
 Wurfbewegung 23.

3.

Zambonische Säule 353.
 Zapfen der Rezhaut 264.
 Zentralbewegung, allgemeine 74.
 Zentralbewegung, kreisförmige 13, 68.
 Zentrifugalbahn 74.
 Zentrifugalkraft 69.
 Zentrifugalmaschine 71.
 Zentrifugalregulator 72.
 Zentripetalkraft 69.
 Zerstreuungslinse 250.
 Zugfestigkeit 95.
 Zungenpfeife 166.
 Zusammenfassung geradliniger Bewegun-
 gen 8.
 Zustandsgrad, elektrischer 331.
 Zustandsgrad und Potential 336.
 Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten 106.
 Zweiter Hauptsatz der mechanischen Wärme-
 theorie 206.

Anhang.

Die einfachsten chemischen Erscheinungen.

A. Eigenschaften einiger wichtigen Stoffe (metallischer und nichtmetallischer Zustand).

Schwermetalle.

§ 1. Gewisse Stoffe wie Gold, Silber, Eisen, Kupfer, § 1. Zink usw. sind als Metalle, besser Schwermetalle, allgemein bekannt. Sie sind undurchsichtig und eigentümlich (metallisch) glänzend, auffallend schwer, sowie gute Leiter der Wärme und Elektrizität. Mit einer einzigen Ausnahme — Quecksilber — sind sie bei gewöhnlicher Temperatur fest, werden jedoch beim Erhitzen flüssig. Sie lassen sich in allen möglichen Verhältnissen zusammenschmelzen, und zwar zu Stoffen, die wiederum metallische Eigenschaften zeigen (Metallgemische oder Legierungen, z. B. Messing mit 60—80 % Kupfer und einem Rest von Zink, Bronze mit 75—95 % Kupfer und Zusätzen von Zinn oder von Zinn und Zink, deutsches Münzensilber mit 90 % Silber und 10 % Kupfer, gemünztes Gold mit 90 % Gold und 10 % Kupfer). Auch Legierungen des Quecksilbers mit anderen Metallen — Amalgame genannt — lassen sich leicht darstellen (z. B. graugelbes Goldamalgam durch Auflösen von Gold in erwärmtem Quecksilber). Einige Metalle (Quecksilber, Zink usw.) sind auch im gasförmigen Zustand bekannt. Die meisten sind, was ebenso wie ihre Schmelzbarkeit für ihre Verwendung von großer Wichtigkeit ist, bei gewöhnlicher oder höherer Temperatur geschmeidig und können daher gehämmert, zu Blechen gewalzt, auch zu Drähten ausgezogen werden. Die Legierungen sind oft zum Guß und überhaupt zur Bearbeitung noch geeigneter als ihre Bestandteile für sich allein.

Trotz der großen, sofort in die Augen fallenden Ähnlichkeit unterscheiden sich doch die verschiedenen Metalle sehr wesentlich voneinander. Man beachte die Farbe, besonders beim Gold und Kupfer. Man vergleiche ferner Proben von ihnen mit den Mineralien der Härte skala (Talk Härtegrad 1, Stein Salz 2, Kalkspat 3, Flußspat 4, Apatit 5, Feldspat 6, Quarz 7, Topas 8, Korund 9, Diamant 10). Es zeigt sich, daß Blei das Mineral Talk ritzt, aber vom Stein Salz geritzt wird, also zwischen der ersten und zweiten

Härtestufe in der Mitte steht (Härte 1,5); Kupfer ist härter als Steinsalz, aber weicher als Kalkspat (Härte etwa unter 3) usw. Die Unterschiede im spezifischen Gewicht treten hervor, wenn man etwa gleich große Stücke der verschiedenen Metalle auf die Hand oder, noch besser, wenn man sie in Würfeln von 1 cm Seitenlänge auf die Waage bringt; man findet, daß 1 ccm Zink rund 7 g, 1 ccm Kupfer etwa 9 g, 1 ccm Blei etwa 11 g wiegt usw. Sehr verschieden sind auch die Schmelzpunkte. Quecksilber ist für gewöhnlich flüssig und erstarrt erst bei den Wintertemperaturen der polaren Länder; Zinn und Blei lassen sich im Porzellantiegel über der Gasflamme schmelzen; bei Zinkstäben wird es schon nötig, sie unmittelbar in die Flamme zu halten; für Kupfer und Eisen bedarf man besonderer Schmelzöfen; Platin verflüssigt sich erst in der außerordentlichen Hitze des elektrischen Lichtbogens. Genauere Angaben finden sich in der folgenden Übersicht, in der auch die lateinischen Namen nebst den hiervon abgeleiteten Abkürzungen, den chemischen Zeichen oder Symbolen, angegeben sind; die Anordnung ist nach dem spezifischen Gewicht getroffen.

Name	Zeichen	spez. Gewicht	Schmelzpunkt	Härte	Farbe	Zusammenhang der Zeichen
1. Antimon (Stibium)	Sb	6,62	440°	3	bläulich-grau	sehr spröde
2. Zink (Zincum) .	Zn	7,1	415°	2—3	bläulich-weiß	dehnbar bei 100—150°, sonst spröde
3. Zinn (Stannum)	Sn	7,29	233°	2—3	weiß	dehnbar
4. Eisen (reines) (Ferrum) ¹⁾ . .	Fe	7,86	1587°	weich	grauweiß	dehnbar
5. Kupfer (Cuprum)	Cu	8,9	1054°	2—3	rot	dehnbar
6. Silber (Argentum)	Ag	10,5	954°	2—3	weiß	sehr dehnbar
7. Blei (Plumbum)	Pb	11,37	322°	1,5	grau	dehnbar
8. Quecksilber (Hydrargyrum) . .	Hg	13,55	—39°	—	weiß	—
9. Gold (Aurum) .	Au	19,32	1035°	2—3	gelb	sehr dehnbar
10. Platin (Platina)	Pt	21,5	1800°	3	grauweiß	sehr dehnbar.

Metalle als Mineralien (gediegene Metalle).

§ 2. § 2. Die meisten dieser Metalle finden sich nicht in der Natur, sondern werden aus gewissen — Erze genannten — Mineralien gewonnen. Folgende kommen gediegen, d. h. fertig gebildet, in der

¹⁾ In den Gewerben wird statt des weichen und wenig festen reinen Eisens nur kohlehaltiges angewandt, und zwar (graues) Gußeisen (Kohlegehalt 2,5 bis 5%, spez. Gew. 7, Schmelzpunkt etwa 1200°, Härte 5), Stahl (Kohlegehalt 1 bis 2,3%, spez. Gewicht 7,7, Schmelzpunkt 1300° bis 1800°, Härte 6—7) und Schmiedeeisen (Kohlegehalt unter 0,5%, spez. Gew. 7,8, Schmelzpunkt um 1600°, Härte 3—4).

Erdrinde in beträchtlicher Menge vor: Gold, Platin, Silber und Kupfer. Alle vier kristallisieren in Formen des regulären Systems¹⁾, als Oktaedern, Würfeln, Rhombendodekaedern usw. (Fig. 1), bilden jedoch selten deutliche Kristalle; vielmehr kommen Au, Ag und Cu meistens in draht-, haar- und baumförmigen Stücken, in Körnchen, Flittern, Klumpen usw. vor, während das Pt meist in Körnern auftritt. Gediegenes Gold findet sich entweder auf ursprünglicher (primärer) Lagerstätte, in verschiedenen Gesteinsarten eingewachsen (Berggold), oder auf sekundärer Lagerstätte, d. h. in Sand und anderen lockeren Massen, die durch Verwitterung und Zertrümmerung

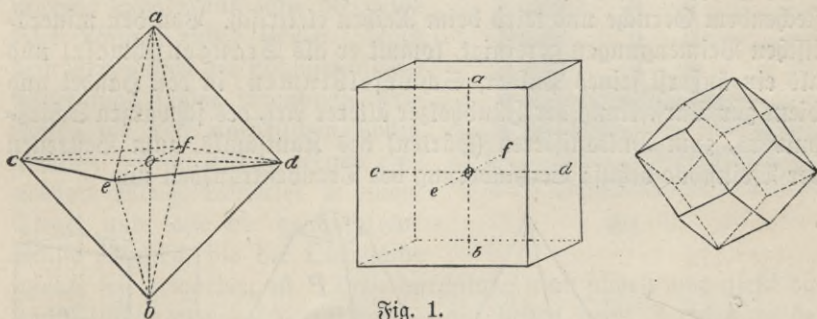


Fig. 1.

goldhaltiger Gesteine entstanden sind (Waschgold). Die wichtigsten Goldländer sind die Vereinigten Staaten von Nordamerika (Kalifornien), Australien und Südafrika (Transvaal). Gediegenes Silber kommt in Amerika (Vereinigte Staaten, Mexiko, Peru, Chile), auch in Deutschland usw. vor. Gediegenes Platin findet sich vor allem in Rußland, gediegenes Kupfer in Nordamerika (Oberer See). Zu bemerken ist, daß, während Au und Pt fast nur im gediegenen Zustande bekannt sind, Ag und Cu sich überdies in Erzen finden und daher auch künstlich gewonnen werden. Gediegenes Eisen ist im Gegensatz zu den Eisenerzen ein sehr seltener Stoff, kommt jedoch hin und wieder in kleineren und selbst in zentnerschweren Stücken vor; diese stammen meist von Meteoriten oder Feuerkugeln, d. h. kleinen, zur Erde gefallenem Himmelskörpern, die beim Pfeilschnellen Durchschneiden der Atmosphäre sich bis zum Glühen und Zerplatzen erhitzt hatten (Meteoreisen).

¹⁾ Die meisten Stoffe zeigen im festen Zustande in ihrem Innern nach verschiedenen Richtungen hin verschiedenes Verhalten; hiermit steht im Zusammenhang, daß sie bei ungestörtem Übergang aus dem flüssigen (oder gasförmigen) in den festen Zustand gesetzmäßig gestaltete, von ebenen Flächen begrenzte Körper, Kristalle genannt, bilden (kristallinischer Zustand). — In das reguläre Kristallsystem rechnet man alle Formen, welche auf drei gleich lange, sich rechtwinklig kreuzende Achsen bezogen werden können; dieses Achsenkreuz ist in Fig. 1 dem Oktaeder und Würfel eingezeichnet.

Nichtmetallische Stoffe (Schwefel, Phosphor), Allotropie.

§ 3. § 3. Vielen Stoffen fehlen die die Metalle auszeichnenden Eigenschaften; als Beispiele sollen Schwefel und Phosphor dienen.

Der Schwefel (Sulfur, chem. Zeichen S) ist ein in Formen des rhombischen Systems¹⁾, vor allem in einfachen wie an den Spitzen zugestumpften rhombischen Oktaedern (Fig. 2) kristallisierendes Mineral, das sich überall in vulkanischen Gegenden, ferner in großer Menge in den Kalk- und Gipslagern Siziliens sowie in Amerika findet. Spez. Gewicht = 2, Härte = 2, gelb, durchsichtig oder durchscheinend, fettig glänzend, sehr spröde. Er ist leicht entzündlich, verbrennt mit stechendem Geruche und wird beim Reiben elektrisch. Von den mineralischen Beimengungen gereinigt, kommt er als Stängenschwefel und als ein äußerst feines Pulver, Schwefelblumen, in den Handel und dient zur Darstellung der Zündhölzer älterer Art, des schwarzen Schießpulvers, zum Vulkanisieren (Härten) des Kautschuks, zum Bestreuen der Weinstöcke behufs Verhinderung der Traubenkrankheit usw.

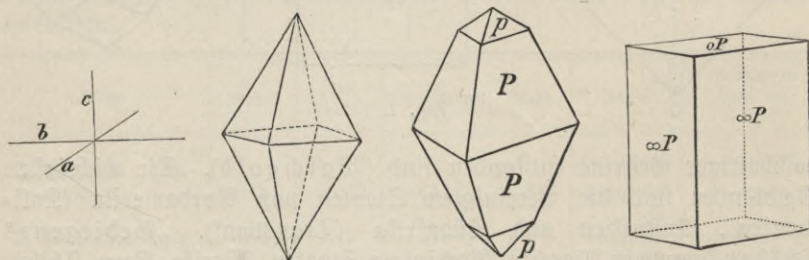


Fig. 2.

Man erhize Schwefelstücke im Probierglase. Sie schmelzen bei 115° zu einer gelben, leicht beweglichen Flüssigkeit, die bei weiterem Erhizen rotbraun und dickflüssig wie Honig, bei noch höherer Temperatur wieder dünnflüssig wird und sich bei 445° , dem Siedepunkt, in einen durchsichtigen, rotbraunen Dampf verwandelt. Beim allmählichen Erkalten werden diese Zustände wieder rückwärts durchschritten; gießt man jedoch die dem Sieden nahe, leicht bewegliche Flüssigkeit rasch in kaltes Wasser, so erstarrt sie zu einer hellgelben, bildsamen und fadenziehenden, kautschukartigen Masse, dem amorphen²⁾ oder plastischen Schwefel, den man für einen

¹⁾ Das rhombische System umfaßt diejenigen Formen, in denen drei ungleich lange, sich rechtwinklig schneidende Achsen a, b und c angenommen werden können. Die wichtigsten von ihnen sind die verschiedenen rhombischen Oktaeder, die rhombischen Säulen und die gerade Endfläche. Fig. 2 zeigt das Achsenkreuz, ein rhombisches Oktaeder, eine Kombination von diesem, P, mit einem stumpferen Oktaeder p und die Kombination einer rhombischen Säule ∞P mit den geraden Endflächen oP.

²⁾ Feste Stoffe, die wie Glas im Innern nach allen Richtungen hin gleichartig und daher der Kristallisation nicht fähig sind, heißen gestaltlos oder amorph.

gänzlich neuen Stoff halten würde, wenn er sich nicht im Laufe einiger Tage in gewöhnlichen spröden Schwefel zurückverwandeln würde. Am besten führt man den Versuch aus, indem man in einer Retorte mit weitem Halse Schwefel zum Sieden erhitzt und die im Halse kondensierte Flüssigkeit in Wasser fließen läßt (Fig. 3).

Man löse pulverisierten Schwefel in Schwefelkohlenstoff, einer wasserhellen, leicht entzündlichen (und daher mit großer Vorsicht zu behandelnden) Flüssigkeit, filtriere in eine Schale und lasse die gelbliche Lösung ruhig stehen. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels findet man schöne rhombische Kristalle, die den natürlichen völlig gleichen. Man erhitze ferner eine größere Menge Schwefel in einem Tiegel und lasse die geschmolzene Masse erkalten, bis die Oberfläche wieder fest geworden ist. Diese durchstoße man schnell und gieße das noch Flüssige aus. Es zeigt sich — am besten beim Zerbrechen des Tiegels —, daß auch im Innern schon ein Teil erstarrt war, und zwar zu langen spießigen Säulen, die sich vom gewöhnlichen Schwefel nicht nur durch hellere Farbe und Mangel an Sprödigkeit, sondern auch durch etwas geringeres spez. Gewicht und durch die Kristallform unterscheiden (prismatischer Schwefel). Auch diese Säulen, die sich immer bilden, falls die Kristallisation bei über 100° erfolgt, gehen von selbst in gewöhnlichen spröden Schwefel über, der daher als die beständige Form des Stoffes zu betrachten ist.

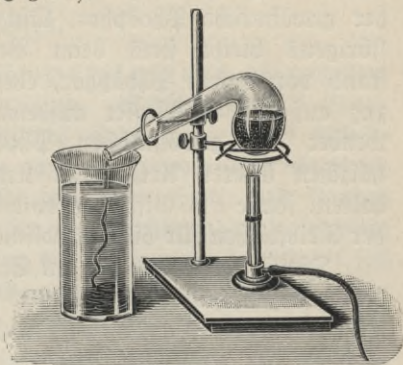


Fig. 3.

Der Phosphor (Phosphorus, chem. Zeichen P), ein in der Natur nicht vorkommender Körper, wurde zuerst 1670 von dem Alchimisten Brandt dargestellt; er wird jetzt fabrikmäßig aus Knochen oder phosphorhaltigen Mineralien gewonnen und kommt in Stangen als gelber (weißer) Phosphor in den Handel. Er ist fest, farblos oder hellgelb, weich und kann aus der Lösung in Schwefelkohlenstoff in Kristallen des regulären Systems erhalten werden. An der Luft verdampft er stets in geringer Menge, riecht dabei eigentümlich und leuchtet im Finstern. Er ist außerordentlich leicht entzündlich und höchst giftig. Wegen dieser beiden Eigenschaften muß er mit großer Sorgfalt behandelt und insbesondere nur unter Wasser in einer Schale zerschnitten werden. — Man bringe ein feuchtes Stück Phosphor in ein Probierglas und gieße Wasser von 50 — 60° darauf; trotz der verhältnismäßig niedrigen Temperatur schmilzt er sofort (Schmelzpunkt 44° , Siedepunkt 228°).

Wenn man gelben Phosphor unter Luftabschluß auf etwa 300° erwärmt, so verwandelt sich die geschmolzene Masse allmählich in einen festen roten Stoff, den roten Phosphor, den man fälschlich auch amorphen Phosphor nennt. Dieser ist nicht giftig und schwer entzündlich, hat überhaupt ganz andere Eigenschaften als der gewöhnliche Phosphor, läßt sich aber in ihn zurückverwandeln. Übrigens bleibt stets beim Verbrennen von letzterem ein Rückstand von rotem Phosphor, ebenso bildet er sich als dünner Überzug auf den in Wasser aufbewahrten Phosphorstangen. Man verwendet den gewöhnlichen Phosphor zur Darstellung der Zündhölzchen älterer Art, deren Kuppen außerdem noch Schwefel enthalten, sowie als Gift, den roten Phosphor hingegen zur Herstellung der Reibflächen für die schwedischen Zündhölzer¹⁾.

Die Erscheinung, daß ein Stoff in mehreren Formen mit verschiedenen Eigenschaften vorkommen kann, heißt Allotropie²⁾. Der gewöhnliche, der amorphe und der prismatische Schwefel, desgleichen der gewöhnliche und der rote Phosphor sind also allotrope Formen (Modifikationen) desselben Stoffes.

B. Verhalten der Schwermetalle zum Schwefel.

Gemenge von Eisen und Schwefel.

§ 4. § 4. Man vermische in einer Reibschale Eisenpulver und Schwefelpulver sehr sorgfältig. In dem Gemenge, das als eine gleichförmige, graue Masse erscheint, kann man die Bestandteile mit dem bloßen Auge nicht unterscheiden. Man mache mehrere Anteile. Aus dem ersten wird durch den Magnet das Eisen entzogen, so daß Schwefel zurückbleibt. Den zweiten rühre man in einem Becherglase mit Wasser um, wobei das Eisen sofort untersinkt, während der andere Stoff sich schwebend erhält. Endlich gieße man auf den dritten Anteil Schwefelkohlenstoff und auf den vierten verdünnte Schwefelsäure, eine viele Metalle lösende Flüssigkeit; man behält bei dem ersteren Versuch nur Eisen, bei dem anderen nur Schwefel zurück. Trotz der innigen Mischung zeigen also die beiden Stoffe in ihrem Verhalten zum Magnet, ihrem spezifischen Gewicht, ihren Löslichkeitsverhältnissen usw. keine Veränderung. Ein Gemisch oder Gemenge enthält also die verschiedenen Stoffe mit völlig unveränderten Eigenschaften; demgemäß kann man sie — mit

¹⁾ Beim Reiben entzünden sich geringe Mengen dieses Phosphors auf der Reibfläche und übertragen die Verbrennung auf die Bestandteile (Schwefelantimon, Natriumchlorat usw.) der Kuppe.

²⁾ Für die Wiederholung (nach der Durchnahme von § 9) sei bemerkt, daß man nur bei Grundstoffen von Allotropie spricht.

bloßem Auge oder bei genügender Vergrößerung — gesondert nebeneinander wahrnehmen. Selbstverständlich kann man Eisen und Schwefel und überhaupt mehrere Stoffe in jedem beliebigen Verhältnisse vermischen.

Schwefeleisen.

§ 5. Man menge Eisen- und Schwefelpulver, die nach dem § 5. Verhältniß 7:4 abgewogen worden sind, möglichst innig. Einen Anteil schütte man auf ein quadratisches Stück ausgeglühte Asbestpappe — einen auch bei großer Hitze ganz unveränderlichen Stoff — und berühre ihn kurze Zeit an einer beliebigen Stelle des Randes mit einer rotglühenden Stricknadel. An der Berührungsstelle beginnt eine lebhaft glühende Erscheinung, die trotz der Entfernung der Nadel sich nach und nach durch das ganze Gemenge verbreitet. Mit einem anderen Teil fülle man ein schwer schmelzbares Probierglas locker bis zur Hälfte an und erhitze es nur am unteren Ende. Sobald dort ein Aufglühen sich zeigt, wird das Gefäß von der Flamme entfernt; jedoch läßt das Glühen nicht nach, sondern wird stärker und setzt sich durch die ganze Masse nach oben hin fort. In beiden Fällen hat man schließlich statt des Pulvers einen dunklen, in sich zusammenhängenden Körper. Wir zerkleinern und zerreiben ihn, um nach seinen Bestandteilen zu suchen. Wir können ihn jedoch weder durch den Magnet noch durch Schlemmen in Wasser zerlegen; auch durch Schwefelkohlenstoff gelingt es nicht, ihm Schwefel zu entziehen. Man kann ferner selbst mit dem Mikroskop nicht Eisen- und Schwefelteilchen in ihm entdecken. Es ist also ein neuer, in seinen Eigenschaften einheitlicher Stoff entstanden, das Schwefeleisen; man nennt es im Gegensatz zu einer bloßen Mischung eine chemische Verbindung von Eisen und Schwefel. — Ein unterscheidendes Merkmal des neuen Stoffes ist, daß, wenn man auf ihn eine verdünnte Säure gießt, ein sehr unangenehm (nach faulenden Eiern) riechendes Gas, Schwefelwasserstoff, entsteht. Schwefeleisen ist im Handel in braunen, metallisch glänzenden, unmagnetischen Stücken zu haben (spez. Gewicht = 4,7).

Man wiederhole den zweiten Versuch mit dem Unterschiede, daß man dem Gemenge das eine Mal einen Überschuß von Schwefel, das andere Mal von Eisen hinzufügt. Wiederum erhält man unter gleichen Erscheinungen Schwefeleisen. Jedoch hat das eine Mal der überschüssige Schwefel durch Verflüchtigung während des Glühens sich als gelber Überzug an den kälteren Theilen des Probierglases niedergeschlagen, während im anderen Falle die überschüssigen Eisenteilchen unverändert geblieben sind und nach dem Zerreiben aus dem entstandenen Schwefeleisen durch den Magnet herausgezogen

werden können. Auch dadurch läßt sich das Mengenverhältnis der Bestandteile nicht verändern, daß man die pulverisierte Verbindung nochmals mit Eisen- oder Schwefelpulver erhitzt.

Verbindungen anderer Schwermetalle mit Schwefel.

§ 6. § 6. In ein Probierglas bringe man einige Tropfen Quecksilber, füge Schwefelblumen hinzu und erhitze kräftig. Es entsteht eine Verbindung beider, die sich als schwarze Masse an den kälteren Teilen des Glases ansetzt und beim Zerreiben sich teilweise in ein rotes Pulver verwandelt. Diese Verbindung wird Schwefelquecksilber genannt und ist also in einer schwarzen und roten Form bekannt; letztere wird im großen dargestellt und unter dem Namen „Künstlicher Zinnober“ als Malerfarbe benutzt.

Schwefel werde in einem weiten Probierglase zum lebhaften Sieden erhitzt. In den braunroten Dampf halte man einen dünnen Streifen Kupferblech, den man zuvor gewogen hat, hinein (Fig. 4).

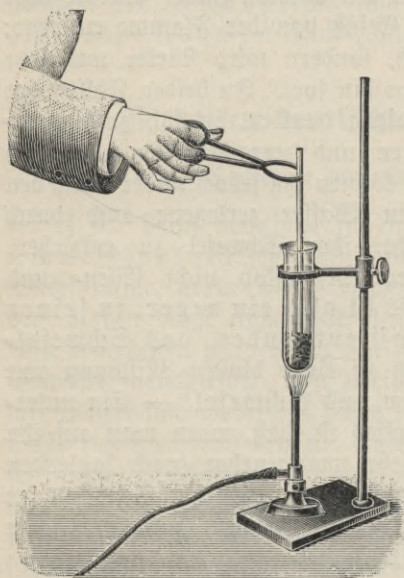


Fig. 4.

Das Metall gerät schnell ins Glühen und verwandelt sich in eine bläulichschwarze zerreibliche Masse, die sich auf der Wage als schwerer als der ursprüngliche Kupferstreifen erweist. Sie muß mithin eine Verbindung von Kupfer und Schwefel sein (Schwefelkupfer oder Kupfersulfür). — Ähnliche Erscheinungen beobachtet man, wenn dünn gewalztes Blei (Bleifolie) oder papierdünnes Zinn (Stanniol) in den Schwefeldampf eingeführt wird. Die Verbindung von Blei und Schwefel (Schwefelblei) ist ein spröder grauer, die von Zinn und Schwefel (Schwefelzinn, Zinnsulfür) ein leicht zerreiblicher bläulicher Stoff.

Die letzten Versuche beweisen, daß der Schwefel auch im gasförmigen Zustande sich mit Metallen verbinden kann. Die Schwefeldampfteilchen zeigen also ein größeres Bestreben, sich mit gewissen Stoffen zu vereinigen, als sich, wie es dem Aggregatzustand entsprechen würde, im Raume auszubreiten. Man bezeichnet diese Vorgänge häufig als Verbrennungen von Metallen im Schwefeldampf.

Mineralien, die aus Schwermetallen und Schwefel bestehen.

§ 7. Durch sorgfältige Untersuchungen ist nachgewiesen worden, § 7. daß verschiedene in der Erdrinde nicht selten vorkommende Mineralien Verbindungen von Schwermetallen und Schwefel sind und — wenigstens teilweise — mit den künstlich dargestellten Verbindungen in der Zusammensetzung völlig übereinstimmen. Hier können nur die wichtigsten betrachtet werden.

Bleiglanz ($Pb+S$) kristallisiert in Formen des regulären Systems, als Würfeln, Oktaedern, Kombinationen dieser beiden, Rhombendodekaedern usw., kommt auch häufig kristallinisch¹⁾ in grobkörnigen, feinkörnigen oder dichten Massen vor. Die Kristalle sind sehr vollkommen spaltbar, und zwar parallel zu den Würfel- flächen. Härte 2,5, spez. Gewicht 7,5, bläulichgrau, undurchsichtig, sehr starker Metallglanz. Häufig in Gesteinen, in denen er Gänge, d. h. Ausfüllungsmassen von Spalten, oder Lager, d. h. Schichten, die sich horizontal oder nahezu horizontal ausdehnen, bildet (Säch- sisches Erzgebirge, Harz, Oberschlesien usw.). Dient zur Darstellung von metallischem Blei und, falls er silberhaltig ist, auch zur Silber- gewinnung.

Zinkblende ($Zn+S$) bildet deutliche Kristalle des regulären Systems (Tetraeder²⁾, Rhombendodekaeder usw.) oder körnige, fein- faserige, auch dichte Massen. Spalt- barkeit sehr vollkommen nach den Flächen des Rhombendodekaeders. Härte 4, spez. Gewicht 4, gelb oder braun, Diamantglanz, durchsichtig oder durchscheinend. In Lagern und Gängen (Harz, Sächsisches Erzgebirge usw.). Dient zur Darstellung von Zink und Zinkverbindungen.

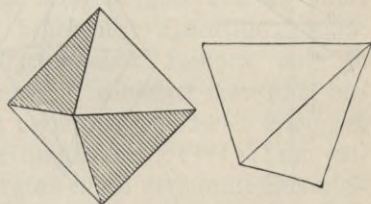


Fig. 5.

Kupferglanz ($Cu+S$) kristallisiert im rhombischen System (vgl. S. 4 Anmerkung 1). Härte 2,5, spez. Gewicht 5,5, bläulichschwarz, wenig glänzend. Dient zur Kupfergewinnung.

Zinnober ($Hg+S$) kommt in Kristallen oder in dichten Massen vor. Härte 2, spez. Gewicht 8, rot, durchscheinend, diamantglänzend,

¹⁾ Körper, die aus zusammengehäuft, unvollkommen ausgebildeten Kristallen bestehen, nennt man kristallinisch (über den weiteren Sinn dieses Wortes vgl. Anmerkung S. 3), und zwar dicht, wenn die einzelnen Kristalle mikroskopisch klein sind, sonst je nach der Ausbildung der Teile körnig, blättrig, faserig usw. Amorphe Mineralien können natürlich nicht in derartigen Massen vorkommen.

²⁾ Das reguläre Tetraeder kann als Halbflächenner des regulären Oktaeders betrachtet werden, aus dem es entsteht, wenn sich vier nur in Ecken zusammenstoßende Flächen bis zum Verschwinden der vier übrigen ausdehnen (siehe Fig. 5, wo die sich ausdehnenden Flächen des Oktaeders schraffiert sind und rechts das entstehende Tetraeder gezeichnet ist).

findet sich nur an wenigen Orten in größerer Menge (Spanien, Krain, Kalifornien). Fast alles Quecksilber wird aus diesem Mineral gewonnen.

An diese vier Mineralien, die in der Zusammensetzung den künstlich dargestellten Schwefelverbindungen durchaus gleichen, seien zwei weitere, bei denen dies nicht der Fall ist, angeschlossen.

Schwefelkies, Pyrit, eine Verbindung von Fe und S, in der auf das Fe die doppelte Menge S wie im künstlichen Schwefeleisen kommt, kristallisiert im regulären System, besonders in Pentagonododekaedern (Fig. 6) und Würfeln, kommt ferner in knolligen, traubigen und ähnlichen Massen vor. Härte 6, spez. Gewicht 5, gelb, starker Metallglanz, undurchsichtig, in allen Gebirgen auf Gängen und in Lagern häufig, wichtig für die Gewinnung von Eisen, Schwefel und Schwefelprodukten (Schwefelsäure usw.).

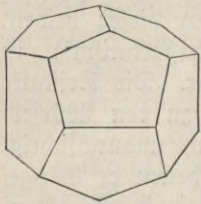


Fig. 6.

Kupferkies, aus Cu, Fe und S bestehend, kristallisiert in Tetraedern und anderen Formen des quadratischen Systems¹⁾; noch

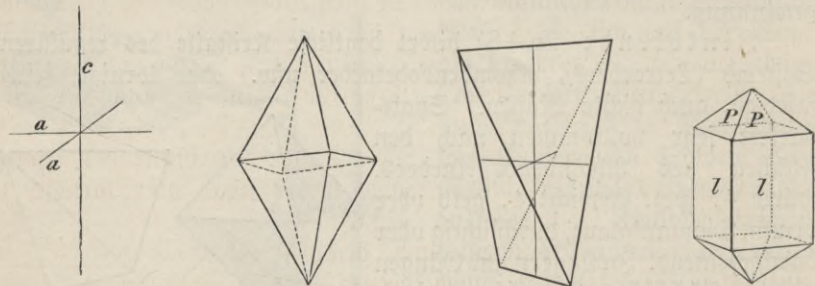


Fig. 7.

öfter kommt er in unregelmäßig gestalteten Massen vor. Härte 3,5, spez. Gewicht 4, messinggelb, oft bunt angelauten, starker Metallglanz. Häufiges, zur Darstellung von metallischem Kupfer dienendes Mineral.

Mineralien, die, wie die beschriebenen, aus Schwermetallen in Verbindung mit Schwefel bestehen, werden geschwefelte (sulfidische) Erze genannt²⁾.

¹⁾ In das quadratische System gehören diejenigen Formen, die auf drei sich rechtwinklig schneidende Achsen, zwei gleiche Nebenachsen a und eine von ihnen in der Länge verschiedene Hauptachse c , bezogen werden können. Fig. 7 stellt dieses Achsenkreuz, das quadratische Octaeder, seinen Halbflächner, das quadratische Tetraeder (dieses mit eingezeichnetem Achsenkreuz), und die Kombination von quadratischer Säule l und Octaeder P dar. Während das reguläre Octaeder und Tetraeder von gleichseitigen Dreiecken, sind die entsprechenden quadratischen Formen von gleichschenkligen Dreiecken begrenzt.

²⁾ Für die Wiederholung (zu § 37 gehörig) seien noch die Formeln der genannten Mineralien angegeben: Bleiglanz PbS , Zinkblende ZnS , Kupferglanz Cu_2S , Zinnober HgS , Schwefelkies FeS_2 , Kupferkies $CuFeS_2$.

Zerlegung sulfidischer Erze in ihre Bestandteile.

§ 8. Man erhize zerkleinerten Schwefelkies in einem schwer § 8. schmelzbaren Probierrglase. Nach kurzer Zeit zeigt sich an dessen kälteren Stellen ein gelber Anflug, der, wie die Farbe und die sonstigen Eigenschaften, als Brennbarkeit, Löslichkeit usw., lehren, aus fein verteiltem Schwefel besteht. Auch aus Kupferkies kann man durch kräftiges Erhizen Schwefel in Freiheit setzen. Jedoch gelingt es hierbei nicht, die metallischen Bestandteile dieser Erze für sich allein zu erhalten.

Zinnober werde in eine beiderseits offene Glasröhre gebracht und in ihr kräftig erhitzt. Eine bläuliche, kleine Flamme und der bekannte stechende Geruch beweisen, daß Schwefel auch hier entweicht, allerdings, um sofort zu verbrennen. Gleichzeitig bildet sich an den Wänden in der Nähe der erhitzten Stellen ein spiegelnder Überzug, der aus feinen Quecksilbertröpfchen besteht. Man kann also Zinnober nicht nur aus Quecksilber und Schwefel künstlich erzeugen, sondern auch in diese Bestandteile zerlegen. Tatsächlich wird in den Quecksilberhütten meistens das Metall nach diesem Verfahren aus dem Erz, dessen Schwefel man verbrennen läßt, erhalten (Rösten des Zinnobers).

Man erhize ein Gemisch von Zinnober- und Eisenpulver im Probierrglase. Ähnlich wie beim vorigen Versuch bildet sich ein aus sehr kleinen Tröpfchen bestehender Quecksilber Spiegel; diese lassen sich leicht in eine Porzellanschale bringen und zu einem großen Tropfen vereinigen. Hingegen beobachtet man nicht das Freiwerden von Schwefel. Daher ist zu vermuten, daß dieser Stoff sich mit dem Eisen verbunden hat. Dann müßte Schwefeleisen entstanden sein. Man gieße in das Probierrglas etwas verdünnte Schwefelsäure; es entweicht, wie der Geruch lehrt, Schwefelwasserstoff, womit die Richtigkeit unserer Vermutung erwiesen ist. Das Eisen hat also in der Hitze dem Schwefelquecksilber den Schwefel entrisen, um sich selbst mit ihm zu verbinden.

Erläuterungen (Verbindung, Element, chemische Zeichen).

§ 9. Bei unseren Versuchen haben wir aus den angewandten § 9. Stoffen andere mit durchaus veränderten Eigenschaften erhalten, z. B. aus Quecksilber und Schwefel den von ihnen so überaus verschiedenen roten Zinnober und umgekehrt. Derartige Erscheinungen sind Gegenstand einer besonderen Wissenschaft, der Chemie, und werden deshalb chemische Erscheinungen genannt. Viele allgemein bekannte Vorgänge wie das Rösten des Eisens, das Sauerwerden alkoholischer Flüssigkeiten, das Verbrennen des Erdöls usw. gehören hierher. — Hingegen betrachtet die Physik diejenigen Vorgänge, bei denen sich nur einzelne Eigenschaften der

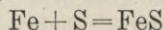
Körper, als Ort, Aggregatzustand, Temperatur, elektrischer Zustand, ändern, ihr Stoff aber der gleiche bleibt.

In den Schwefelmetallen, sowohl den künstlichen wie den in der Natur vorkommenden, haben wir einheitliche Stoffe kennen gelernt, die sich aus anderen (einfacheren) zusammensetzen und umgekehrt in diese wieder zerlegen lassen. Derartige Stoffe heißen chemische Verbindungen. Zinnober ist also eine chemische Verbindung von Quecksilber und Schwefel, Schwefeleisen von Eisen und Schwefel. Hingegen heißen Stoffe, die nicht in einfachere zerlegt oder aus einfacheren zusammengesetzt werden können, Grundstoffe oder chemische Elemente.

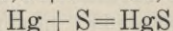
Aus der ungeheuren Zahl von Stoffen, die die Natur darbietet oder menschliche Tätigkeit hervorbringt, haben sich nur verhältnismäßig wenige, insbesondere sämtliche Metalle, ferner Schwefel, Phosphor usw., als Elemente erwiesen. Möglicherweise werden dereinst auch diese nach bisher unbekanntem Methoden zerlegt werden; vorläufig darf jedenfalls behauptet werden, daß die uns zur Verfügung stehenden physikalischen und chemischen Kräfte sie nicht zu spalten vermögen¹⁾.

Genauere Kenntnis haben wir von etwa 80 Grundstoffen; sie werden in Metalle (Gold, Silber, Quecksilber, Kupfer, Zink usw.) und Nichtmetalle, früher Metalloide genannt (Schwefel, Phosphor usw.), eingeteilt. Als Zeichen (Symbole) der Elemente wählt man, wie an Beispielen schon gezeigt wurde, den Anfangsbuchstaben ihres lateinischen Namens, dem man, falls es zur Unterscheidung notwendig ist, einen der folgenden Buchstaben hinzufügt (Schwefel sulfur S, Zinn stannum Sn, Gold aurum Au, Silber argentum Ag usw.). Die Verbindungen bezeichnet man abgekürzt durch Formeln, die die Zeichen ihrer Elemente nebeneinander gestellt enthalten (Schwefelblei oder Bleiglanz PbS, Zinnober HgS, künstliches Schwefeleisen FeS usw.).

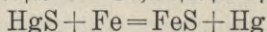
Die chemischen Vorgänge werden durch Gleichungen, in denen links die angewandten und rechts die erhaltenen Stoffe stehen, dargestellt. So lassen sich die Bildung von Schwefeleisen, von Zinnober, sowie die Einwirkung von Eisen auf Zinnober folgendermaßen versinnbildlichen:



Eisen + Schwefel = Schwefeleisen —



Quecksilber + Schwefel = Schwefelquecksilber (Zinnober) —



Schwefelquecksilber + Eisen = Schwefeleisen + Quecksilber.

¹⁾ Dieser Erklärung widerspricht nicht, daß die seit einer Reihe von Jahren bekannt gewordenen radioaktiven Elemente (Uran, Thor, Radium, Aktinium usw.), die ihren Namen ihren eigentümlichen Strahlungen verdanken, von selbst durch Zerfall andere Elemente erzeugen.

Gewichtsverhältnisse bei der chemischen Vereinigung.

§ 10. Eisen und Schwefel verbinden sich, wie gezeigt, nach dem Ver- § 10.
 hältnis 7:4, daher sind in 11 g künstlichem Schwefeleisen unabänder-
 lich 7g Fe und 4g S oder in 100g FeS 64g Fe und 36g S
 enthalten; Schwefeleisen besteht also stets aus 64% Fe und
 36% S. Ähnlich verbinden sich 25g Quecksilber in allen Fällen mit
 4g Schwefel, so daß natürlicher wie künstlicher Zinnober stets 86%
 Hg und 14% S enthalten¹⁾. Im allgemeinen gilt folgendes Gesetz:
 Wenn zwei Grundstoffe A und B sich miteinander chemisch
 verbinden, so geschieht dies nach einem unveränder-
 lichen Gewichtsverhältnisse $\alpha:\beta$; jede chemische Verbin-
 dung hat daher in bezug auf die Gewichtsmenge ihrer
 Bestandteile eine unveränderliche (konstante) Zusam-
 mensetzung (Gesetz der unveränderlichen Gewichtsver-
 hältnisse oder konstanten Proportionen nach Richter und
 Proust, Ende des 18. Jahrhunderts).²⁾

Es wäre jedoch irrig zu glauben, daß zwischen zwei Grundstoffen
 immer nur eine einzige Verbindung möglich sei. So sind uns bereits
 zwischen Eisen und Schwefel zwei in ihren Eigenschaften völlig verschie-
 dene Verbindungen — das künstliche Schwefeleisen und der
 Schwefelkies — bekannt. In der ersteren sind Fe und S nach dem
 Verhältnis 7:4, in der anderen nach dem Verhältnis 7:8 oder 7:(2·4)
 vereinigt, weshalb man dem Schwefeleisen die Formel FeS und
 dem Schwefelkies die Formel FeS₂, wobei die 2 als ein zu S ge-
 höriger Faktor zu betrachten ist, gibt. Da für andere Grundstoffe ähn-
 liche Tatsachen beobachtet worden sind, hat Dalton 1802 dem Gesetz
 der unveränderlichen Gewichtsverhältnisse folgendes weitere Gesetz hin-
 zugefügt: Wenn zwei Grundstoffe eine Verbindung nach
 dem Verhältnis $\alpha:\beta$ bilden, so können sie sich möglicher-
 weise noch zu einer oder mehreren anderen Verbindun-
 gen vereinigen, jedoch nicht nach beliebigen Verhält-
 nissen, sondern nach den Werten $m\alpha:n\beta$, wo m und n
 kleine ganze Zahlen (meist 2 bis 5) sind (Gesetz der mul-
 tiplen Proportionen).

Affinität, Wärmeerscheinungen.

§ 11. Die Kraft, welche die Vereinigung zweier Elemente zu einer Ver- § 11.
 bindung veranlaßt, heißt Affinität oder chemische Verwandt-

¹⁾ Diese Zahlen sind ungenau; legt man die möglichst genauen Verhältniszahlen
 zugrunde (vgl. die später zu besprechenden Atomgewichte § 36) — Fe : S = 55,9 : 32,06
 sowie Hg : S = 200,0 : 32,06 —, so ergeben sich für FeS 63,5% Fe und 36,4% S,
 sowie für HgS 86,2% Hg und 13,8% S.

²⁾ Dieses Gesetz gilt auch für Verbindungen von mehr als 2 Grundstoffen; so
 enthält Kupferkies stets 34,6% Cu, 30,4% Fe und 34,9% S.

schaft. Eisen und Kupfer haben keine Affinität zueinander; denn wenn sie sich auch nach beliebigen Verhältnissen zusammenschmelzen lassen, so vereinigen sie sich doch nicht zu einer Verbindung von bestimmter Zusammensetzung. Hingegen hat Schwefel zu allen Metallen Affinität. Daß die Affinität eines Stoffes (des Schwefels) zu verschiedenen anderen Stoffen (den einzelnen Metallen) gradweise verschieden sein kann, lehrt der Versuch, bei welchem Schwefel vom Quecksilber zum Eisen übergegangen ist (Wahlverwandtschaft).

Die Affinität wirkt wie die Kohäsion und Adhäsion nur auf außerordentlich geringe Entfernungen hin; wenn feste Körper chemisch aufeinander wirken sollen, müssen sie daher sorgfältig gemischt werden. Ferner tritt diese Kraft meist erst bei erhöhter Temperatur in Tätigkeit; wir haben deshalb die Vorgänge stets durch Erwärmen eingeleitet.

Mit der geringen Wärmemenge, die wir beispielsweise bei der Darstellung von Schwefeleisen zuführten, dürfen die bedeutenden Wärmemengen, welche sich in freier Weise bei den beobachteten Vorgängen entwickeln, nicht verwechselt werden. So könnte Schwefeldampf, der im offenen Gefäße bei normalem Druck eine Temperatur von 445° hat, einen Stoff wie Glas, der mit ihm keine Verbindung eingeht, höchstens bis zu dieser Temperatur erwärmen; jedoch wird der hineingeführte Kupferstreifen, wie sein starkes Erglühen zeigt, wohl zum mindesten auf 600° erhitzt. Die Erfahrung lehrt, daß meistens, wenn sich Grundstoffe chemisch verbinden, eine Wärmeentwicklung und daher ein Ansteigen der Temperatur stattfindet.

C. Leichte Metalle.

Kalium, Natrium, Magnesium, Aluminium.

§ 12. Seit Anfang des 19. Jahrhunderts gelang es den Chemikern, eine größere Anzahl von Elementen darzustellen, die, obgleich ihr spezifisches Gewicht unter die Zahl 7 beträchtlich herabging, im übrigen die Eigenschaften der bis dahin bekannten (d. h. der schweren) Metalle hatten. Man hat sie leichte Metalle genannt. Keins von ihnen findet sich gediegen; hingegen gehören einige — nämlich Kalium, Natrium, Magnesium und Aluminium — in Verbindung mit anderen Grundstoffen zu den in größter Menge auf der Erde vorkommenden Elementen. Kalium und Natrium sind feste, fast silberweiße, metallisch glänzende, sehr weiche Stoffe, welche sich durch die Einwirkung von Luft, Wasser usw. so schnell verändern, daß man sie unter Steinöl aufbewahren muß. Man schneide von beiden erbsengroße Stücke und werfe sie auf Wasser; sie schwimmen, immer kleiner werdend und zuletzt verschwindend, auf der Oberfläche hin und

her; dabei umgibt sich das Kalium mit einer violetten Flamme, hingegen entzündet sich das Natrium in den meisten Fällen nicht. — Magnesium, das in Draht- und Bandform in den Handel kommt, gleicht in Farbe und Glanz dem Zinn; entzündet gibt es eine blendend weiße Flamme; wegen dieser wird das Metall viel zu photographischen Zwecken benutzt. — Aluminium, das sowohl allein wie in Legierung mit Kupfer (Aluminiumbronze) zur Herstellung von Gerätschaften und Kunstgegenständen dient, ist ein grauweißes, politurfähiges, an der Luft unveränderliches Metall. — Genaueres lehrt folgende Übersicht:

Name	Zeichen	spez. Gewicht	Schmelzpunkt	Härte	Zusammenhang der Theilchen
1. Kalium . . .	K	0,87	62,5 ⁰	sehr weich	bei gewöhnlicher Temperatur kneubar
2. Natrium . . .	Na	0,98	95,6 ⁰	sehr weich	bei gewöhnlicher Temperatur kneubar
3. Magnesium . .	Mg	1,74	750 ⁰	3	dehnbar
4. Aluminium . .	Al	2,60	660 ⁰	2—3	sehr dehnbar.

Ähnlich wie die schweren, lassen sich auch die leichten Metalle mit Schwefel zu chemischen Verbindungen vereinigen.

D. Verhalten der Metalle und des Phosphors beim Erhitzen an der Luft.

Metalle an der Luft.

§ 13. Die meisten Metalle (und Legierungen) verlieren an der Luft § 13. ihren Glanz. Außerst schnell geschieht dies beim Kalium und Natrium, die sich mit einer immer dichter werdenden matten Schicht überziehen. Sehr allmählich bilden Kupfer, Zinn, Blei, Eisen, Magnesium usw. glanzlose Überzüge, die mit dem Messer als erdige Massen abgelöst werden können. Allgemein bekannt ist der braunrote Überzug, den Eisen an feuchter Luft (Eisenrost), und der grüne, den unter gleichen Bedingungen Kupfer und seine Legierungen bekommen (Patina, Edelrost, fälschlich auch Grünspan genannt). Unzweifelhaft handelt es sich hier um chemische Veränderungen. Zur Einleitung und Beschleunigung dieser erweist sich, wie nach den früheren Erfahrungen zu vermuten, Erwärmen als geeignet. Jedoch wird es sich empfehlen, die Körper nicht mit Flammen in unmittelbare Berührung zu bringen, da die hier enthaltenen Stoffe uns noch gänzlich unbekannt sind.

Veränderungen der Metalle beim Erwärmen (Verkalkung).¹⁾

§ 14. Man bringe an einen Hufeisenmagnet Eisenpulver und vereinige es zu einer Brücke; dann berühre man einige hervorragende Theilchen mit einer zu starkem Glühen erhitzten Stricknadel. Eine Glüherscheinung durchzieht die ganze Masse. Man wiederhole den Versuch, indem man Eisenpulver auf eine ausgeglühte Asbestpappe bringt und es an mehreren Stellen mit der glühenden Nadel berührt. In beiden Fällen entsteht eine dunkle, glanzlose Masse, die man Eisenkalk (Eisenaesche) nennen kann.

Ein Streifen von dünnem, stark glänzendem Kupferblech werde auf Asbestpappe durch einen daruntergestellten Brenner stark erhitzt. Es bildet sich ein zuerst rötlicher, dann schwarzgrau werdender Überzug, der sich leicht abschaben läßt. Nach und nach kann man den ganzen Streifen in diese spröde Masse, Kupferkalk, verwandeln.

Zinkpulver werde auf Asbestpappe von unten erhitzt, ihm auch gleichzeitig Wärme durch die glühende Stricknadel zugeführt; unter lebhaftem Erglühen bildet sich der erdige, weiße — bei höherer Temperatur gelbgefärbte — Zinkkalk.

Einige Bleistücke erhitze man stark in einer offenen Porzellanschale. Das Metall schmilzt und überzieht sich mit einer festen Haut. Man ziehe sie mit einem Spatel ab, wobei der starke Glanz des Metalls hervortritt, sehr bald sich aber von neuem der Überzug bildet. So verwandelt sich allmählich das ganze Metall in den festen Bleikalk.

Von leichten Metallen wähle man Kalium, Natrium und Magnesium, das letztgenannte in Pulverform. Die beiden ersten erhitze man in offenen Porzellantiegeln, wobei sie schmelzen und unter starker, zur Flammenbildung führender Wärmeentwicklung in erdige, weiße Massen — Kalium- und Natriumkalk — übergehen. Diese Stoffe lösen sich leicht in Wasser, ja, sie ziehen sogar Feuchtigkeit aus der Luft an und zerfließen, sie sind also hygroskopisch. — Das Magnesiumpulver bringe man auf Asbestpappe und führe ihm nur durch die glühende Nadel an einer Stelle Wärme zu; unter glänzender Lichterscheinung bildet sich mattweißer Magnesiumkalk (gebrannte Magnesia).

Von den besprochenen Metallen weichen Platin, Silber und Gold in bemerkenswerter Weise ab; sie erleiden nämlich beim Erhitzen auf der Asbestpappe und selbst in der Flamme keine Veränderung; allerdings gilt dies nur für die reinen Metalle, nicht für Werk Silber und Werk Gold, die mit Kupfer legiert sind. Eine Zwischenstellung nimmt Quecksilber ein; erhitzt man es nämlich in einer Schale andauernd auf etwa 300°, so verkalkt es, jedoch schwindet der

¹⁾ Zur Methodik und Technik der Luftuntersuchung usw. vgl. D. Ohmann (Zeitschr. für den phys. u. chem. Unterricht VIII 366, X 170 und XI 261).

Kalk bei stärkerem Erhitzen wieder. Der Quecksilberkalk ist als hellrotes schweres Pulver im Handel zu haben.

Die meisten Metalle können sich also an der Luft in glanzlose, erdig oder kalkartig aussehende Stoffe — Metallkalle oder Metallaschen — verwandeln. Zur Einleitung der Verkalkung ist Wärmezufuhr notwendig oder zum mindesten förderlich; hierauf findet freie Wärmeentwicklung statt. Metalle von derartigem Verhalten heißen unedel; diejenigen hingegen, die sich unter diesen Bedingungen nicht verändern, werden Edelmetalle genannt.

Bildung von Phosphorkalk.

§ 15. Um das Verhalten eines nichtmetallischen Elements unter § 15. ähnlichen Bedingungen zu prüfen, bringe man ein erbsengroßes Stück Phosphor in eine Porzellschale, berühre es mit einem nur mäßig erwärmten Kupferdraht und stülpe eine große Glasglocke darüber (Fig. 8). Unter lebhaftem Aufblitzen bildet sich ein dicker Rauch, bestehend aus festen, weißen, schneeartigen Teilchen, die sich teilweise an die Glocke ansetzen. Wir wollen das Produkt Phosphorkalk nennen. Beim Erhitzen von Schwefel in einer Schale treten andersartige Erscheinungen ein.



Fig. 8.

Chemische Natur der Kalk.

§ 16. Um zu prüfen, ob die Anwesenheit von Luft eine not- § 16. wendige Bedingung für Verkalkungen ist, wollen wir ein Metall bei Luftabschluß erhitzen. Ein großes Stück dünnen Kupferblech werde so zusammengefaltet, daß die Metallflächen im Innern sich fest berühren, und alsdann auf Asbestpapier oder auch unmittelbar in der Flamme stark erwärmt. Nach dem Erkalten zeigt sich beim Öffnen, daß die von der Luft abgeschlossenen Stellen völlig unverändert geblieben sind. Genaue Versuche lehren, daß die Luft auch für die Verkalkung der übrigen Metalle wie des Phosphors notwendig ist.

Welches ist nun die Natur dieser Kalk? — Nur zwei Möglichkeiten liegen, da die Ausgangsstoffe Elemente, also unzersehrbar sind, vor: sie könnten allotrope Formen dieser Grundstoffe oder Verbindungen von ihnen mit Luftbestandteilen sein. — Zur Entscheidung bringe man wiederum Eisenpulver am Magnet zur Verkalkung (Fig. 9), jedoch so, daß dieser am Wagebalken einer ins Gleichgewicht gebrachten Wage befestigt ist. Schon zu Anfang des

Vorgang zeigt sich auf der Seite des Magnets ein Schwerkwerden. Ebenso erkennt man durch vorhergehende und nachfolgende Wägung eine Gewichtszunahme bei der Verkalkung von Eisen-, Zink- oder Magnesiumpulver auf Asbestpappe. Diese und ähnliche Versuche beweisen, daß sich die Metalle ebenso wie der Phosphor wäh-

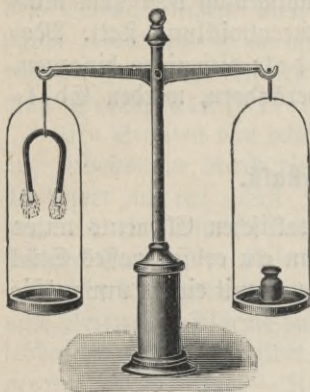


Fig. 9.

rend der Verkalkung mit Luftbestandteilen verbunden haben. Diese Luftteilchen können also trotz ihres Aggregatzustandes unter Wärmeentwicklung mit den Metallen Verbindungen eingehen, ähnlich wie wir es bei dem gasförmigen Schwefel schon nachgewiesen haben.

Der französische Chemiker Lavoisier, welcher zuerst die Bedeutung der Wage für die Chemie erkannte, hat 1772 gezeigt, daß die Verkalkung der Metalle und des Phosphors auf Luftabsorption beruhe. Vorher herrschte die von dem Deutschen Stahl um 1700 begründete Phlogistontheorie,

derzufolge die der Verkalkung und Verbrennung fähigen Stoffe einen gemeinschaftlichen Bestandteil, das Phlogiston, enthalten, dessen Entweichen die Verkalkung und Verbrennung veranlasse.

E. Untersuchung der atmosphärischen Luft, Stickstoff und Sauerstoff.

Eigenschaften und Bestandteile der atmosphärischen Luft.

§ 17. § 17. Die atmosphärische Luft — deren Bedeutung für die Verkalkungen wir soeben kennen gelernt haben — ist ein gasförmiger, farbloser, durchsichtiger Stoff, der die Erde als Hülle umgibt. Gleich den anderen Gasen (Schwefeldampf, Leuchtgas) hat sie, ebenso wie die festen und flüssigen Körper, die Eigenschaft der Schwere, und zwar wiegt 1 l im trockenen Zustand bei 0° und 760 mm Barometerstand 1,2936 g. Durch starken Druck und starke Abkühlung läßt sie sich zu flüssiger Luft verdichten.

In chemischer Hinsicht könnte die Luft unzerlegbar sein oder aus mehreren (verbundenen oder gemischten) Stoffen bestehen. Wir wollen zur Entscheidung untersuchen, ob sie bei der Verkalkung von den Metallen und dem Phosphor als einheitliches Ganzes oder ob nur ein Bestandteil von ihr absorbiert wird.

In einer großen Flasche ohne Boden (Fig. 10) bringe man an einem eingeklemmten Querholz einen kräftigen Hufeisenmagnet zum Schweben und versehe ihn an beiden Polen mit Eisenpulver. Hierauf stelle man die Flasche in ein Wassergefäß auf eine Holzplatte, bringe das Eisen von oben durch eine glühende Nadel zum Glühen und verschließe alsdann mit einem Kautschukpfropfen. Man beobachtet, wie infolge von Luftabsorption das Wasser in der Flasche emporsteigt, bis das Glühen nach und nach aufhört. Im Falle völligen Gelingens hat sich ein Fünftel der Flasche mit Wasser gefüllt. Ist Abkühlung eingetreten, so wird in das äußere Gefäß Wasser nachgegossen, bis es außen ebenso hoch wie innen steht, und hierauf der Pfropfen entfernt. Ein brennender Holzspan, den man in den Luftrest der Flasche einführt, erlischt sofort.

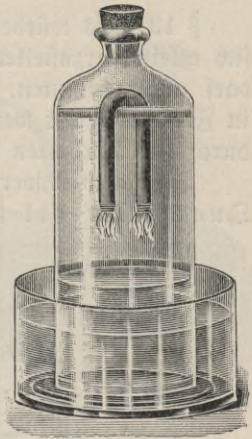


Fig. 10.

Bequemer als durch Metalle läßt sich die Absorption durch Phosphor ausführen. Hierzu bringe man (Fig. 11) ein Stückchen Phosphor, das innerhalb einer großen, durch Wasser abgesperrten Glasglocke in einer Porzellanschale schwimmt, durch einen erwärmten Draht zur Verkalkung und verstopfe alsdann. Der Phosphorkalk verbreitet sich als dicker, weißer Rauch. Nach einiger Zeit hat die Verkalkung aufgehört, der Rauch sich gesenkt und die Glocke sich zu einem Fünftel mit Wasser gefüllt. Wie beim vorigen Versuche bringt der Luftrest jeden eingeführten brennenden Körper zum Verlöschen. — Hiernach besteht die atmosphärische Luft aus zwei verschiedenen Anteilen, einem, der bei den Verkalkungen von den Metallen oder dem Phosphor absorbiert wird, und einem anderen, der an diesen Vorgängen nicht teilnimmt. Diesen hat man Stickstoff genannt. Man stellt ihn dar, indem man aus einer abgeschlossenen Luftmenge durch ein verkalkendes Element den absorbierbaren Bestandteil entfernt. Das absorbierbare Gas hat den Namen Sauerstoff erhalten.

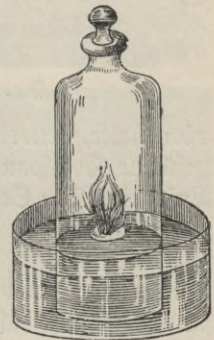


Fig. 11.

Stickstoff.

§ 18. Der Stickstoff, Nitrogenium (Symbol N) ist ein Grundstoff. Unter gewöhnlichen Umständen ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, wird er bei -146°C und einem Druck von 40 Atmosphären

flüssig. Seine Dichte ist, bezogen auf atmosphärische Luft, gleich 0,973. Er ist nicht brennbar, brennende Körper verlöschen, lebende Wesen ersticken in ihm; jedoch wirkt er nicht giftig.

Sauerstoff (Darstellung, Versuche).

§ 19. § 19. Es würde sich nun darum handeln, den Sauerstoff für sich allein darzustellen. Da die Metallkalle ihn gebunden enthalten, darf man vermuten, daß er bei sehr starkem Erhitzen dieser Stoffe in Freiheit gesetzt werden wird. Die Richtigkeit dessen läßt sich leicht durch das Verhalten des Quecksilberkalks erweisen.

In einem schwer schmelzbaren Probierring (Fig. 12) erhitzt man Quecksilberkalk kräftig; an den kälteren Teilen der Glaswand setzt sich Quecksilber in feinen Tröpfchen an, während eine Luftart entweicht, die, sonst der atmosphärischen Luft gleichend, sich dadurch charakterisiert, daß sie einen schwach glimmenden Holzspan zum lebhaften Aufblammen bringt. Es ist dies der aus der Verbindung freigewordene Sauerstoff. Man leite ihn durch Glasrohr und Kautschukschlauch und fülle mit ihm über Wasser einen kleinen Zylinder an. Aus diesem, den man mit der Mündung nach

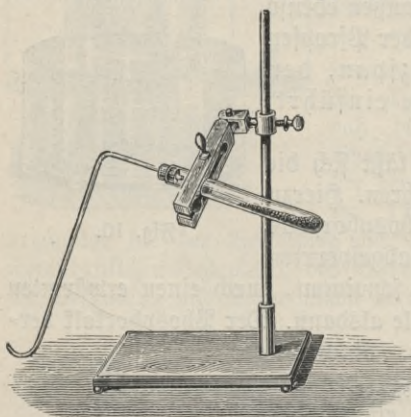
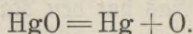


Fig. 12.

oben halte, entweicht auch in längerer Zeit das Gas nicht, wie der eingeführte Holzspan lehrt; es muß also schwerer als die atmosphärische Luft sein. Der Sauerstoff, Oxygenium, Zeichen O, ist als ein Element erkannt worden.

Wenn man den Quecksilberkalk genügend lange erhitzt, so verschwindet er völlig, indem er in seine Bestandteile Quecksilber und Sauerstoff zerfällt; er ist also eine Verbindung dieser beiden Elemente mit Ausschluß jedes weiteren Stoffes, so daß ihm die Formel HgO zukommt. Seine Zerlegung läßt sich daher durch folgende chemische Gleichung ausdrücken:



Im Quecksilberkalk sind — wie nach dem Gesetze der konstanten Gewichtsverhältnisse zu erwarten — die Bestandteile nach einem bestimmten Verhältnisse verbunden, nämlich $Hg:O=25:2$; 27 g dieses Stoffes zerlegen sich also stets in 25 g Hg und 2 g O.

Außer dem Quecksilberkalk hat man noch andere Verbindungen

des Sauerstoffs aufgefunden, die beim Erhitzen dieses Gas entbinden; unter ihnen ist am bekanntesten das chlorsaure Kalium (Kaliumchlorat), das in Kochsalzähnlichen kleinen Kristallen in den Handel kommt. — Man bringe in eine Retorte (Fig. 13) ein Gemisch von chlorsaurem Kalium und pulverisiertem Braunstein — dieser dem Mineralreich entstammende Stoff bleibt bei der Zersetzungstemperatur des Kaliumchlorats unverändert, befördert aber den Vorgang¹⁾ —, erhitze und leite das entweichende Gas in die mit Wasser gefüllten, auf der Brücke der pneumatischen Wanne stehenden Glaszylinder (oder auch zunächst in einen Gasometer). Man erkennt den Sauerstoff mit Hilfe des glimmenden Holzspans, überzeuge sich auch, daß noch andere Stoffe in ihm sehr viel lebhafter als in der Atmosphäre verbrennen; beispielsweise führe man brennenden Schwefel in einem langstieligen Eisenlöffel in einen der Zylinder und beachte den starken Glanz der vorher schwach leuchtenden violetten Flamme.

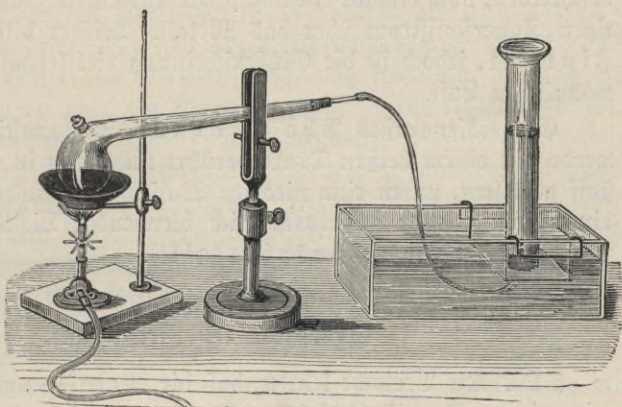


Fig. 13.

Man bringe einen spiralförmig gewundenen dünnen Eisendraht, dem durch ein unten angebrachtes glimmendes Zunderstückchen etwas Wärme zugeführt wird, in eine mit Sauerstoff gefüllte, durch eine dünne Wasserschicht am Boden abgesperrte Glasglocke (Fig. 14). Es entsteht ein heftiges Funkenprühen, indem feste, weißglühende Teilchen vom Drahte abspringen und sich in die Glaswände einschmelzen oder auf den Boden fallen. Diese sind Eisenkalk;

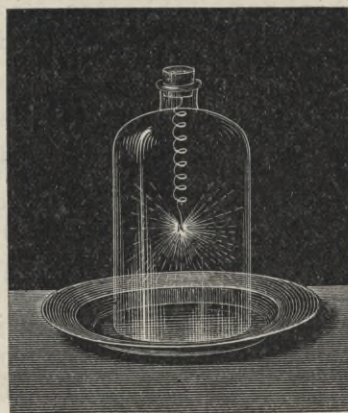


Fig. 14.

¹⁾ Eine dieser Wirkung des Braunsteins ähnliche Erscheinung wird später (S. 71) besprochen werden.

daß Eisen hat sich also mit dem reinen Sauerstoff zu derselben Verbindung wie mit dem Luftsauerstoff vereinigt. Nur geht der Vorgang hier schneller und unter lebhafterem Glühen vorstatten.

Man leite die Verfallung von Zink auf Asbestpappe, wie früher beschrieben, noch einmal ein und schide aus einem Gasometer einen kräftigen Sauerstoffstrom über das Metall. Wieder bildet sich der weiße Zinkkalk, jedoch ist die Glüherscheinung viel lebhafter als in der gewöhnlichen Luft.

Ein erbsengroßes Phosphorstück im langstielligen Eisenlöffel werde mit einem heißen Draht berührt und dann in einen mit Sauerstoff gefüllten, unten eine niedrige Wasserschicht enthaltenden Zylinder eingeführt. Unter außerordentlich blendender Lichtentwicklung bildet sich der rauchartige Phosphorkalk¹⁾.

Oxydation (Verbrennung).

§ 20. § 20. Die Versuche lehren, daß die Metalle und der Phosphor mit reinem Sauerstoff dieselben Verbindungen ergeben wie mit dem in der Atmosphäre einen Anteil bildenden. Die Wärmeentwicklung ist in beiden Fällen gleich, führt aber bei Anwesenheit von reinem Sauerstoff zu höherer Temperatur der entstehenden Produkte, weil hier ein Wärmeverbrauch durch unbeteiligten Stickstoff ausgeschlossen ist. Vorgänge, bei denen sich Grundstoffe mit Sauerstoff verbinden, wollen wir von nun an nicht mehr Verfallungen, sondern Oxydationen nennen. Oxydationen, die von lebhafter Licht- und Wärmeentwicklung begleitet sind, heißen Verbrennungen.

Eigenschaften des Sauerstoffs (Ozon).

§ 21. § 21. Der Sauerstoff ist ein farb-, geruch- und geschmackloses gasförmiges Element. Durch einen Druck von 50 Atmosphären und gleichzeitige Abkühlung auf -130° wird er zu einer Flüssigkeit verdichtet. Ein Liter wiegt unter normalen Verhältnissen 1,429 g, das Gas ist also 1,1 mal so dicht wie die atmosphärische Luft. Es ist nicht brennbar, unterhält und befördert jedoch Verbrennungen; auch ist es atembare. Bei elektrischen Entladungen wie bei langsamen Oxydationen — beispielsweise von Phosphor bei gewöhnlicher Temperatur an der

¹⁾ Man löse den Phosphorkalk unter Umschütteln in der geringen Wassermenge des Zylinders und überzeuge sich, daß diese dadurch einen sauren Geschmack annimmt. Auch andere Verbindungen des Sauerstoffs schmecken sauer, was die Namen dieses Elements — Oxygenium, Sauerstoff — erklärt.

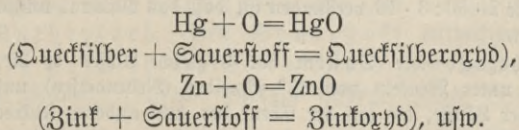
Luft — werden geringe Sauerstoffmengen nach und nach in eine gleichfalls gasförmige allotrope Form verwandelt, die man wegen ihres eigentümlichen Geruchs Ozon genannt hat.

Zusammensetzung der atmosphärischen Luft.

§ 22. Nach unseren Versuchen (§ 17) besteht die atmosphärische Luft zu vier Fünfteln ihres Volumens aus Stickstoff und zu einem Fünftel aus Sauerstoff. Es fragt sich nun, ob sie eine Verbindung oder ein Gemenge ist. Für letzteres spricht, daß sie in ihren Eigenschaften, beispielsweise im spezifischen Gewicht und im Verhalten gegen brennende Körper, eine mittlere Stellung zwischen ihren Bestandteilen einnimmt. Ferner ist nachgewiesen worden, daß man durch Mischen von Stickstoff und Sauerstoff ein Gas mit allen Eigenschaften der atmosphärischen Luft herstellen kann, ohne daß Wärme frei wird, wie dies bei der Bildung von wirklichen Verbindungen in der Mehrzahl der Fälle geschieht. Hiernach muß man die atmosphärische Luft als ein Gemenge beider Elemente betrachten. In geringen Mengen sind ihr noch andere Gase, insbesondere ein dem Stickstoff ähnliches Element, Argon Ar, ferner Wasserdampf, sowie das später zu besprechende Kohlen säureanhydrid beigemischt (100 Raumteile atmosphärische Luft enthalten durchschnittlich 77,188 Raumteile N, 20,616 Raumteile O, 0,886 Raumteile Ar, 1,279 Raumteile Wasserdampf und 0,029 Raumteile Kohlen säureanhydrid).

Dryde (Metallüberzüge).

§ 23. Die Verbindungen von Elementen mit Sauerstoff werden Dryde genannt; sie bilden, da fast alle Grundstoffe der Drydation fähig sind und viele sogar dem Gesetz der multiplen Proportionen entsprechend mehrere Dryde ergeben, eine sehr große Gruppe der chemischen Verbindungen. Hat ein Element zwei Dryde, so pflegt man das sauerstoffärmere Drydul, das sauerstoffreichere Dryd zu nennen; ist zwischen ihnen noch eine Zwischenstufe vorhanden, so heißt sie wohl Dryduloxyd. Wir werden daher von jetzt an statt Quecksilberkalk Quecksilberoxyd, statt Kupferkalk Kupferoxyd, statt Eisenkalk Eisenoxyduloxyd sagen usw. Die Bildung der Dryde kann durch chemische Gleichungen in folgender Weise ausgedrückt werden:



Die Überzüge, die viele Metalle bei längerem Liegen an der Luft bilden, enthalten meist außer dem Metall und Sauerstoff noch

andere Stoffe; insbesondere wird dies später für den Eisenrost, der sich ja auch im Aussehen beträchtlich vom Eisenoxyduloxyd unterscheidet, sowie für die Patina nachgewiesen werden (vgl. S. 75 u. S. 82).

Mineralien, die aus Metallen und Sauerstoff bestehen.

§ 24. § 24. Viele Mineralien — darunter die folgenden — sind als Oxide von Metallen erkannt worden.

Magneteisenerz Fe_3O_4 ¹⁾ kristallisiert im regulären System (Oktaedern, Rhombendodekaedern usw.), kommt auch häufig in körnigen oder dichten Massen vor und ist — besonders im verwitterten Zustande — stark magnetisch. Härte 6, spez. Gewicht 5, grauschwarz, schwach metallglänzend, undurchsichtig. Es bildet an manchen Orten im Granit, im Gneis oder in anderen Gesteinen große Stöcke und Lager (Dannemora in Schweden, Ural, Schmiedeberg in Schlesien usw.). Es ist mit dem künstlichen Eisenoxyduloxyd (Eisenkalk) identisch.

Roteisenerz Fe_2O_3 ²⁾ kommt in schönen Kristallen des hexagonalen Systems³⁾ (Eisenglanz) oder in faserigen, traubensförmigen, schuppigen usw. Massen vor. Härte 5—6, spez. Gewicht 5, grau bis rot gefärbt, Strich kirschrot,

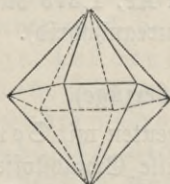
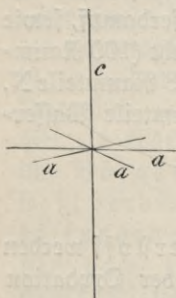
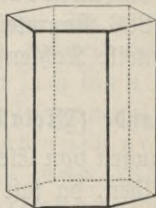


Fig. 15.



undurchsichtig, oft sehr stark metallglänzend. Findet sich häufig und in großen Massen, ist oft stark mit Ton vermischt und bildet dann den Toneisenstein und roten Ocker (Westfalen, Sächsisches Erzgebirge, Harz).

Magnet- und Roteisenerz sind nebst dem später zu besprechenden Brauneisenerz die wichtigsten Rohstoffe zur Eisengewinnung.

1) Die Formel Fe_3O_4 bedeutet, daß im Magneteisenerz wie im künstlichen Eisenoxyduloxyd 3 · 56 Gewichtsteile Fe mit 4 · 16 Gewichtsteilen O verbunden sind, woraus sich ein Gehalt von 72 % Fe und 28 % O berechnet.

2) Die Formel Fe_2O_3 drückt aus, daß im Roteisenerz Fe mit O nach dem Gewichtsverhältnisse 2 · 56 : 3 · 16 verbunden ist, daß das Mineral mithin 70 % Fe und 30 % O enthält.

3) Das hexagonale System hat 3 gleiche Achsen a, die in einer Ebene liegen und sich unter Winkeln von 60° schneiden (Nebenachsen) und eine vierte c von abweichender Länge, die auf der Ebene der drei anderen senkrecht steht (Hauptachse). Fig. 15 stellt dieses Achsenkreuz, ferner das Hexagondodekaeder (auch Dihexaeder oder hexagonale Doppelpyramide genannt) und die hexagonale Säule in Kombination mit den geraden Endflächen vor.

Pyrolusit, ein dunkelgraues bis schwarzes, undurchsichtiges, weiches Mineral, besteht aus einem sehr harten, dem Eisen ähnlichen Metall, Mangan Mn, und Sauerstoff; unter dem Namen Braunstein wird er gleich anderen Manganoxyden bei der Sauerstoffdarstellung (vgl. § 19), in der Glasfabrikation usw. angewandt.

Kotkupfererz Cu_2O — chemisch Kupferoxydul, im Gegensatz zum künstlich dargestellten und in der Natur als seltenes Mineral vorkommenden Kupferoxyd¹⁾ — kristallisiert im regulären System. Härte 4, spez. Gewicht 6, rot, durchscheinend, metallglänzend, zur Darstellung von metallischem Kupfer dienend.

Zinnstein SnO_2 findet sich in Säulen und Oktaedern des quadratischen Systems oder in körnigen Massen; Härte 6—7, spez. Gewicht 7, gelblich bis dunkelbraun, durchsichtig oder durchscheinend. Er hat dieselbe Zusammensetzung wie das künstlich dargestellte Oxyd des Zinns, kommt im Sächsischen Erzgebirge, in Cornwall und Südastien (Malaka, Insel Bangka) in großen Massen vor und dient als abschließliches Material zur Darstellung von metallischem Zinn.

Korund Al_2O_3 , ein mit dem künstlich dargestellten Aluminiumoxyd übereinstimmendes Mineral, kristallisiert im hexagonalen System. Härte 9, spez. Gewicht 4. Er findet sich in Ceylon usw. in völlig durchsichtigen, glasglänzenden Kristallen und Körnern, die, falls sie blau sind, Saphir und, falls sie rot sind, Rubin heißen; weniger reine, feinkörnige Abarten nennt man Smirgel (Insel Nagos). Saphir und Rubin gehören zu den kostbarsten Schmucksteinen, Smirgel ist gepulvert wegen seiner sehr großen Härte ein ausgezeichnetes Schleifmittel. Es ist gelungen, auch künstlich Rubine zu erhalten.

Mineralien, die aus Schwermetallen in Verbindung mit Sauerstoff bestehen, werden oxydische Erze genannt; ähnlich den sulfidischen Erzen zeigen sie oft in ihren physikalischen Eigenschaften metallischen Charakter. Die soeben besprochenen Mineralien mit Ausnahme des ein leichtes Metall enthaltenden Korunds gehören in diese Gruppe.

Mineralien, die sich durch große Härte, Klarheit und schöne Farbe auszeichnen (wie Rubin und Saphir), heißen Edelsteine; sie bilden wegen der Verschiedenheit ihrer Zusammensetzung keine natürliche Abtheilung des Mineralreichs.

Die Isolierung des Stickstoffs aus der atmosphärischen Luft lehrte 1772 Rutherford. Den Sauerstoff entdeckten unabhängig voneinander 1774 Priestley und Scheele, und zwar durch Erhitzen von Quecksilberoxyd, Braunstein usw. Hierauf gestützt, zeigte Lavoisier, der

¹⁾ Im Kupferoxyd ist das Verhältnis von $\text{Cu} : \text{O} = 63,6 : 16$, hingegen im Oxydul gleich $2 \cdot 63,6 : 16$; daher gibt man jenem die Formel Cu O , diesem $\text{Cu}_2 \text{O}$.

die Gewichtszunahme und Luftabsorption bei den Verkalkungsvorgängen schon früher erkannt hatte (siehe § 16), daß Sauerstoff in der Atmosphäre als absorbierbarer Bestandteil enthalten sei.

F. Untersuchung des Wassers, Wasserstoff und Knallgas.

Reinigung und Eigenschaften des Wassers.

§ 25. § 25. Man reinige Wasser von etwa darin schwebenden festen Teilen durch Filtrieren und von gelöster Luft durch Erwärmen, wobei diese lange vor dem Beginn des Siedens in Blasenform zu entweichen beginnt. Da das aus der Erde kommende Wasser überdies mineralische Bestandteile (sogenannte Salze) aufgelöst enthält, destilliere man es, wobei im Siedegefäß ein

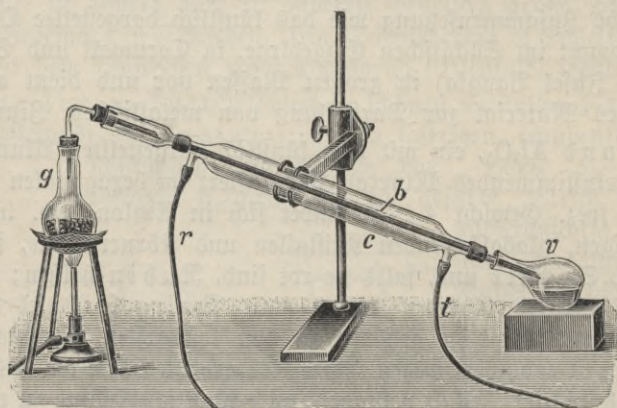


Fig. 16.

festen Rückstand (Kesselstein) zurückbleibt, während die Flüssigkeit in der Vorlage völlig rein erhalten wird (vgl. Fig. 16, wo *g* das Siedegefäß, *v* die Vorlage, *b* das innere Glasrohr und *c* das umgebende weite Rohr des Liebig'schen Kühlers ist, während der mit einem Wasserhahn verbundene Schlauch *t* dem Zuflusse und Schlauch *r* dem Abflusse des Kühlwassers dient). Man nennt Wasser, das reich an gelösten Bestandteilen ist, hart (Brunnenwasser), solches, das daran arm ist, weich (Flußwasser). Seewasser ist ausgezeichnet durch seinen Gehalt an Kochsalz (etwa $2\frac{1}{2}$ ‰). Die Mineralwässer enthalten verschiedene mineralische Stoffe, teilweise auch Gase, in größerer Menge gelöst.

Reines (destilliertes) Wasser ist eine farblose, in dichten Schichten blaue Flüssigkeit. Sein spezifisches Gewicht bei 4° C ist 1 (die gewählte Einheit). Es erstarrt bei 0° zu Kristallen des hexagonalen Systems (Schneekristalle) oder zu einer kristallinen Masse (Eis) vom spezifischen Gewicht 0,9. Sein Siedepunkt

ist bei normalem Luftdruck 100° C. Das gasförmige Wasser, der Wasserdampf, ist farblos und nimmt bei 100° einen etwa 1700mal so großen Raum als vorher das flüssige ein. Das Wassereis, das besonders in den Polarmeeren gewaltige Decken bildet, sowie die Schnee-, Firn- und Gletschermassen der Hochgebirge und polaren Länder dürfen als Gesteine¹⁾ betrachtet werden.

Chemische Untersuchung des Wassers²⁾.

§ 26. Zur chemischen Untersuchung des Wassers wollen § 26. wir die Metalle als Hilfskörper heranziehen, da sie zumeist schon bei gewöhnlicher Temperatur auf diese Flüssigkeit einwirken und in Berührung mit ihr ähnliche Überzüge wie an der Luft bilden (Eisen, Zink, Blei, Magnesium usw.).

In ein großes, schwer schmelzbares Probierglas P (Fig. 17) gieße man durch ein langes Trichterrohr eine geringe Menge Wasser (etwa bis zu der Querslinie c d) und füge durch ein zweites Trichterrohr eine gleich große Quantität Zinkpulver hinzu, das man mit dem Wasser zu einem dicken Brei verrührt. Auf das durchfeuchtete (Schicht b) bringe man trocken bleibendes Zinkpulver (Schicht a) und verschließe mit einem

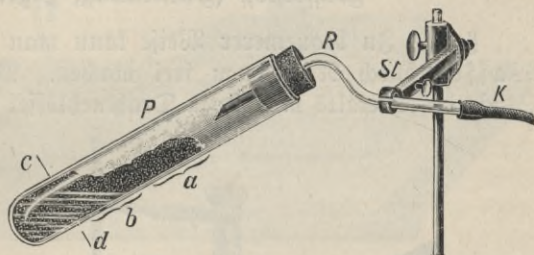


Fig. 17.

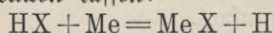
Kautschukpfropfen, dessen Gasentwicklungsrohr R in ein Stativ St eingeschraubt wird. Man erhitzt zuerst a, rückt dann mit der Flamme sehr allmählich zu b und schließlich auch zum Ende des Probierglases vor, indem man jedoch immer wieder zu a zurückkehrt, um vor allem diese Schicht auf einer hohen Temperatur zu erhalten. Schließlich entweicht durch R und den Kautschukschläuch K ein Gas, mit dem einige Probiergläser gefüllt werden können. Es ist farblos und läßt sich durch einen brennenden Holzspan entzünden. Durch letztere Eigenschaft unterscheidet es sich von den uns schon bekannten Luftarten. Das neue Gas kann, da die Metalle nicht zusammengesetzt sind, nur aus dem Wasser stammen; es ist als ein Element erkannt und

¹⁾ Gesteine sind aus Mineralien zusammengesetzte Massen, die im großen am Aufbau der festen Erdrinde teilnehmen; sie können aus Mineralien derselben Art oder verschiedener Arten bestehen.

²⁾ Zur Methodik der Wasseruntersuchung vgl. D. Ohmann, Zeitschr. für den phys. und chem. Unterricht, XIV 1.

Wasserstoff (Hydrogenium, Zeichen H) genannt worden. Bei einer Wiederholung des Versuchs wende man statt des Zinks Eisenpulver an; es entsteht gleichfalls Wasserstoff.

Hiernach ist Wasser eine Verbindung, in welcher Wasserstoff zusammen mit einem uns noch unbekanntem — einfachen oder weiter zerlegbarem — Bestandteil, den wir zunächst X nennen wollen, enthalten ist; wir können ihm daher vorläufig die Formel HX geben. Dieses X muß, da es bei den beschriebenen Versuchen nicht in Freiheit gesetzt worden ist, in Folge einer starken Affinität an das Metall (Zn, Fe usw.) gegangen sein. Bezeichnen wir die Metalle allgemein durch Me, so würden sich daher die beschriebenen Vorgänge durch folgende Gleichung ausdrücken lassen:



Wasser + Metall = Verbindung von Metall und X + Wasserstoff.

Wasserstoff (Darstellung, Eigenschaften).

§ 27. In bequemerer Weise kann man den Wasserstoff aus Wasser durch Natrium frei machen. Man bringe erbsengroße Stücke des Metalls mit einem Drahtneßlöffel unter die Öffnung eines

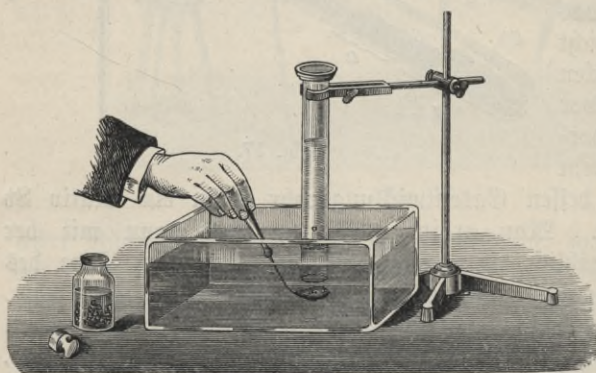


Fig. 18.

mit Wasser gefüllten, auf der Brücke der pneumatischen Wanne stehenden Glaszylinders. Es steigen reichlich Gasblasen auf, das Wasser verdrängend (Fig. 18). Die Verbindung von Natrium und dem mit X bezeichneten Stoff ist nicht zu sehen,

muß sich also im nichtzersehten Wasser gelöst haben, wofür auch dessen veränderter (laugenhafter) Geschmack spricht.

Um Wasserstoff in größerer Menge zu erhalten, bringe man in eine Flasche reine, mit der fünffachen Wassermenge verdünnte englische Schwefelsäure¹⁾ und Stücke von zerschnittenem

¹⁾ Wegen der bedeutenden Wärmeentwicklung beim Mischen von Schwefelsäure mit Wasser muß man, um ein Aufstochen und Umherspritzen zu vermeiden, die Säure in kleinen Anteilen unter Umrühren in das Wasser eintragen, nie aber umgekehrt das Wasser in die Säure gießen.

Zinkblech. Die Entwicklung beginnt sofort, ohne daß Erwärmen nötig ist; gleichzeitig löst sich das Zink auf. Nach einiger Zeit — wenn man sich überzeugt hat, daß die gewöhnliche Luft völlig verdrängt ist (das Unterlassen dieser Vorsichtsmaßregel kann zu gefährlichen Explosionen führen) — zünde man das Gas, das durch einen Kautschukschlauch mit angelegtem Glasrohr entweicht, an der Austrittsstelle an und beobachte die wenig leuchtende, sehr heiße Flamme. Ferner fülle man mit dem Gas mehrere Zylinder an (vgl. Fig. 19, wo a das zum Nachfüllen von Säure dienende Trichterrohr, b der Gasleitungsschlauch, e die Wanne, d die Brücke und c der Zylinder ist).

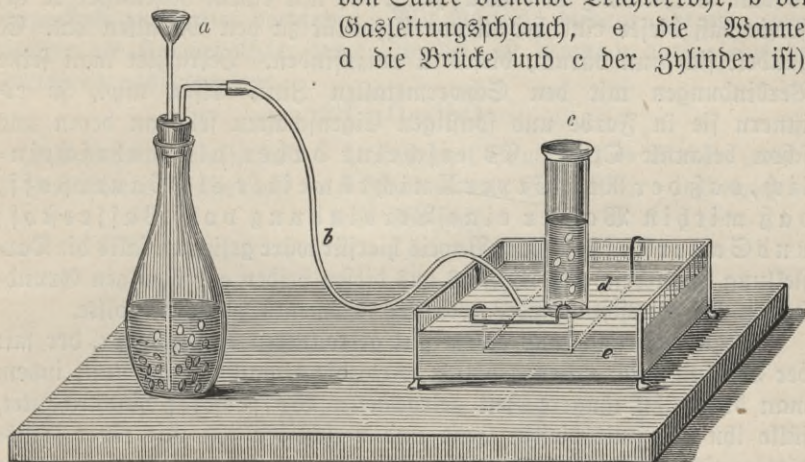


Fig. 19.

In einen mit Wasserstoff gefüllten, mit der Mündung nach unten gehaltenen Zylinder führe man, nachdem die Deckplatte schon einige Zeit entfernt war, einen brennenden Holzspan ein; das Gas entzündet sich an der Mündung, während der Holzspan im Innern erlischt. Man wiederhole den Versuch, halte den Zylinder aber mit der Öffnung nach oben; der Holzspan brennt alsdann im Zylinder ruhig fort, was die Anwesenheit von atmosphärischer Luft, mithin das vorherige Entweichen des Wasserstoffs beweist. Man fülle Seifenblasen mit diesem Gase und beachte ihr rasches Emporsteigen.

Wasserstoff ist, falls von allen Beimengungen gereinigt¹⁾, ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, das durch starken Druck und Abkühlung kondensiert werden kann. 1 l wiegt bei 0° C und 760 mm Druck 0,0895 g (wohl auch 1 Krith genannt), er ist mithin 14½ mal leichter

¹⁾ Der aus Zink und Schwefelsäure entwickelte Wasserstoff hat einen schwachen Geruch; will man ihn reinigen, so muß man ihn vor dem Auffangen durch Waschflaschen mit geeigneten Flüssigkeiten (Schwefelsäure, Lösung von übermangansaurem Kalium usw.) streichen lassen.

als gewöhnliche Luft oder hat, auf diese bezogen, die Dichte 0,0692; daher ist er das leichteste aller Gase. Wasserstoff läßt sich unschwer — schon durch einen glühenden Draht — entzünden und brennt mit schwach leuchtender, violetter, sehr heißer Flamme, kann jedoch Verbrennungen nicht unterhalten. Er wird zum Füllen von Luftballons benutzt.

Synthese des Wassers.

§ 28. Die bisherige Untersuchung des Wassers hat ergeben, daß es eine Verbindung von Wasserstoff mit einem Restkörper X ist, sowie daß dieser eine bedeutende Affinität zu den Metallen hat. Es handelt sich nun darum, dieses X aufzufinden. Betrachtet man seine Verbindungen mit den Schwermetallen Zink, Eisen usw., so erinnern sie in Farbe und sonstigen Eigenschaften sehr an deren uns schon bekannte Oxide. Es erscheint daher als wahrscheinlich, daß der Restkörper X nichts weiter als Sauerstoff, daß mithin Wasser eine Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff ist. Der Beweis hierfür wäre geliefert, falls die Darstellung (Synthese) des Wassers aus diesen beiden gasförmigen Grundstoffen bei Ausschluß jedes weiteren Elements gelingen sollte.

Man verdränge aus einem gut getrockneten Fußzylinder, der mit der Öffnung nach unten gehalten wird, die atmosphärische Luft, indem man durch ihn längere Zeit getrockneten Wasserstoff hindurchleitet, fülle ihn also mit diesem Gase und verschließe ihn mit einer Glasplatte; ein anderer Zylinder mit nach oben gehaltener Mündung werde (gleichfalls durch Luftverdrängung) mit getrocknetem Sauerstoff gefüllt. Hierauf stelle man den zweiten auf den ersten Zylinder, entferne die trennenden Platten und stelle durch Schwenken ein Gemisch der beiden Gase her. Wenn man hierauf zwischen die Öffnungen (Fig. 20) eine glühende Stricknadel bringt, findet Erglühen und ein starker Knall statt. Dies beweist, daß aus der Mischung eine Verbindung geworden ist. Gleichzeitig beobachtet man an den Glaswänden einen Beschlag von Wassertröpfchen. Die Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff ist mithin Wasser, das durch die bedeutende Wärmeentwicklung zunächst Dampfform annahm,

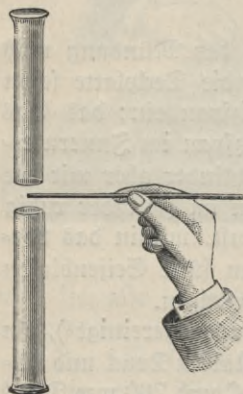
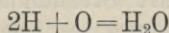


Fig. 20.

aber durch Abkühlung in den flüssigen Zustand übergegangen ist. Der Versuch gelingt auch, wenn der obere Zylinder statt mit Sauerstoff mit atmosphärischer Luft gefüllt ist, in welchem Falle der Stickstoff natürlich am Vorgange nicht teilnimmt.

Quantitative Zusammensetzung und sogenannte Elektrolyse des Wassers.

§ 29. Sorgfältige Untersuchungen haben gelehrt, daß aus neun Ge- § 29.
wichtsteilen Wasser ein Gewichtsteil Wasserstoff entbunden werden kann;
der Rest muß Sauerstoff sein. Also vereinigen sich 1 g H und 8 g O
zu 9 g Wasser¹⁾. Nun nimmt — da unter normalen Verhältnissen
1 Liter H 0,0895 g und 1 Liter O 1,429 g wiegt — 1 g H $\frac{1}{0,0895}$
= 11,2 Liter und 8 g O $\frac{8}{1,429}$ = 5,6 Liter an Raum ein; es ergibt
sich also fast genau, daß 2 Raumteile Wasserstoff sich mit 1 Raumteil
Sauerstoff zu Wasser verbinden. Mit Rücksicht hierauf gibt man dem
Wasser die Formel H₂O; seine Synthese ist demnach durch folgende
Gleichung auszudrücken:



(2 Raumteile Wasserstoff + 1 Raumteil Sauerstoff = Wasser, und
1 Gewichtsteil Wasserstoff + 8 Gewichtsteile Sauerstoff = 9 Gewichtsteile Wasser).

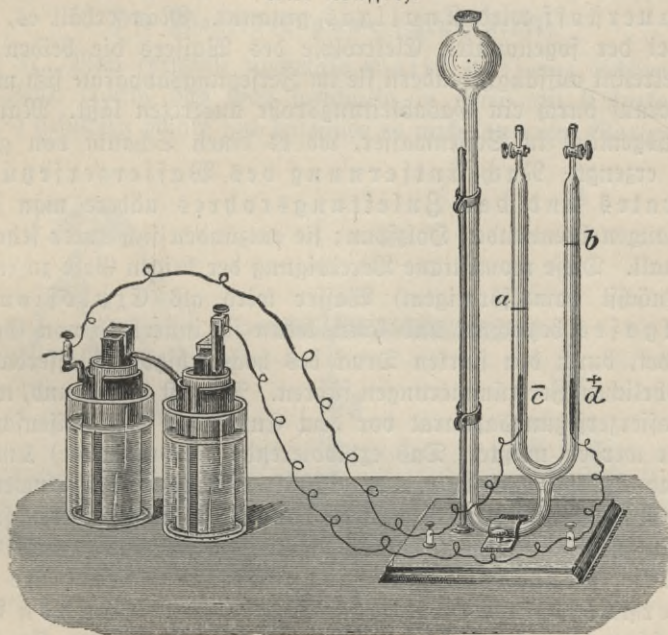


Fig. 21.

Läßt man durch angesäuertes, d. h. mit etwas Schwefelsäure
versetztes Wasser, das im Hofmannschen Wasserzerlegungs-
apparate (Fig. 21) das U-förmige Rohr bis zu den Hähnen

¹⁾ Diese Zahlen sind abgerundet, die möglichst genauen Zahlen sind: 1,008 g H
+ 8,000 g O = 9,008 g Wasser.

erfüllt, zwischen den Platinelektroden c und d den galvanischen Strom hindurchgehen, so erhält man an der mit dem Pluszeichen versehenen Anode d 1 Volumen Sauerstoff und an der mit dem Minuszeichen versehenen Kathode c 2 Volumina Wasserstoff, und zwar auf Kosten einer entsprechenden Gewichtsmenge Wasser, welche verschwindet, während die hinzugefügte Schwefelsäure am Schlusse in gleicher Menge wie am Anfang vorhanden ist. Daß der Versuch nicht als eine einfache Zerlegung des Wassers in seine beiden Elemente gedeutet werden darf, geht daraus hervor, daß er bei chemisch reinem Wasser, das sich als ein äußerst schlechter Leiter erweist, nicht oder nur sehr schwierig gelingt; im Ergebnisse ist er aber hiervon nicht verschieden, weshalb er häufig als eine Elektrolyse — d. h. Zerlegung einer Verbindung in ihre Bestandteile vermittels des elektrischen Stromes — bezeichnet wird.

Knallgas.

§ 30. § 30. Ein Gemisch von 2 Raumteilen Wasserstoff und 1 Raumteil Sauerstoff wird Knallgas genannt. Man erhält es, wenn man bei der sogenannten Elektrolyse des Wassers die beiden Gase nicht getrennt auffängt, sondern sie im Zersetzungsinstrumente sich mischen und hierauf durch ein Gasableitungsrohr austreten läßt. Man leite das Gasgemisch in Seifenwasser, wo es einen Schaum von großen Blasen erzeugt. Nach Entfernung des Wasserzersehungsinstrumentes und des Zuleitungsrohres nähert man diesen einen langen brennenden Holzspan; sie entzündet sich unter sehr starkem Knall. Diese momentane Vereinigung der beiden Gase zu (natürlich zunächst dampfförmigem) Wasser wird als Explosion des Knallgases bezeichnet und kann, wenn sie innerhalb von Gefäßen stattfindet, durch den starken Druck des hoch erhitzten Wasserdampfes zu gefährlichen Zertrümmerungen führen. Dies ist der Grund, warum der Wasserzersehungsinstrument vor dem Entzünden des Seifenschaums entfernt werden mußte. Das explodierende (verbrennende) Knallgas hat eine Temperatur von etwa 2000° und dient bei Anwendung geeigneter Apparate zum Schmelzen von Platin und anderen schwerflüssigen Stoffen. Im weiteren Sinne nennt man auch nach anderen Verhältnissen hergestellte Gemische von Wasserstoff und Sauerstoff, sowie Gemische von Wasserstoff mit atmosphärischer Luft Knallgas; sie geben, wie die vorher beschriebenen Versuche zur Synthese des Wassers lehren (vgl. § 28), beim Entzünden Explosionen, die durch die Anwesenheit eines am Vorgange nicht teilnehmenden Stoffes gemildert sind. Aus dem Gefäße, in welchem aus der Schwefelsäure durch Zink Wasserstoff entwickelt wird, entweicht anfänglich ebenfalls ein derartiges explosives Gasgemisch, wie früher (vgl. § 27) angedeutet wurde.

Die Explosion des Knallgases, bei welcher sich Wasserstoff mit Sauerstoff verbindet, kann als eine *Oxydation* betrachtet werden. Dies zeigt sich nicht nur im Ergebnisse, der Bildung eines *Oxyds* — des Wasserstoffoxyds oder Wassers —, sondern auch in den physikalischen Begleiterscheinungen. Wie bei der *Oxydation* des Eisens, Zinks oder Magnesiums ist irgendwie, z. B. durch eine glühende Nadel, an einer Stelle die für die Verbindung notwendige erhöhte Temperatur erzeugt worden; dann liefert der chemische Vorgang selbst die genügende Wärmemenge für die benachbarten Theilchen usw. Daß aber diese *Oxydation* im Gegensatz zu der der festen Grundstoffe so auffallend schnell erfolgt, kann nur darauf beruhen, daß der Sauerstoff sich mit dem gasförmigen Wasserstoff vollständig mischen kann, während er in feste Körper selbst bei möglichst feiner Verteilung nur unvollkommen eindringt. Von Bedeutung ist ferner, daß die *Oxyde* der Metalle fest sind, während das *Oxyd* des Wasserstoffs bei seiner Bildung ein *Dampf*, also gasförmig, ist.

Die Wasserstoffflamme (Leuchtkraft).

§ 31. Man entwickle nochmals Wasserstoff aus Schwefelsäure § 31. durch Zink, trockne das Gas sorgfältig in einer mit Chlorcalciumstücken¹⁾ gefüllten Röhre und entzünde es nach längerem Warten durch

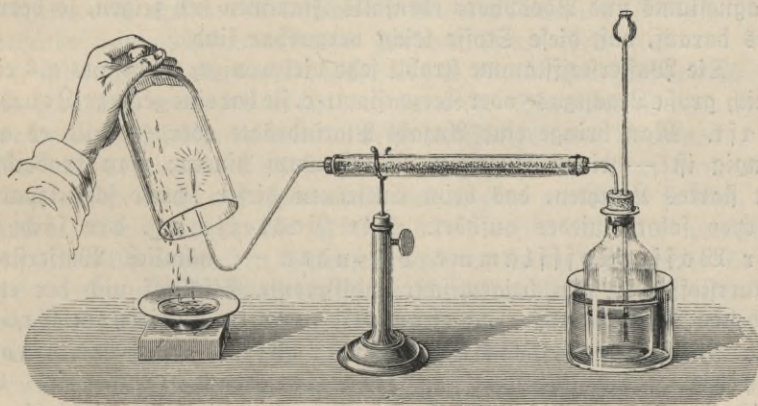


Fig. 22.

eine glühende Nadel. Über die entstehende Flamme halte man eine trockene, kalte Glasglocke (Fig. 22); sofort bildet sich an den Wänden ein Beschlag von Wassertropfchen, die sich zu größeren Tropfen vereinigen. Da diese Wasserbildung, solange die Flamme brennt, stattfindet, so muß in dieser

¹⁾ Chlorcalcium ist ein fester, sehr begierig Feuchtigkeit anziehender (hygroscopischer) Stoff, der viel zum Trocknen von Gasen benützt wird.

eine ununterbrochene Oxydation des Wasserstoffs stattfinden. Die Verbrennung des Wasserstoffs entspricht daher im Ergebnisse der Explosion des Knallgases, was nicht wunderbar ist, wenn man bedenkt, daß der aus dem Rohr ausströmende Wasserstoff sich sofort mit dem Sauerstoff der Atmosphäre mischt, also eine Art Knallgas bildet. Den Wärmeanstoß für die Vereinigung gab die glühende Nadel. Die Fortdauer des Oxydationsvorgangs hier im Gegensatz zu der momentanen Knallgasexplosion beruht einmal auf der steten Neubildung der Wasserstoff=Sauerstoff=Mischung und zweitens auf der beständigen, die Vereinigungstemperatur erhaltenden Wärmeerzeugung. Die Verbrennung des Wasserstoffs an der Luft ist demnach ein Oxydationsprozeß, so gut wie dies für die Verbrennung der Metalle und des Phosphors früher nachgewiesen worden ist (s. § 20); die Flammenerscheinung beruht aber beim Wasserstoff im Gegensatz zu dem bloßen Glühen des sich oxydierenden Eisens darauf, daß jener ein Gas, das Metall hingegen auch bei höherer Temperatur ein fester Körper ist. Wir erkennen also die Flamme als einen Gasstrom, dessen Teilchen sich mit dem Sauerstoff der Atmosphäre verbinden und durch die hierbei entbundene Wärme auf eine so hohe Temperatur erhitzt werden, daß sie leuchten. Wenn bei der Oxydation des Magnesiums und Phosphors ebenfalls Flammen sich zeigen, so beruht dies darauf, daß diese Stoffe leicht vergasbar sind.

Die Wasserstoffflamme strahlt sehr viel weniger Licht aus als eine gleich große Leuchtgas- oder Kerzenflamme, sie hat eine geringe Leuchtkraft. Man bringe eine Anzahl Platindrähte oder — falls es zugänglich ist — einen Auerschen Glühstrumpf hinein; man beobachtet ein starkes Leuchten, das beim Entfernen dieser schwer schmelzbaren Körper sofort wieder aufhört. Die Gasteilchen, die sich in der Wasserstoffflamme befinden — nämlich Wasserstoff, Sauerstoff, der ihm beigemischte indifferente Stickstoff und der entstehende Wasserdampf —, haben also nur in geringem Grade die Fähigkeit, Licht auszustrahlen, während hoch erhitzte feste Körper kräftig leuchten. Andererseits beweist der Versuch die sehr hohe Temperatur der Wasserstoffflamme, da sie sonst nicht die Platindrähte bis zur Weißglut erhitzen könnte.

Wasserstoff wurde zuerst als „brennbare Luft“ von van Helmont in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts beschrieben; genauer charakterisiert wurde er in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts von Cavendish, dem man auch den Nachweis von der Zusammenfügung des Wassers verdankt.

G. Atomtheorie.

Innere Geteiltheit der Stoffe (Molekel, Atom).

§ 32. Die Physik erklärt die Tatsache der drei Aggregatzustände am § 32. einfachsten durch die Vorstellung, die Stoffe seien zusammengesetzt aus äußerst kleinen — für denselben Stoff gleichartigen, für verschiedene Stoffe verschiedenartigen — Teilchen, zwischen denen entweder ein sehr inniger Zusammenhang (fester Zustand) oder ein sehr geringer Zusammenhang (flüssiger Zustand) oder gar die Neigung bestehen könne, sich möglichst weit voneinander zu entfernen (luftförmiger Zustand). Eis, Wasser und Wasserdampf würden sich hiernach nicht in den Teilchen selbst, sondern nur durch den Zusammenhang dieser unterscheiden, ebenso fester, flüssiger und luftförmiger Schwefel; hingegen wären die kleinen Wasser- von den kleinen Schwefelteilchen wesentlich verschieden. Um diese kleinen Teilchen, die man Massenteilchen oder Molekeln genannt hat, gänzlich voneinander zu trennen, müßte man daher den Körper vergasen; auch durch mechanische Teilung, d. h. Zerstoßen, Zermahlen usw., könnte man zu diesem Ziele gelangen, falls unsere Sinnesorgane und Werkzeuge uns nicht vorher den Dienst versagen würden. Die Volumenänderungen der Körper durch Wärme wie durch Zug- und Druckkräfte, sowie die Erscheinungen der Elastizität machen es ferner wahrscheinlich, daß Zwischenräume, die sich vergrößern und verkleinern lassen, die Molekeln trennen, sowie daß anziehende und abstoßende Kräfte zwischen ihnen tätig sind.

Es fragt sich, ob eine Molekel — z. B. ein kleinstes Wasserteilchen — als gänzlich unteilbar zu betrachten ist. Sicherlich ist diese Frage für unser Beispiel zu verneinen; denn da Wasser eine Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff ist, muß auch die Wassermolekel Wasserstoffteilchen und Sauerstoffteilchen, zum mindesten je eins, enthalten. Gleiches gilt für Zinnober, dessen Molekel wenigstens ein Quecksilber- und ein Schwefelteilchen enthalten muß, sowie für alle Verbindungen. Hingegen denkt man sich die solche Molekeln zusammensetzenden noch kleineren Stoffteilchen als wirklich unteilbar und hat sie daher Atome genannt. Für die Elemente erscheint es denkbar, daß ihre Molekeln nicht weiter zusammengesetzt sind, denn sie enthalten ja nicht mehrerlei Stoffe. Andererseits ist es nicht unmöglich, daß hier ebenso wie bei den Verbindungen durch chemische Kräfte eine noch weitere Zerteilung herbeigeführt wird als auf mechanischem Wege oder durch Vergasen. Die letztere Möglichkeit wird sogar durch viele Erscheinungen, von denen die Allotropie hervorgehoben sei, wahrscheinlich gemacht; die verschiedenen Formen des Schwefels oder des Sauerstoffs erklären sich nämlich am leichtesten durch die Annahme, daß sich gleichartige Atome in verschiedener Zahl und daher zu verschiedenartigen Molekeln zusammenlagern

können; beispielsweise hat man Veranlassung anzunehmen, daß die Molekeln des gewöhnlichen Sauerstoffs je zwei, die des Ozons je drei Sauerstoffatome enthalten. Im allgemeinen würde mithin den Atomen eine selbständige Existenz nur bei der Bildung oder dem Zerfall der Molekeln zukommen.

Eigenschaften der Atome (Erhaltung der Substanz).

§ 33. § 33. Ebenso wie wir wegen der unveränderlichen Eigenschaften eines Stoffes seine Molekeln als unter sich gleich betrachten, werden wir uns auch die Atome eines Elements als gleich, besonders dem Gewicht und Volumen nach, vorzustellen haben; anderseits werden sie sich bei verschiedenen Grundstoffen voneinander wesentlich unterscheiden. Wir nehmen die Atome ferner als unerschaffbar und unzerstörbar an; es ist nämlich bei chemischen Veränderungen niemals eine Vermehrung oder Verminderung von Stoff nachgewiesen worden, vielmehr haben die erhaltenen Stoffe, falls man sie ohne Verluste auffängt, stets dasselbe Gewicht wie die angewandten (Gesetz von der Erhaltung des Stoffes oder der Substanz). Um sich hiervon an einem Beispiele zu überzeugen, bringe man in eine große dünnwandige Glasflasche ein auf einer Abestunterlage stehendes Schälchen mit einem Phosphorstücke und wäge sie sorgfältig, nachdem sie luftdicht verstopft worden ist. Erwärmt man jetzt die Flasche von außen, so entzündet sich der Phosphor, und es bildet sich sein uns schon bekanntes rauchartiges Dryd. Stellt man nach dem Erlöschen der Flamme und dem Eintreten völliger Abkühlung die Flasche wieder auf die Wage, so zeigt sich ihr Gewicht völlig unverändert. — Wir würden demnach zu folgenden, zwar nicht erwiesenen, jedoch sehr wahrscheinlichen Sätzen gelangen:

Atome sind die kleinsten, durch mechanische und chemische Kräfte nicht weiter teilbaren Teilchen der Elemente, die für jedes Element einander gleich, aber für verschiedene Elemente verschieden sind¹⁾. — Molekeln sind die kleinsten Teilchen eines Stoffes, die noch die Eigenschaften des Stoffes besitzen und durch die verschiedene Art ihres Zusammenhangs die Verschiedenheit der Aggregatzustände hervorbringen; sie bestehen meist aus zwei oder mehr, sei es gleichartigen, sei es verschiedenartigen Atomen. — Die Atome erleiden bei chemischen Vorgängen keine Veränderungen; der Zerfall und die Neubildung von Stoffen beruht nur auf Änderungen in ihrer Gruppierung.

¹⁾ Gewisse Beobachtungen an den radioaktiven Elementen (siehe S. 12) lassen vermuten, daß die Atome dieser von selbst in noch einfachere und leichtere Teilchen zerfallen; immerhin bleibt die Annahme bestehen, daß auch diese Atome durch äußere Einwirkungen nicht zerstört werden können.

Verbindungs- und Atomgewicht, Einheitselement.

§ 34. Wie wir wissen, verbinden sich die Grundstoffe nach § 34. unveränderlichen Gewichtsverhältnissen (vgl. § 10). So verhält sich — wenn wir an einige Verbindungen des wichtigsten und überdies sehr leicht Verbindungen bildenden Elements, des Sauerstoffs, denken — im Quecksilberoxyd $\text{Hg:O} = 25:2$, im Zinkoxyd $\text{Zn:O} = 65:16$ und im Magnesiumoxyd $\text{Mg:O} = 3:2$ (die Zahlen sind abgekürzt). Um einen Vergleich zu ermöglichen, wird es sich empfehlen, die Verhältnisse für dieselbe Menge Sauerstoff, und zwar, einem allgemeinen Übereinkommen entsprechend, für 16 Gewichtsteile zu berechnen. Dann würden die Proportionen heißen: $\text{Hg:O} = 200:16$, $\text{Zn:O} = 65:16$ und $\text{Mg:O} = 24:16^1$). Ebenso hat man für die übrigen Grundstoffe durch Analyse ihrer Oxyde berechnet, wie viel Gewichtsteile von ihnen sich mit 16 Gewichtsteilen Sauerstoff verbinden. Auf diese Weise ergibt sich für jedes Element eine charakteristische Zahl, die wir sein Verbindungsgewicht nennen wollen. Eine Schwierigkeit tritt allerdings ein, wenn ein Element mehrere Oxyde bildet. Dies gilt beispielsweise für das Kupfer, in dessen Oxydul (Rothkupfererz) auf 16 Gewichtsteile Sauerstoff 127,2 Gewichtsteile Kupfer kommen, während in seinem Oxyd dieser Sauerstoffmenge nur 63,6 Gewichtsteile des Metalls entsprechen (vgl. § 24). Von den beiden für Kupfer gefundenen Zahlen ist die eine das Doppelte der anderen. Ähnlich ist es bei anderen Elementen, wie schon früher im Gesetz der multiplen Proportionen (§ 10) ausgesprochen wurde.

Wie stellen sich nun diese durch zahlreiche, überaus sorgfältige Versuche ermittelten Tatsachen im Lichte der Atomlehre dar? — Wenn in jeder beliebigen Menge Quecksilberoxyd auf 16 Gewichtsteile Sauerstoff 200 Gewichtsteile Quecksilber kommen, so muß dies auch in der geringsten Menge des Stoffes, der Molekel, der Fall sein. Dies hat Veranlassung gegeben, die Gewichte der Atome zu berücksichtigen. Bei ihrer Kleinheit kann es sich jedoch nicht um absolute, sondern nur um relative Bestimmungen handeln. Dabei geht man von einem nicht existierenden Elemente aus, dessen Atom $\frac{1}{16}$ mal so schwer angenommen wird wie das Sauerstoffatom; wir wollen es das „ideale Einheitselement“ nennen. Alsdann ist das Atomgewicht eines beliebigen Elements die Zahl, welche angibt, wievielmals so schwer sein Atom ist wie das Atom des idealen Einheitselements. Danach kommt zunächst selbstverständlich dem Sauerstoff das Atomgewicht 16 zu. — Betrachten wir einen anderen Grundstoff, z. B. das Quecksilber. In der Molekel seines

¹⁾ Die möglichst genauen Verhältniszahlen folgen S. 39.

Dryds kommen auf 16 Gewichtsteile Sauerstoff 200 Gewichtsteile Quecksilber. Die 16 Gewichtsteile Sauerstoff entsprechen einem Atom. Fügen wir nun — da wir uns, wenn nichts dagegen spricht, stets für die einfachste Möglichkeit entscheiden — die Annahme hinzu, daß in dieser Molekel auch nur ein Atom Quecksilber vorhanden ist, so würde diesem das Atomgewicht 200 zukommen. In diesem einfachsten Falle findet also zwischen Verbindungs- und Atomgewicht Übereinstimmung statt. Nicht immer jedoch ist diese Annahme statthaft, wie aus der Tatsache, daß zwei Elemente mehrere Verbindungen bilden können, hervorgeht. Wir haben beispielsweise Veranlassung — es soll dies später näher begründet werden — die Molekel des Wassers als eine Gruppe von 2 Atomen Wasserstoff und 1 Atom Sauerstoff zu betrachten. Nun kommen nach der Analyse im Wasser auf 16 Gewichtsteile Sauerstoff 2,016 Gewichtsteile Wasserstoff. Da diese das Gewicht von 2 Atomen vorstellen sollen, so würde das Atomgewicht des Wasserstoffs $\frac{1}{2} \cdot 2,016 = 1,008$ sein. Auch in anderen Fällen hat man das Verbindungsgewicht von Grundstoffen mit einfachen Zahlenfaktoren (wie hier mit $\frac{1}{2}$) multiplizieren müssen, um zum Atomgewicht zu gelangen.

Es muß auffallen, daß man als Einheitselement für die Atomgewichtsbestimmungen ein ideales, nicht eins der wirklichen Elemente gewählt hat. Tatsächlich nahm früher der Wasserstoff, dessen Atomgewicht 1,008 dem des idealen Einheitselements sehr nahe kommt, diese Stelle ein. Auf ihn bezogen, hätte der Sauerstoff das Atomgewicht 15,88. Um nun für den wichtigsten, den Atomgewichtsbestimmungen meist zugrunde liegenden Grundstoff eine bequemere, nämlich die ganze Zahl 16, zu haben, ist man vom Wasserstoff abgegangen und hat ein nur in unserer Vorstellung existierendes Element gewählt.

Allgemeine Bedeutung der Atomgewichte.

§ 35. § 35. Auf Grund der entwickelten Anschauung ist voranzuziehen, daß die Atomgewichte — wenn sie zunächst auch nur aus Sauerstoffverbindungen abgeleitet worden sind — ebenfalls eine Rolle spielen werden, wenn die verschiedenen Grundstoffe sich nicht mit Sauerstoff, sondern in anderer Weise verbinden, desgleichen wenn sie sich gegenseitig in Verbindungen vertreten. Denn wenn sich zwei beliebige Elemente verbinden oder verdrängen, so treten ja dieselben Atome in Wirksamkeit, die in den Dryden vorhanden sind. Tatsächlich hat die Erfahrung diese Folgerung bestätigt. Beispielsweise ist aus den Sauerstoffverbindungen für Quecksilber das Atomgewicht 200 und für Schwefel das Atomgewicht 32 (abgerundet) ermittelt worden. Nun ergibt die Analyse des Zinnobers, daß er in 100 g 86 g Hg und 14 g S enthält; es verhält sich in dieser Verbindung also $\text{Hg}:\text{S} = 86:14$, welches Verhältnis fast genau gleich 200:32 ist. Danach

kommt im Zinnober, da 200 Gewichtsteile Hg und 32 Gewichtsteile S je einem Atom entsprechen, auf 1 Atom Hg immer 1 Atom S. Wir wissen ferner, daß im künstlichen Schwefeleisen das Verhältnis von Eisen zu Schwefel gleich 7:4 ist; dieses ist das Verhältnis ihrer Atomgewichte (denn abgerundet ist $\text{Fe} = 56$ und $\text{S} = 32$), es muß also hier je 1 Atom Eisen mit je 1 Atom Schwefel verbunden sein. Im Schwefelkies kommen hingegen auf 56 Gewichtsteile Eisen 64 Gewichtsteile Schwefel, wir müssen ihn daher als eine Verbindung von je 1 Atom Eisen mit je 2 Atomen Schwefel ansehen. Diese Übereinstimmung der aus der atomistischen Hypothese gezogenen Folgerungen mit den Tatsachen darf als eine wesentliche Stütze für sie betrachtet werden.

Die wichtigsten Elemente mit ihren Atomgewichten.

§ 36. Das folgende Verzeichnis enthält die wichtigsten Elemente § 36. — auch diejenigen, die erst später besprochen werden sollen — mit ihren Zeichen und den möglichst genauen Atomgewichtszahlen.

Die wichtigsten Grundstoffe, alphabetisch geordnet.

Name	Zeichen	Atomgewicht	Name	Zeichen	Atomgewicht
Aluminium . .	Al	27,1	Natrium . . .	Na	23,05
Antimon . . .	Sb	120,2	Nickel	Ni	58,7
Blei	Pb	206,9	Phosphor . .	P	31,0
Brom	Br	79,96	Platin	Pt	194,8
Chlor	Cl	35,45	Quecksilber .	Hg	200,0
Eisen	Fe	55,9	Sauerstoff . .	O	16,00
Fluor	Fl	19	Schwefel . . .	S	32,06
Gold	Au	197,2	Silber	Ag	107,93
Jod	J	126,97	Silizium . . .	Si	28,4
Kalium	K	39,15	Stickstoff . .	N	14,01
Kalzium	Ca	40,1	Wasserstoff .	H	1,008
Kohlenstoff . .	C	12,00	Zinn	Zn	65,4
Kupfer	Cu	63,6	Zinn	Sn	119,0.
Magnesium . .	Mg	24,36			

Atomistische Formeln.

§ 37. Es ist in der Chemie üblich geworden, unter den Zeichen der § 37. Elemente nicht nur diese selbst, sondern im besonderen ein Atom von ihnen zu verstehen. Das Symbol S bedeutet also sowohl den Grundstoff Schwefel ganz allgemein, als auch 1 Atom = 32,06 Gewichtsteile von ihm. Verbindungen bezeichnet man durch Formeln, die eine Molekel versinnbildlichen; sie enthalten daher die Symbole der verbundenen Elemente, wobei die Zahl der Atome, mit der ein jedes in die Molekel eintritt, durch einen rechts unten hinzugesetzten Faktor angegeben und nur der Faktor 1 fortgelassen wird. Demnach hat die Formel des Wassers H_2O folgende Bedeutung:

1. Wasser ist eine Verbindung von Wasserstoff H und Sauerstoff O,
2. $2 \cdot 1,008 = 2,016$ Gewichtsteile H verbinden sich mit 16 Gewichtsteilen O zu Wasser,
3. die geringste Wassermenge, die möglich ist, also eine Molekel, besteht aus 2 Atomen H und 1 Atom O.

Ähnlich besagt die Formel des künstlichen Schwefeleisens FeS , daß in der Molekel 1 Atom = 55,9 Gewichtsteile Fe und 1 Atom = 32,06 Gewichtsteile S verbunden sind, während aus der Formel des Schwefelkieses FeS_2 zu entnehmen ist, daß in diesem Mineral auf 1 Atom = 55,9 Gewichtsteile Fe 2 Atome = $2 \cdot 32,06$ oder 64,12 Gewichtsteile Schwefel kommen.

Steht eine Zahl vor der Formel einer Verbindung, so bedeutet sie die entsprechende Vielfache der ganzen Molekel (also $2 \text{HgS} = 2$ Molekeln Zinnober).

Stöchiometrie.

§ 38. § 38. Aus der Formel kann man mit Hilfe der Atomgewichtstabelle die prozentische Zusammensetzung einer Verbindung berechnen. So sind in 1 Molekel Wasser H_2O , die aus 2,016 Gewichtsteilen H und 16 Gewichtsteilen O besteht, also 18,016 (abgekürzt 18) Gewichtsteile wiegt, 2,016 (abgekürzt 2) Gewichtsteile H und 16 Gewichtsteile O enthalten. Die Wasserstoffmenge x in 100 Gewichtsteilen ergibt sich daher aus der Proportion

$$18 : 2 = 100 : x, \text{ mithin}$$

$$x = \frac{200}{18} = 11,1.$$

Die entsprechende Sauerstoffmenge y folgt hingegen aus der Gleichung

$$18 : 16 = 100 : y, \text{ mithin}$$

$$y = \frac{1600}{18} = 88,9.$$

Im Wasser sind also (abgerundet) 11% H und 89% O enthalten.

Wir wollen ferner die prozentische Zusammensetzung des wichtigsten Bleierzes, des Bleiglanzes PbS , berechnen. Da die Molekel 1 Atom Pb und 1 Atom S oder (abgekürzt) 207 Gewichtsteile Pb und 32 Gewichtsteile S enthält, so wiegt sie 239 Gewichtsteile. Zur Bestimmung der in 100 Gewichtsteilen enthaltenen Blei- und Schwefelmenge dienen daher die beiden Proportionen

$$239 : 207 = 100 : x, \text{ und}$$

$$239 : 32 = 100 : y,$$

aus denen $x = 86,6$ und $y = 13,4$ folgt; Bleiglanz enthält also (abgekürzt) 87% Pb und 13% S.

Schließlich wollen wir noch ermitteln, wieviel Gramm Sauerstoff durch Zersetzung von 100 g Quecksilberoxyd erhalten werden können. Die Verbindung hat die Formel HgO , enthält also in der Molekel 200 Gewichtsteile Hg und 16 Gewichtsteile O, zusammen 216 Gewichtsteile. Die in 100 g der Verbindung gebundene Menge Sauerstoff ergibt sich daher aus der Proportion

$$216:16=100:x, \text{ also} \\ x = \frac{1600}{216} = 7,4.$$

100 g Quecksilberoxyd enthalten mithin 7,4 g Sauerstoff, die man durch anhaltendes Glühen des Stoffes in Freiheit setzen kann.

Man nennt die Verwendung chemischer Formeln und Gleichungen zu derartigen Rechnungen Stöchiometrie.

Die Annahme, daß die Stoffe aus unteilbaren Urkörperchen oder Atomen bestehen, stammt von griechischen Philosophen, insbesondere von Demokrit von Abdera (aus dem 5. Jahrhundert vor Christi Geburt). In die Chemie wurde sie von dem Engländer John Dalton 1807 eingeführt, der auf diese Weise die Gesetze der konstanten und multiplen Proportionen zu erklären versuchte und somit die Annahme zu einer wissenschaftlichen Hypothese erhob. Genaue Bestimmungen der Atomgewichte verdanken wir vor allem dem Schweden Berzelius (seit 1814). Die atomistische Hypothese hat — wie sich seither herausgestellt hat — eine so große Anzahl von Erscheinungen der Chemie wie der Physik nicht nur erklärt, sondern auch voraussehen lassen, daß sie den Namen einer Theorie (Atomtheorie) verdient und zu den wichtigsten Hilfsmitteln der Naturforschung gehört.

H. Kohlenstoff und Silizium.

Organische Kohle, Kohlengesteine.

§ 39. Man bringe in einen Porzellantiegel Holzspäne und § 39. in einen anderen Teile von tierischen Knochen, bedecke sie, um die Luft abzuschließen, und erhize von unten; es entweichen Rauch und Gase; in beiden Fällen ergibt sich eine selbst bei starkem Glühen fest bleibende schwarze Masse als Rückstand, Kohle genannt. Auch Haut, Eiweiß, Zucker, Kork und überhaupt alle dem Reich der Organismen entstammenden Stoffe können verkohlt werden (organische Kohle). Nach der Herkunft unterscheidet man Holz-, Knochen-, Zuckerkohle usw.

Die in der Erdrinde vorkommende Kohle (fossile Kohle) ist von der organischen nicht wesentlich verschieden; ja, sie ist als eine natürliche Holzkohle zu betrachten, die in früheren Perioden der Entwicklungsgeschichte der Erde aus gewaltigen Anhäufungen von

Pflanzen entstanden ist. Diese wurden, auf moorigem Boden wachsend und absterbend, durch Ton- und Sandablagerungen überdeckt und somit von der Luft abgeschlossen, wobei sie unter dem Einflusse starken Druckes allmählich einem Verwesungsprozesse anheimfielen, der im Ergebnisse von der künstlich herbeigeführten Verkohlung nicht verschieden ist. Gleichzeitig verfestigten sich die darüber liegenden Schlammschichten zu Ton- oder Sandgesteinen. Das jüngste, noch jetzt sich bildende Kohlenstein ist der Torf, eine braune, silzige Masse von in Zersetzung begriffenen Pflanzenteilen. Älter und daher vollkommener verkohlt sind Braunkohle, die die pflanzliche Struktur noch deutlich zeigt, und vor allem Steinkohle, die ihre Herkunft nur noch unter dem Mikroskop erkennen läßt. Beide, besonders die Steinkohle, bilden Flöze, d. h. zusammenhängende, oft weit ausgedehnte Schichten. Die Steinkohlenflöze erstrecken sich bei einer Mächtigkeit — d. h. vertikalen Ausdehnung — bis zu 20 Meter in horizontaler Richtung oft über viele Quadratmeilen und liegen, durch Sand- oder Tongestein getrennt, zu vielen übereinander (Waldenburger Gebiet, Oberschlesien, Westfalen, Rheinprovinz, England, Nordamerika usw.). Noch älter ist der Anthrazit, eine schwarze, halbmatt glänzende, besonders in Pennsylvanien vorkommende Kohlenart.

Kohlenstoff (amorpher).

§ 40. § 40. Die organische wie die fossile Kohle bestehen im wesentlichen aus einem Grundstoff, den man Kohlenstoff, Carbonium — Symbol C — genannt hat. Er bildet im Torf etwa 50 %, in der Braunkohle 55—75 %, in der Steinkohle 75—90 % und im Anthrazit mehr als 90 %; fast rein liegt er in der Zuckerkohle vor; seine reinste Form ist der Ruß, d. h. das lockere, tiefschwarze Pulver, das aus Holz-, Teer- und anderen Flammen sich abscheidet. Auch die beim Erhitzen der Steinkohle zurückbleibenden Massen — Koks genannt — gehören hierher. In allen diesen mehr oder minder reinen Abarten ist der Kohlenstoff amorph — amorpher Kohlenstoff —, schwarz, wenig dicht (etwa 1,5), leicht verbrennlich und so gut wie unsmelzbar.

Technisches; organische Verbindungen.

§ 41. § 41. Holzkohle und Koks sind, da bei ihrer Darstellung viele Verunreinigungen entweichen, sie die fossilen Kohlen im allgemeinen auch an Heizwert übertreffen, für viele Gewerbe, besonders für die Eisenindustrie, die geeignetsten Brennstoffe. Deshalb werden beide in großem Maßstabe dargestellt. Holz verkohlt man seit jeher in Meilern, d. h. Häufen von Holzstücken, welche in der Mitte einen vertikalen Schacht zum Einleiten des Verbrennungsprozesses haben und bis auf

eine Anzahl Löcher mit Erde bedeckt sind (Fig. 23). Neuerdings wird die Verkohlung des Holzes, damit auch die flüchtigen Nebenprodukte gewonnen werden können, wohl häufiger in eisernen Retorten vorgenommen. Koks erhält man entweder bei der Leuchtgasbereitung als Nebenprodukt oder in besonderen Kokereien, in denen die

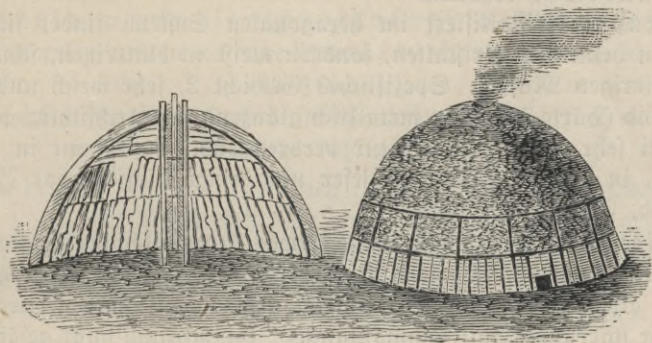


Fig. 23.

Erhitzung der Steinkohlen in gemauerten Öfen vorgenommen wird. Organische Kohle, besonders Knochen- und Holzkohle, findet eine weitere wichtige Verwendung zum Entfärben des Zuckerjafes in den Zuckerraffinerien, sowie zur Herstellung von Filtern, die zur Reinigung von schlechtem Trinkwasser dienen. Diese Kohlearten besitzen nämlich in hohem Maße die Fähigkeit, auf ihrer Oberfläche Gase zu verdichten, sowie daselbst gelöste Stoffe — als Farb-, Riech- und Ansteckungsstoffe — niederzuschlagen und dadurch dem Wasser zu entziehen. Die ungeheure Bedeutung der Kohlengesteine — vor allem der Steinkohle, die nicht nur das wichtigste Material zur Erzeugung von Wärme und Kraft ist, sondern auch als Rohstoff zur Gewinnung von Leuchtgas, Teer usw. benutzt wird — ist allgemein bekannt.

Die schon besprochene Tatsache, daß sich alle dem Tier- und Pflanzenreich entstammenden Stoffe verkohlen lassen, beweist, daß sie sämtlich Verbindungen des Kohlenstoffs sind; außer diesem Element, das im allgemeinen ihr Hauptbestandteil ist, enthalten sie stets noch Sauerstoff und Wasserstoff, vielfach auch Stickstoff. Man kennt eine überaus große Zahl von Kohlenstoff- oder organischen Verbindungen.

Kristallisierte Formen des Kohlenstoffs (Graphit und Diamant).

§ 42. Die amorphe Kohle ist in den gewöhnlichen Lösungs- § 42.
mitteln, wie Wasser, Alkohol, Ather und Schwefelkohlenstoff, unlöslich; durch geschmolzene Metalle, besonders Eisen, kann sie jedoch gelöst

werden, scheidet sich aber beim Erstarren des Metalls in Form von Blättchen, also kristallinisch, aus; diese Blättchen stimmen in den wesentlichen Eigenschaften mit dem Mineral Graphit überein. Unter besonderen Bedingungen ist es ferner gelungen, durch Kristallisation von in geschmolzenem Eisen oder Silber gelöster Kohle kleine Diamanten zu erhalten.

Graphit kristallisiert im hexagonalen System, findet sich aber selten in deutlichen Kristallen, sondern meist in blättrigen, schuppigen oder faserigen Massen. Spezifisches Gewicht 2, sehr weich und daher abfärbend (Härte 1), grau, metallisch glänzend, undurchsichtig, pulverisiert bei sehr hoher Temperatur verbrennend. Er kommt in großen Lagern, in Gneis, Glimmerschiefer usw. eingeschlossen, vor (Bassau, England, Sibirien, Ceylon).

Diamant bildet meist kleine, etwas krummflächige Kristalle des regulären Systems, ist ziemlich schwer (spez. Gewicht 3,5) und der härteste aller Stoffe (Härte 10); meist farblos, vollkommen durchsichtig und sehr stark glänzend (Diamantglanz); kommt auch bunt gefärbt und selbst in schwarzen, undurchsichtigen Massen vor. Sein Pulver läßt sich ziemlich leicht verbrennen. Er findet sich nur an wenigen Orten, teils im Schwemmland, teils in festen Gesteinen eingewachsen (Bordernindien, Brasilien, Südafrika).

Graphit dient, weil er wegen seiner Weichheit und dunklen Färbung zum Schreiben auf Papier verwandt werden kann, zur Herstellung der sogenannten Bleistifte; ferner werden aus ihm wegen seiner Unschmelzbarkeit und geringen Neigung zum Verbrennen Schmelztiegel hergestellt. Diamant gilt als der kostbarste Edelstein und wird außer zum Schmuck (Brillanten) zum Glasschneiden, als Schleifmittel usw. gebraucht.

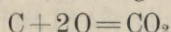
Allotropie des Kohlenstoffs.

- § 43. § 43. Das Element Kohlenstoff kommt in drei allotropen Formen vor, nämlich als amorphe (schwarze) Kohle, als Graphit und als Diamant; gemeinsame Eigenschaften sind der feste Zustand, die nahezu völlige Unschmelzbarkeit und Unlöslichkeit in den gewöhnlichen Flüssigkeiten, sowie die Fähigkeit, ohne Rest — d. h. zu einem nicht sichtbaren Stoffe — zu verbrennen (die als Asche bezeichneten Rückstände der organischen Kohle sind keine Verbrennungsprodukte, sondern mineralische Beimengungen).

Oxydation des Kohlenstoffs.

- § 44. § 44. Man durchbohre ein Stückchen Holzkohle, schiebe es auf einen unten umgebogenen starken Draht und erhitze es in einer Flamme. Sobald es glüht, bringe man es schnell in einen mit Sauer-

stoff gefüllten Zylinder, wobei man ein starkes Aufleuchten beobachtet. Nach einiger Zeit erlischt die Kohle, ein Beweis, daß der Sauerstoff verbraucht ist. Das entstandene Dxyd wird nicht wahrgenommen; es muß also ein farbloses Gas sein. Noch nach längerer Zeit befindet es sich in dem Gefäße, wie aus dem Erlöschen des wiederum eingeführten glühenden Kohlestückchens hervorgeht. Man hat dem Gase den Namen Kohlendioxyd (Kohlensäureanhydrid, fälschlich Kohlen-*säure*) gegeben und drückt seine Bildung durch folgende Gleichung aus:



(12 Gewichtsteile Kohlenstoff + 32 Gewichtsteile Sauerstoff = 44 Gewichtsteile Kohlendioxyd).

In den mit dem Gase gefüllten Zylinder gieße man etwas Kalkwasser — eine Flüssigkeit, die man durch Lösen von gelöschtem Kalk in Wasser erhält — und schüttle um; es tritt eine milchige Trübung ein, die andere Gase — Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff usw. — nicht hervorrufen; daher dient Kalkwasser als Reagens, d. h. zum Nachweise des Kohlendioxyds.

Wie amorphe Kohle verbrennen auch Diamant und Graphit unter ausschließlicher Erzeugung von Kohlendioxyd, und zwar geben gleiche Gewichtsteile dieser physikalisch so verschiedenen Körper gleiche Mengen des Gases; hieraus ist zuerst — im letzten Viertel des 18. Jahrhunderts durch Lavoisier und andere — ihre Stoffgleichheit mit Bestimmtheit erschlossen worden.

Kohlensäureanhydrid.

§ 45. Sehr bequem erhält man Kohlendioxyd, wenn man in § 45. eine Kochflasche mit Sicherheitsrohr Stücke von Kalkspat, Marmor oder Kreide bringt und sie mit verdünnter Salzsäure übergießt. Das Gas entweicht unter starkem Aufschäumen, während sich die festen Stücke lösen, und kann in Gefäße sowohl durch Wasser- wie durch Luftverdrängung eingeleitet werden.

Man wiederhole die vorher beschriebenen Versuche, zeige insbesondere die Trübung beim Leiten des Gases durch Kalkwasser und das Erlöschen eines eingeführten brennenden Holzspans. — In eine mit dem Gase gefüllte Flasche gieße man sodann etwas kaltes Wasser, verschließe mit einem Stöpsel und öffne sie nach kräftigem Umschütteln in umgekehrter Lage unter Wasser; dieses dringt ein wenig ein, wodurch bewiesen ist, daß ein Teil des Gases sich beim Schütteln gelöst hatte. — Man leite die Luftart durch kaltes, mit Lackmüstinktur¹⁾

¹⁾ Man überzeuge sich, daß sauer schmeckende Flüssigkeiten, wie Salzsäure, Schwefelsäure, Essig usw., blaue Lackmüstinktur — die Lösung eines aus gewissen Flechten dargestellten Farbstoffs — oder blaues Lackmuspapier — d. h. hiermit gefärbte Streifen von Filtrierpapier — rot färben (saure Reaktion).

blau gefärbtes Wasser; es wird schwach geröthet. — Man setze einen mit Kohlensäureanhydrid gefüllten, durch eine Deckplatte verschlossenen Zylinder umgekehrt auf einen gleich großen, der gewöhnliche Luft enthält. Beim Entfernen der trennenden Glasplatte fällt das oben befindliche Gas schnell nach unten, wo es durch das Erlöschen eines brennenden Holzspans nachgewiesen werden kann.

Das Kohlendioxyd ist also ein farbloses Gas, das sich in kaltem Wasser leicht löst und ihm schwach saure Eigenschaften erteilt (daher die ungenaue Bezeichnung Kohlensäure). Bei 0° und einem Druck von 36 Atmosphären verdichtet es sich zu einer farblosen Flüssigkeit, die, falls man sie rasch verdunsten läßt, teilweise zu einer schneeartigen Masse erstarrt. Das Gas ist 1,524 mal so schwer wie atmosphärische Luft. Brennende Körper erlöschen, lebende Wesen ersticken in ihm.

Man sauge an der Röhre C (Fig. 24), so daß Luft von dem Rohre B aus durch das in der Flasche A enthaltene Kalkwasser hindurchstreicht; nach einiger Zeit tritt eine schwache Trübung ein. Die Atmosphäre enthält also, wenn auch in sehr geringer Menge, Kohlendioxyd (vgl. § 22). Ebenso ist es stets in natürlichen Wässern, besonders im Quellwasser, gelöst. In großer Menge entströmt es in vulkanischen Gegenden der Erde (Hundsgrotte bei Neapel). — Kohlensäureanhydrid kommt verflüssigt in stählernen Behältern in den Handel und wird in vielen Gewerben, besonders zur Kälteerzeugung (Eismaschinen usw.) und zur Herstellung künstlicher Mineralwässer, gebraucht. Diese bestehen aus Wasser, das unter starkem Druck große Mengen des Gases (nebst verschiedenen Salzen)

aufgelöst hat und dieses beim Aufheben des Druckes teilweise unter Aufschäumen entweichen läßt; ähnlich sind die natürlichen Mineralwässer beschaffen. Auch das Schäumen von Bier, Schaumwein usw. beruht auf einem Gehalt an dieser Luftart.



Fig. 24.

Kohlenoxydgas.

§ 46. Im Kohlendioxyd kommen auf 12 g C 32 g O; außer ihm ist noch eine zweite Sauerstoffverbindung des Kohlenstoffs bekannt, in der das Verhältnis C:O=12:16 ist. Man muß ihr daher die Formel CO geben; sie wird Kohlenoxydgas (Kohlenmonoxyd) genannt und ist ein farb- und geruchloses, entzündet mit schwach leuchtender blauer Flamme zu Kohlendioxyd verbrennendes Gas ($\text{CO} + \text{O} = \text{CO}_2$). Diese außerordentlich giftige Luftart entsteht, wenn Kohle bei unzureichendem Luftzutritt verbrennt, und verursacht nicht selten schwere

Unglücksfälle (insbesondere beim Gebrauch offener Kohlenbeden oder beim vorzeitigen Schließen von Ofenklappen).

Oxydation kohlenstoffhaltiger Verbindungen, tierische Atmung.

§ 47. Man führe in einen mit atmosphärischer Luft und einen § 47. zweiten mit Sauerstoff gefüllten Zylinder eine auf einen umgebogenen Draht gesteckte brennende Stearinkerze oder einen brennenden Holzspan ein. Als Verbrennungsprodukt ist (neben Wasser) Kohlendioxyd nachweisbar. Der im Stearin und Holz, überhaupt der in den organischen Stoffen gebundene Kohlenstoff gibt also dasselbe Oxyd wie das freie Element.

Durch das Rohr B (Fig. 24) blase man die aus den Lungen kommende Ausatemungsluft in das klare Kalkwasser der Flasche A; dieses trübt sich viel schneller und vollkommener als vorher beim Hindurchstreichen der unveränderten atmosphärischen Luft. Augenscheinlich ist also die ausgeatmete Luft beträchtlich reicher an Kohlendioxyd als die eingeatmete; tatsächlich enthält sie etwa 4,4 Volumprocente dieses Gases. Im menschlichen wie tierischen Körper finden, wie hieraus hervorgeht, Oxydationsvorgänge statt; den Kohlenstoff hierzu liefern die dem Blutkreislauf zugeführten Nahrungsstoffe (Eiweiß, Fette, Stärke, Zucker), den Sauerstoff die eingeatmete Luft; das entstandene Kohlendioxyd dunstet in den Lungen aus dem Blute ab. Auch Wasserstoff wird im Körper oxydiert und als Wasserdampf ausgeatmet. Diese Oxydationen verdienen wegen ihres langsamen Verlaufs zwar nicht den Namen von Verbrennungen, liefern aber dennoch Wärme sowie überhaupt die für die Lebensvorgänge notwendige Energie; insbesondere erklären sie die verhältnismäßig hohe Temperatur des menschlichen und tierischen Körpers.

Verbrennung von Brenn- und Leuchtstoffen, sowie menschliche und tierische Atmung (auch Verwesung und Gärung) sind die Quellen des atmosphärischen Kohlendioxyds. In abgeschlossenen Räumen, wo derartige Vorgänge stattfinden, nimmt daher fortwährend der Gehalt an diesem für die Atmung untauglichen Gase zu. Dies im Verein damit, daß unser Körper geradezu giftige Luftarten, wenn auch in geringer Menge, ausscheidet, erklärt die Notwendigkeit häufiger Lufterneuerung in unseren Wohnungen.

Silizium (Quarz, Opal).

§ 48. Aus dem Mineral Quarz oder Kiesel (silex) hat man § 48. einen zu den Nichtmetallen gehörigen Grundstoff abgeschieden — Kieselstoff, Silizium, Si —, der in chemischer Hinsicht sich ähnlich dem Kohlenstoff verhält. Man kennt ihn als amorphes braunes

Pulver, sowie in kristallinischer Form. An der Luft oder im Sauerstoff erhitzt, bildet er ein festes weißes Dryd, Siliziumdiorhyd, das in seiner Zusammensetzung und seinen sonstigen Eigenschaften mit Quarz übereinstimmt. Nächst dem Sauerstoff ist Silizium jedenfalls das verbreitetste Element auf Erden; denn es ist nicht nur ein Bestandteil des Quarzes, sondern auch vieler anderen, gleichfalls sehr häufigen Mineralien (des Feldspats, Glimmers usw.).

Quarz, natürliches Siliziumdiorhyd, SiO_2 , kristallisiert im hexagonalen System, zumeist in sechsseitigen, quergestreiften Säulen in Kombination mit einer sechsseitigen Pyramide (Fig. 25).



Fig. 25.

Er ist nicht spaltbar, sondern bricht muschelig. Härte 7, spez. Gewicht 2,6, wasserhell oder durch Beimengungen gefärbt, glasglänzend, durchsichtig oder durchscheinend. Die wichtigsten, deutlich kristallisierenden Abarten sind folgende: a) Bergkristall, wasserhelle, bisweilen zentnerschwere Stücke, b) Rauchtopas, der sich von der vorigen Abart nur durch die rauchgraue Farbe unterscheidet, c) Amethyst, schön violette Kristalle bildend, und d) gemeiner Quarz, verschieden gefärbt und minder klar (Rosenquarz, Milchquarz usw.). Unter den kristallinischen Quarzen, die als unregelmäßig geformte, dichte Massen auftreten, seien hervorgehoben: a) Chalzedon, nierenförmige oder traubige, flachmuschelig brechende Körper, wie der fleischfarbene Karneol, der grüne Chrysopras und der weiß und braun gestreifte Onyx, b) Feuerstein, graugelbe oder dunkle, beim Zerbrechen scharfkantig zerspringende Knollen, die sich in Kreide- und Kalkgebirgen sowie in den Sandablagerungen Nord- und Mitteldeutschlands finden, und c) Chat, mandelförmige, oft in der Mitte hohle Massen, die aus verschieden gefärbten Schichten bestehen.

Quarz, besonders der gemeine, ist das häufigste Mineral, da er ein Bestandteil der verbreitetsten Gesteine (Granit, Gneis, Glimmerschiefer, roter Porphyrr usw.) ist. Für sich allein tritt er gesteinsbildend auf im Quarzit, einer kristallinischen Felsart. Sand und Kies, die vielfach die obersten Erdschichten bilden, sowie der feste Sandstein, der große Gebirgszüge (Bogesen, Elbsandsteingebirge usw.) zusammensetzt, bestehen aus gerundeten, lockeren oder verkitteten Quarzkörnern und sind daher gleichfalls Quarzgesteine. — Die wasserhellen wie die schön gefärbten Quarze werden als Halbedelsteine zu Schmuckgegenständen verarbeitet; gepulverter Quarz ist ein wichtiger Rohstoff für die Glasfabrikation; Sand wird zu den verschiedensten Zwecken, insbesondere zur Herstellung des Mörtels, Sandstein als Baumaterial usw. benutzt.

Das Mineral Opal ist der Hauptmasse nach ebenfalls Siliziumdiorhyd, enthält jedoch überdies etwas Wasser, das es bei starkem Erhitzen entweichen läßt. Opal ist amorph, meist Knollen bildend, etwas

leichter und weicher als Quarz, hell gefärbt, wachsglänzend und durchscheinend; eine bläulichweiße, durch schönes Farbenspiel ausgezeichnete Abart wird trotz der verhältnismäßig geringen Härte (6) als Schmuckstein hoch geschätzt.

J. Salzfäure und Chlor.

Salzfäure.

§ 49. Die käufliche konzentrierte Salzfäure ist gereinigt eine § 49. farblose, sehr sauer riechende Flüssigkeit, deren spez. Gewicht etwa 1,2 beträgt. Man bringe einige Tropfen von ihr in Wasser, das durch Lackmuskur blau gefärbt ist, und beachte die Rotfärbung. Ebenso wirkt sie auf andere blaue Pflanzenfarben (saure Reaktion, vgl. S. 45 Anm). Auffallend ist ihr Rauchen an der Luft; es kann dies nur darauf beruhen, daß beim Lüften des Pfropfens ein gelöstes Gas entweicht. Tatsächlich wird sie dargestellt, indem man Salzfäuregas in Wasser löst.

Man bringe in eine Flasche Kochsalz mit wenig Wasser, gieße mäßig verdünnte englische Schwefelsäure hinzu und erhitze vorsichtig. Das entweichende Gas kennzeichnet sich durch Geruch, Nebelbildung an der Luft, wie durch seine Wirkung auf Lackmuspapier als Salzfäuregas. Man fülle mit ihm zwei Probierröhrchen über Quecksilber. Das eine werde mit der Öffnung nach oben befestigt; noch nach mehreren Minuten läßt sich in ihm das Gas nachweisen. Das andere Probierröhrchen verschließe man, ehe man es aus der Sperrflüssigkeit herausnimmt, und öffne es unter Wasser, das in einer Schale befindlich und durch Lackmus blau gefärbt ist; das rasche Aufsteigen des Wassers, das sich gleichzeitig rötet, beweist, daß das Gas absorbiert wird und Salzfäure sich bildet (Fig. 26). — Salzfäuregas ist ein farbloses, sehr sauer riechendes, weder brennbares, noch die Verbrennung unterhaltendes Gas. Auf die Atmungsorgane wirkt es höchst schädlich. Es ist 1,28 mal so schwer wie die atmosphärische Luft und in Wasser außerordentlich leicht löslich (zu Salzfäure, die im konzentrierten Zustande 43% des Gases enthält).

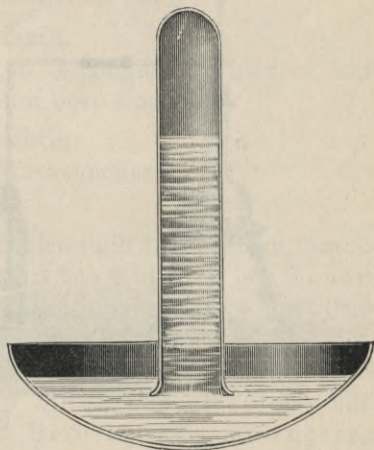


Fig. 26.

Analyse des Salzsäuregases, Chlor (Technisches).

§ 50. § 50. Man bringe in verdünnte Salzsäure Zinkstücke; sie lösen sich auf, und es entweicht ein Gas, das durch Farbe, Gewicht, Brennbarkeit usw. als Wasserstoff erkannt wird. Dieser kann, da Zink auf Wasser bei dieser Temperatur nicht einwirkt, nur dem Salzsäuregas entstammen (vgl. die Einwirkung von Zink auf Schwefelsäure § 27). Salzsäuregas muß also aus Wasserstoff und einem uns noch unbekanntem Restkörper bestehen. Um diesen in freiem Zustande zu erhalten, bieten sich zwei Wege: man könnte versuchen, den Wasserstoff durch Sauerstoff, der ja zu ihm eine starke Affinität hat, dem Salzsäuregas zu entziehen oder dieses durch einen elektrischen Strom — der ja, wie wir gesehen haben (vgl. § 29), Zersetzung hervorbringen kann — zu zerlegen. Beide Wege führen zum Ziele; für den ersten sind jedoch dem elementaren Sauerstoff gewisse sauerstoffreiche Verbindungen, wie Pyrolusit oder Braunstein MnO_2 (vgl. § 24), als wirksamer vorzuziehen.

In eine Kochflasche a (Fig. 27) bringe man Braunsteinpulver mit wenig Wasser und gieße durch das Trichterrohr b konzentrierte Salzsäure hinzu. Es entsteht bei vorsichtigem Erhitzen ein gelblichgrünes Gas — Chlor genannt —, das in der Waschflasche c durch Wasser gewaschen und dann in einen Zylinder d geleitet wird, aus dem es wegen seiner Schwere allmählich die Luft

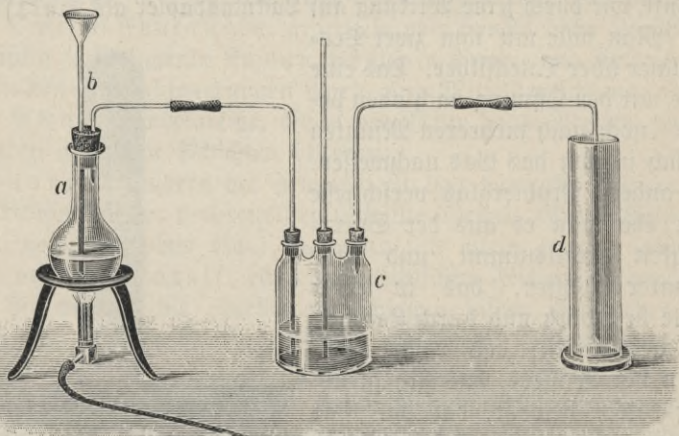


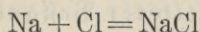
Fig. 27.

verdrängt. Man fülle nacheinander mehrere Zylinder und verschließe sie durch gefettete Glasplatten. Der Rest des Chlors wird in eine Flasche mit kaltem Wasser geleitet, wo er sich löst. Das Einatmen des höchst giftigen Gases ist dabei möglichst zu vermeiden.

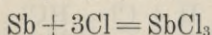
Chlor (Chlorum, Symbol Cl, siehe Tabelle § 36) ist als ein Grundstoff mit dem Atomgewicht 35,45 erkannt worden; bei gewöhnlicher

Temperatur gasförmig, und zwar 2,5 mal so schwer wie atmosphärische Luft, läßt es sich durch starken Druck und Abkühlung zu einer gelblichen Flüssigkeit, die auch zur Erstarrung gebracht werden kann, verdichten. — In einen Zylinder mit Chlor bringe man Lackmuspapier und eine bunte Blume; die Farben werden zerstört. — Eine Kerze, auf einem unten umgebogenen Draht brennend eingeführt, entzündet das Gas nicht, brennt aber, stark rußend, weiter. Chlor unterhält also die Verbrennung. — Eine dünne Scheibe Natrium, aus einem größeren Stück geschnitten, wird an einem Draht in das Chlor gebracht; sie verliert schnell ihr metallisches Aussehen und bildet einen weißen, feinkörnigen Überzug. Bei längerer Einwirkung verwandelt sich das Natrium auch im Innern in diesen als Kochsalz erkannten Stoff. — In einen der mit Chlor gefüllten Zylinder lasse man fein gepulvertes Antimon fallen; die Teilchen erglühen lebhaft und verwandeln sich in eine halbsteife, weiße Masse (Antimonbutter). Auch ein Streifen von fein ausgeschlagenem Messing (unechtem Blattgold) entzündet sich im Chlor, ebenso Eisenpulver, das zuvor im Probiervlas stark erhitzt worden ist.

Worauf beruhen nun die chemischen Veränderungen der Metalle im Chlor? — Die Beobachtung zeigt, daß hierbei das Gas selbst verschwindet; es muß also von den Metallen aufgenommen worden sein. Die entstandenen Stoffe sind daher Verbindungen dieser mit Chlor (Chlormetalle, auch Chlorüre oder Chloride genannt). Folgende Gleichungen stellen mithin die Vorgänge dar:



(23,05 Gewichtsteile Natrium + 35,45 Gewichtsteile Chlor = 58,5
Gewichtsteile Chlornatrium oder Kochsalz),



(Antimon + Chlor = Antimonchlorür)

usw.

In seinem Bestreben, sich mit Metallen (und auch anderen Grundstoffen) unmittelbar zu verbinden, erinnert das Chlor an den Sauerstoff; auch die physikalischen Begleiterscheinungen, d. h. die Entwicklung von Wärme sowie das lebhafteste Erglühen der die Verbindung eingehenden Metalle, sind die gleichen. Man spricht daher wohl von einer Verbrennung des Antimons, Kupfers usw. im Chlor. Im Gegensatz also zur Verbrennung im engeren Sinne, die ausschließlich Oxydationsvorgänge in sich begreift, sind Verbrennungen im weiteren Sinne alle diejenigen Vorgänge, bei denen sich ein Grundstoff mit einem Gase irgend welcher Art — Sauerstoff, Chlor, Schwefeldampf usw. — unter lebhafter Entwicklung von Licht und Wärme verbindet (vgl. § 6 und § 20).

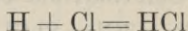
Salzsäure wird in bedeutender Menge bei der Fabrikation von

Soda aus Kochsalz als Nebenprodukt erhalten und findet in sehr vielen Gewerben Verwendung (zur Chlorgewinnung, zum Reinigen und Lösen von Metallen usw.). Die technische Bedeutung des Chlors ist ebenfalls sehr groß; dieses Gas zerstört nämlich, wie wir gesehen haben, organische Farbstoffe, ferner auch die mikroskopischen Organismen, welche ansteckende Krankheiten erregen; man verwendet es daher — gewöhnlich an Kalk gebunden (Chloralk) — zum Bleichen von Leinwand, Baumwolle, Papier usw., sowie als Desinfektionsmittel.

Synthese des Salzsäuregases.

§ 51. § 51. Wir haben aus dem Salzsäuregas zwei Grundstoffe — Wasserstoff und Chlor — gewonnen; um zu entscheiden, ob sie seine einzigen Bestandteile sind, wollen wir versuchen, sie zur Vereinigung zu bringen.

Zwei gleiche Fußzylinder, der eine mit Wasserstoff, der andere mit Chlor gefüllt, werden mit den Mündungen aufeinandergestellt, darauf mische man nach Entfernung der trennenden Deckplatten die Gase (wobei Sonnenlicht, das eine Explosion hervorrufen würde, sorgfältig zu vermeiden ist) und nähere die Gefäße einer kleinen Flamme. Es erfolgt unter mäßigem Knall die Vereinigung der Gase zu einer farblosen Luftart, die durch Nebelbildung und Röten von blauem Lackmuspapier sich als Salzsäuregas erweist. Salzsäuregas ist mithin eine Verbindung von Wasserstoff und Chlor mit Ausschluß weiterer Bestandteile; es wird daher gewöhnlich Chlorwasserstoff genannt; die beschriebene Synthese wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:



(1,008 Gewichtsteile Wasserstoff + 35,45 Gewichtsteile Chlor = 36,46 Gewichtsteile Chlorwasserstoff).

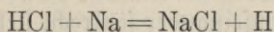
Messende Versuche haben ferner ergeben, daß hierbei Wasserstoff und Chlor sich zu gleichen Raumteilen verbinden und daß das entstandene Chlorwasserstoffgas denselben Raum einnimmt, den vorher die beiden Elemente erfüllt haben; also

1 Volumen H + 1 Volumen Cl = 2 Volumina Chlorwasserstoff.

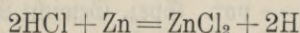
Metallchloride.

§ 52. § 52. Man löse kleine Stückchen Natrium sowie Abfälle von Zinkblech in verdünnter Salzsäure auf. Das Entweichen von Wasserstoff deutet darauf hin, daß die Metalle infolge ihrer starken Affinität zum Chlor dieses an sich gerissen und somit den Wasserstoff freigemacht haben; die entstandenen Chlorverbindungen selbst müssen,

da sie nicht irgendwie sichtbar geworden sind, sich in der stark wasserhaltigen Säure gelöst haben. Man dampfe die Lösung des Natriums ein, es scheidet sich Kochsalz (Chlornatrium) aus; ebenso läßt sich nachweisen, daß im anderen Falle eine Verbindung von Zink und Chlor entsteht, die wegen ihrer Zerfließlichkeit allerdings schwer aus der Lösung zu gewinnen ist. Man kann die Vorgänge folgendermaßen darstellen:



(Chlorwasserstoff + Natrium = Chlornatrium + Wasserstoff), und



(Chlorwasserstoff + Zink = Zinkchlorid + Wasserstoff).

Die Chloride der Metalle können demnach auf zweierlei Weise gewonnen werden, erstens durch unmittelbare Synthese ($\text{Na} + \text{Cl} = \text{NaCl}$) und zweitens durch Einwirkung von Metallen auf Salzsäure, wobei deren Wasserstoff durch das Metall ersetzt (substituiert) wird. Mit Rücksicht auf die zweite Darstellungsart betrachtet man sie als Abkömmlinge der Salzsäure und nennt sie Salze; sie erinnern nämlich zumeist in Glanz, Durchsichtigkeit, Löslichkeit in Wasser usw. an das Kochsalz, welches ja auch tatsächlich zu dieser Klasse von Verbindungen gehört. Daß jedoch nicht alle Metallchloride löslich sind, lehrt das durch Synthese vorher dargestellte Antimonchlorür (vgl. § 50).

Fluor, Brom, Jod.

§ 53. Später als das Chlor — welches 1774 von dem schon als § 53. Entdecker des Sauerstoffs genannten Scheele dargestellt worden war — wurden drei ihm nahestehende nichtmetallische Grundstoffe aus ihren Verbindungen gewonnen, nämlich Fluor F, Brom Br und Jod J. Fluor ist ein schwach gelblichgrün gefärbtes Gas, Brom eine braunrote, übelriechende Flüssigkeit und Jod ein schwarzgrauer, in metallisch glänzenden Blättchen kristallisierender Körper. Man erhitzte Jod in einem Probierrglase; es bildet sich ein violett gefärbtes, schweres Gas, Joddampf. Die Ähnlichkeit dieser Grundstoffe mit Chlor zeigt sich darin, daß sie sich mit den Metallen unmittelbar und mittelbar vereinigen können, und zwar zu salzartigen Verbindungen (Fluoride, Bromide, Jodide genannt, entsprechend den Chloriden), sowie daß ihre Verbindungen mit Wasserstoff gleich dem Chlorwasserstoff saure Eigenschaften zeigen. Chlor, Brom, Jod und Fluor werden die salzbildenden (halogenen) Elemente genannt; sie kommen in der Natur nicht frei vor.

Mineralien (Steinsalz, Flußspat).

§ 54. Die wichtigsten in der Erdrinde vorkommenden Verbindungen der salzbildenden Elemente sind Steinsalz und Flußspat.

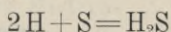
Das Steinsalz (Kochsalz), NaCl , kristallisiert im regulären System, meist in Würfeln, und besitzt eine ausgezeichnete Spaltbarkeit parallel zu dessen Flächen, derart, daß es beim Zerbrechen immer Teilstücke gibt, die von aufeinander senkrecht stehenden Ebenen begrenzt sind; sehr häufig kommt es auch kristallinisch — in blättrigen, körnigen oder faserigen Massen — vor. Spez. Gewicht 2,1, Härte 2, im reinen Zustande farblos oder weiß, sonst grau, blau, rot usw., ferner meist durchsichtig und glasglänzend. Es bildet, von geschichteten Gesteinen umschlossen, an manchen Orten mächtige Stöcke und Lager (Staßfurt in der Provinz Sachsen, Spereberg bei Berlin, Württemberg, Salzburg, Salzkammergut, Wieliczka in Galizien usw.); gelöst kommt es in salzreichen Quellschwämmern — den Salzsolen —, in manchen Landseen und vor allem im Meerwasser vor (dieses enthält durchschnittlich $2\frac{1}{2}\%$, die Gesamtmenge des hier gelösten Kochsalzes schätzt man gleich einer Kugel von 27 Meilen Durchmesser). Nur selten ist Steinsalz so rein, daß es ohne weiteres zu Speisezwecken verwendet werden kann; in den meisten Fällen löst man es durch zugeführtes Wasser zu künstlichen Solen, aus denen beim Abdampfen das Salz sich ausscheidet. Hingegen werden die natürlichen Salzsolen erst eingedampft, nachdem ihnen durch allmähliches Verdunsten an der Luft ein Teil ihres Wassergehalts entzogen worden ist. In manchen Ländern gewinnt man auch aus dem Meere Kochsalz. Außer als Nahrungsmittel für Menschen und Haustiere dient es in mehreren Gewerben als Ausgangsmaterial (Soda, Chlor- und Salzsäureindustrie).

Flußspat besteht aus einem silberweißen Leichtmetall, welches nur in Verbindungen, vor allem in großer Menge in den so häufigen Kalkgesteinen vorkommt und deshalb Kalzium (Symbol Ca , Atomgewicht 40,1, spez. Gewicht 1,85) genannt worden ist, sowie aus Fluor; seine Formel ist CaF_2 . Das Mineral kristallisiert in Würfeln und anderen Formen des regulären Systems und besitzt eine deutliche Spaltbarkeit parallel zu den Flächen des Oktaeders; auch in kristallinischen Massen kommt es vor. Spez. Gewicht 3, Härte 4, unlöslich in Wasser. Flußspat ist selten farblos, meist violett, grün oder gelb gefärbt, glasglänzend und durchsichtig oder durchscheinend. Er findet sich auf allen Erzgängen und Erzlagerstätten, bildet auch für sich allein mächtige Gänge. Man benutzt ihn als Zuschlag (Flußmittel, worauf der Name hindeutet) beim Ausschmelzen der schweren Metalle aus den Erzen, sowie zur Darstellung der zum Glasätzen dienenden Fluorwasserstoffsäure.

K. Verbindungen des Wasserstoffs mit Schwefel, Stickstoff und Kohlenstoff.

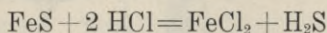
Schwefelwasserstoff.

§ 55. Wenn man Wasserstoff durch ein Kugelrohr leitet, in § 55. dessen Kugel eine geringe Menge Schwefelblumen bis zum Sieden erhitzt werden, entsteht ein Gas, das sich vom Wasserstoff durch eigentümlichen Geruch unterscheidet und nur eine Verbindung der beiden Elemente sein kann:



(Wasserstoff + Schwefel = Schwefelwasserstoff).

Bequemer wird der Schwefelwasserstoff dargestellt, indem man in einer Gasentwicklungsflasche kleine Stücke käuflichen Schwefel-eisens mit verdünnter Salzsäure übergießt, wobei man sich vor dem Einatmen des Gases hüten muß (vgl. § 5). Hierbei findet folgende Umsetzung statt:



(1 Molekel Schwefel-eisen + 2 Mol. Chlornwasserstoff = 1 Mol. Eisen-chlorür + 1 Mol. Schwefelwasserstoff).

Nachdem aus dem ganzen Apparate die atmosphärische Luft ausgetrieben worden ist, entzündet man das aus dem Ableitungsröhr entweichende Gas; es verbrennt mit bläulicher Flamme zu gasförmigen Stoffen. Über die Flamme werde eine trockene große Glasglocke gebracht, sie beschlägt mit Wassertröpfchen; der gebundene Wasserstoff gibt also dasselbe Dryd wie der freie; ebenso verhält sich der Schwefel, worauf der stechende Geruch, der hier wie beim Verbrennen des elementaren Schwefels entsteht, hinweist. — Schwefelwasserstoff ist ein farbloses, sehr unangenehm nach faulenden Eiern riechendes, giftiges Gas, das sich in kaltem Wasser leicht löst (Schwefelwasserstoffwasser); er ist brennbar und, mit Sauerstoff oder atmosphärischer Luft gemischt, explosiv, ferner etwa 1,2 mal so schwer wie die gewöhnliche Luft. In den sogenannten Schwefelquellen (Nachen, Landeck i. Schl. usw.) kommt er gelöst vor. Er entweicht ferner zusammen mit anderen Gasen aus Vulkanen und entsteht auch, wie der Geruch lehrt, bei der Fäulnis organischer Stoffe.

Ammoniak (Salmiakgeist), Salmiak.

§ 56. Stickstoff und Wasserstoff lassen sich, wenn man durch § 56. ihr Gemisch elektrische Funken schlagen läßt, zur Verbindung bringen; jedoch verläuft der Vorgang in Folge der großen chemischen Trägheit des Stickstoffs sehr langsam; man nennt die Verbindung, in der auf 14,01

Gewichtsteile N 3·1,008 Gewichtsteile H kommen und die daher die Formel NH_3 erhält, Ammoniak; sie ist ein stechend riechendes Gas, das in wässriger Lösung als Salmiakgeist in den Handel gelangt.

Man erwärme starken Salmiakgeist vorsichtig in der Kochflasche a (Fig. 28), leite das entweichende Gas durch ein mit Stücken

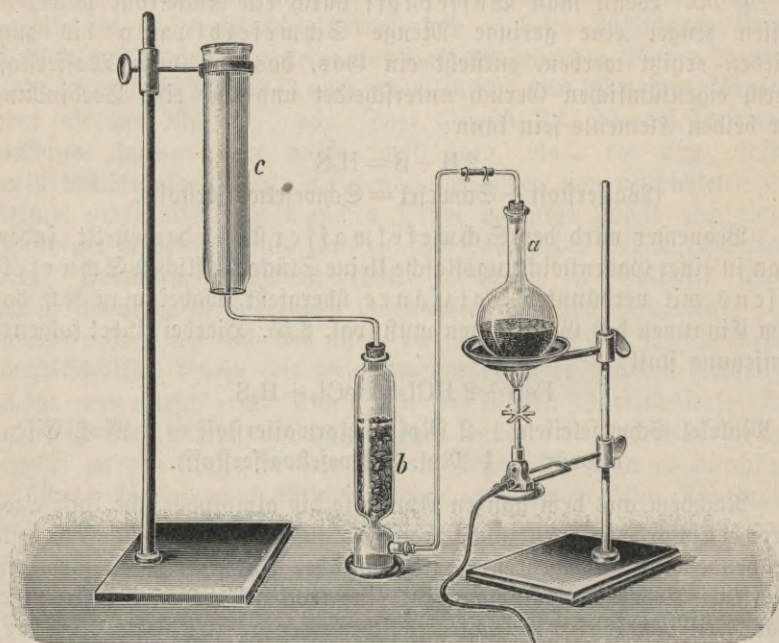


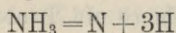
Fig. 28.

von gebranntem Kalk gefülltes Gefäß b (den Trockenturm) in einen ausgetrockneten umgekehrten Zylinder c, ebenso in andere verkehrt gehaltene Gefäße. Außer durch Luftverdrängung kann man das Ammoniakgas auch über Quecksilber auffangen. Es kann durch den stechenden Geruch sowie daran erkannt werden, daß es rotes Lackmuspapier blau färbt¹⁾. Ein brennender Holzspan erlischt in ihm. Aus einem mit der Mündung nach oben gestellten Gefäße entweicht es rasch. Man verschließe ein mit Ammoniak gefülltes Probierglas mit dem Daumen und öffne es unter Wasser; die Flüssigkeit steigt rasch im Gefäße auf, indem sie das Gas absorbiert (vgl. die ähnliche

¹⁾ Stoffe, welche schwach angesäuerte und dadurch rot gefärbte Lackmuspapier oder rotes Lackmuspapier blau färben, sich also Pflanzenfarbstoffen gegenüber entgegengesetzt wie die Säuren verhalten (vgl. S. 45 Anmerkung), heißen basisch oder alkalisch reagierend.

Erscheinung beim Chlorwasserstoff, § 49, Fig. 26); auch die entstehende Lösung zeigt basische Reaktion.

Leichter als die Synthese gelingt die Zerlegung des Gases. In einem Hofmannschen Zerlegungsapparate (Fig. 29), der sich von dem früher beschriebenen (vgl. § 29) durch das Material der Elektroden (Kohle statt Platin) unterscheidet, wird durch konzentrierte Ammoniaklösung (mit einem Zusatz von Ammoniumsulfat) ein kräftiger galvanischer Strom geleitet. An beiden Elektroden scheiden sich farblose Gase ab, und zwar an der Anode *d* 1 Raumteil Stickstoff und an der Kathode *c* 3 Raumteile Wasserstoff. Man kann den Vorgang, bei welchem das Ammoniak in seine beiden Elemente zerfällt, als Elektrolyse dieser Verbindung bezeichnen. Auch die Elektrolyse von gasförmigem Ammoniak kann ausgeführt werden, wobei sich ergibt, daß die Elemente nach der Trennung zusammen einen doppelt so großen Raum einnehmen wie das unzerlegte Gas. Folgende Gleichung stellt den Vorgang dar:



(1 Molekel Ammoniak = 1 Atom Stickstoff + 3 Atome Wasserstoff).

Ammoniak, NH_3 , ist ein farbloses, stechend riechendes, leicht kondensierbares Gas von der Dichte 0,59 (auf atm. Luft bezogen); es ist in Wasser außerordentlich leicht löslich (zu wässrigem Ammoniak oder Salmiakgeist), reagiert alkalisch, ist nicht atmbar und kann Verbrennungen nicht unterhalten. In der Natur entsteht es überall, wo stickstoffhaltige organische Stoffe, z. B. die Auswürfstoffe der Tiere, verwesen, wobei es sich durch seinen Geruch bemerkbar macht. Man erhält Ammoniaklösungen in großer Menge bei der Leuchtgasbereitung und verwendet das hieraus gewonnene wasserfreie Gas, weil es, verflüssigt und nachher zur Verdampfung gebracht, der Umgebung sehr viel Wärme entzieht, in Kältemaschinen zur Erzeugung niedriger Temperaturen (für die Darstellung von künstlichem Eis usw.). Die Lösung dient zur Fleckenreinigung und zu Laboratoriumszwecken.

Man bringe über eine Schale mit starkem Salmiakgeist einen mit Salzsäure befeuchteten Glasstab; die Gase, die aus den

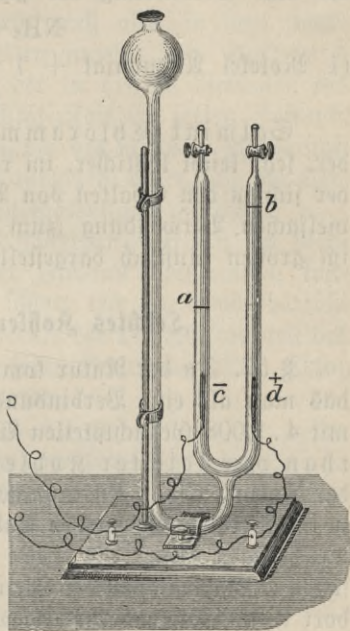
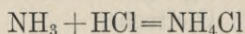


Fig. 29.

beiden Flüssigkeiten entweichen, bilden einen Rauch von weißen, festen, schwebenden Teilchen. Denselben Stoff — Salmiak genannt — erhält man in kleinen Körnchen, wenn man Salzsäure und Salmiakgeist vorsichtig mischt und die Flüssigkeit eindampft; er ist als eine Verbindung der gelösten Gase zu betrachten:



(1 Molekel Ammoniak + 1 Molekel Chlorwasserstoff = 1 Molekel Salmiak).

Salmiak (Chlorammonium) ist ein farbloser, scharf schmeckender, sehr leicht löslicher, im regulären System kristallisierender Stoff, der sich in den Spalten von Vulkanen häufig findet und wegen seiner vielfachen Verwendung (zum Löten, für galvanische Elemente usw.) im großen künstlich dargestellt wird.

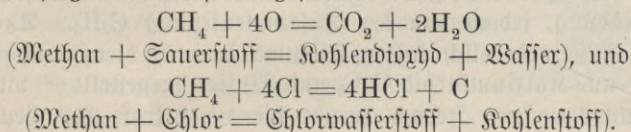
Leichtes Kohlenwasserstoffgas (Methan).

§ 57. § 57. In der Natur kommt nicht selten ein brennbares Gas vor, das man als eine Verbindung von 12 Gewichtsteilen Kohlenstoff mit 4.1,008 Gewichtsteilen Wasserstoff erkannt hat; es wird Methan oder leichter Kohlenwasserstoff genannt und entspricht der Formel CH_4 . An manchen Orten strömt es aus Erdspalten aus, so im Petroleumgebiet von Baku am Kaspischen Meere, wo es entzündet die heiligen Feuer der alten Parsen bildete; ferner kommt es nicht selten in Hohlräumen der Steinkohlenflöze (Grubengas) vor, dringt von dort in die Kohlenbergwerke und erzeugt, mit Luft gemischt, die durch ihre Explosivität gefährlichen „schlagenden Wetter“. Auch auf dem Grunde von Sümpfen entsteht es als Produkt der Fäulnis organischer Stoffe und entweicht, insbesondere wenn der Schlamm aufgewühlt wird, in Blasenform (Sumpfgas). Künstlich erhält man das Gas, wenn man in einem Kolben ein Gemisch gleicher Mengen von wasserfreiem Natriumazetat (essigsaurem Natrium) und Ätznatron vorsichtig erhitzt. Nachdem die atmosphärische Luft ausgetrieben ist, entzündet man das aus dem Ableitungsrohr entweichende Gas. Über die wenig helle Flamme halte man ein Becherglas; es zeigt einen Beschlag von Wassertröpfchen. Kehrt man es rasch um und gießt etwas Kalkwasser hinein, so entsteht eine weiße, auf Kohlendioxyd deutende Trübung. Man beachte ferner, daß das Gas in einem durch Wasser verdrängung gefüllten Gefäße nur dann bleibt, wenn man es mit der Öffnung nach unten hält.

Man fülle einen Zylinder mit Methan und einen gleich weiten, aber doppelt so hohen mit Chlor. Hierauf stelle man den kleineren umgekehrt auf den größeren, entferne die Glasplatten und vermische die Gase durch Schwenken (unter sorgfältiger Vermeidung von Sonnenlicht). Dann bringe man zwischen die nur wenig voneinander entfernten

Zylinder einen brennenden Span; es erfolgt eine ruhige Verbrennung unter Abscheidung von Ruß, d. h. Kohlenstoff, sowie unter Bildung von Chlorwasserstoff, der durch Ammoniak nachgewiesen werden kann. Genaue Versuche lehren, daß hierbei kein Chlor übrig bleibt. Nun brauchen zwei Raumteile Chlor die gleiche Menge Wasserstoff zur Bildung der Verbindung; diese muß also in dem angewandten einen Raumteil Methan enthalten gewesen sein. Auch durch Elektrolyse hat man nachgewiesen, daß der in einem Volumen des leichten Kohlenwasserstoffs gebundene Wasserstoff im freien Zustande zwei Volumina einnimmt. Über den Raum des mit dem Wasserstoff verbundenen Kohlenstoffs läßt sich nichts aussagen, da er, aus der Verbindung frei gemacht, einen anderen Aggregatzustand annimmt.

Leichter Kohlenwasserstoff (Methan) CH_4 ist ein farb- und geruchloses, mit schwach leuchtender Flamme brennendes, kondensierbares Gas. Er ist 0,55 mal so schwer wie die atmosphärische Luft. Er findet sich in der Natur und ist ferner der Hauptbestandteil des Leuchtgases. Seine Verbrennung sowie seine Zerlegung durch Chlor können in folgender Weise dargestellt werden:



Leuchtgas.

§ 58. In einem nahezu horizontal gestellten Probierglase a (Fig. 30) § 58. werden Holzspäne erhitzt. Die entweichenden Gase und Dämpfe leite man durch ein rechtwinklig gebogenes Glasrohr b in ein weites Probierglas, das zum Zwecke der Kühlung in einem mit kaltem Wasser gefüllten Zylinder c steht. In diesem Probierglase verdichten sich die schweren braunen Dämpfe, während die eigentlichen Gase durch das Abzugrohr d entweichen. Nach einiger Zeit kann man sie entzünden; sie

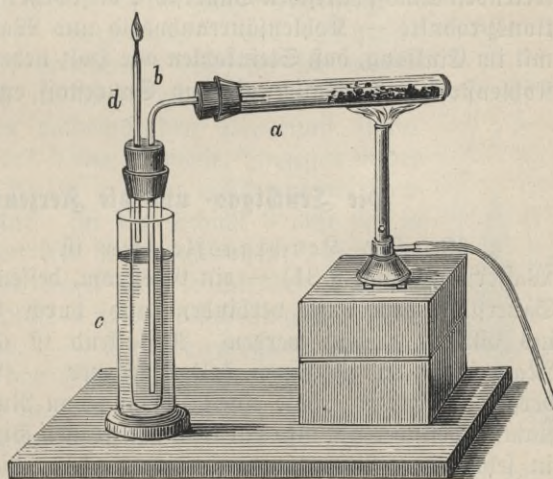


Fig. 30.

verbrennen mit leuchtender Flamme. Als Verbrennungsprodukte können Kohlendioxyd und Wasser (wie in § 57) nachgewiesen werden. Durch ein ähnliches — als trockene Destillation bezeichnetes — Verfahren gewinnt man in den Gasanstalten das allgemein zu Beleuchtungszwecken, zum Kochen, sowie zum Betrieb von Motoren dienende Leuchtgas; als Ausgangsmaterial dienen zumeist Steinkohlen, die in tönernen Zylindern (Retorten genannt) erhitzt werden. Nebenprodukte sind 1. Koks, d. h. die in den Retorten bleibenden, sehr kohlenstoffreichen Rückstände, 2. Teer und 3. Ammoniakwasser. Das Leuchtgas, welches einer sehr umständlichen Reinigung bedarf, ist keine chemische Verbindung, sondern ein Gemenge verschiedener Gase; unter diesen sind die wichtigsten Wasserstoff H, leichter Kohlenwasserstoff CH_4 und schwerer Kohlenwasserstoff (Äthylen) C_2H_4 , letztgenannter ein brennbares Gas, das, auf die gleiche Menge Wasserstoff bezogen, doppelt so viel Kohlenstoff wie Methan enthält. Untergeordnet finden sich noch im Leuchtgase Kohlenoxydgas (vgl. § 46), die Hauptursache seiner giftigen Wirkungen, und Acetylen, gleich Methan und Äthylen eine Kohlenwasserstoffverbindung, jedoch von der Zusammensetzung C_2H_2 . Acetylen, das mit außerordentlich heller Flamme brennt, dient auch für sich allein — aus Kalziumkarbid CaC_2 und Wasser dargestellt — vielfach zu Beleuchtungszwecken. Jedoch beruht die Leuchtkraft des Leuchtgases weniger auf seinem Gehalt an Acetylen als an schwerem Kohlenwasserstoff, welcher ebenfalls eine sehr helle Flamme gibt und in größerer Menge in ihm vorhanden ist. Die in den verschiedenen Bestandteilen des Leuchtgases enthaltenen Elemente — Kohlenstoff, Wasserstoff und in geringerer Menge Sauerstoff — erklären (im Verein mit dem hinzutretenden atmosphärischen Sauerstoff) die vorher nachgewiesenen Oxydationsprodukte — Kohlen säureanhydrid und Wasser — und stehen damit im Einklang, daß Steinkohlen wie Holz neben dem Hauptbestandteil Kohlenstoff auch Wasserstoff und Sauerstoff enthalten.

Die Leuchtgas- und die Kerzenflamme.

§ 59. § 59. Die Leuchtgasflamme ist — ebenso wie die des Wasserstoffs (vgl. § 31) — ein Gasstrom, dessen Teilchen sich mit dem Sauerstoff der Luft verbinden und durch die Oxydationswärme ins Glühen versetzt werden. Auffallend ist ihre starke Leuchtkraft. Man führe in sie einen kalten Körper — Porzellan, Glas oder dergl. — ein; er erhält einen Überzug von Ruß. In der Leuchtgasflamme befindet sich also ein trotz der großen Hitze fest bleibender Stoff in sehr feiner Verteilung, nämlich Kohle, die sich nur durch Zersetzung des Äthylens und anderer kohlenstoffreicher Verbindungen

infolge der hohen Flammentemperatur gebildet haben kann. Es scheint also, daß — wie bei der Wasserstoffflamme durch hineingebrachte feste Körper gezeigt wurde — auch hier nicht die glühenden Gase, sondern glühende feste Teile das starke Leuchten verursachen. Bewiesen wird dies durch den Bunsenschen Brenner, der zur Erzeugung nichtleuchtender, jedoch sehr heißer Flammen in Werkstätten, Haushaltungen, Laboratorien usw. dient (Fig. 31). Durch die Röhre a mit ihrem Ansatz b dringt Leuchtgas in das vertikal stehende weitere Rohr c, in welches gleichzeitig durch die Öffnungen d von außen atmosphärische Luft einströmt. Entzündet man das aus e entweichende Gasgemisch, so ist auch im Innern der Flamme Sauerstoff vorhanden, und die sich ausscheidende Kohle kann sofort verbrennen. Infolgedessen fallen die glühenden festen Teile fort, und die Flamme ist wenig hell, hingegen durch die in ihr überall gleichmäßig stattfindende Drydation außerordentlich heiß. Werden hingegen die Öffnungen d durch Drehung einer meist vorhandenen Hülse geschlossen, so entsteht die gewöhnliche leuchtende Gasflamme. Zur Erzeugung des Gasglühlichts bringt man einen Auersehen Glühstrumpf in die Außenschicht der nichtleuchtenden Bunsenflamme; dieser unschmelzbare Hohlkörper wird hierdurch auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt und strahlt das bekannte blendende Licht aus.

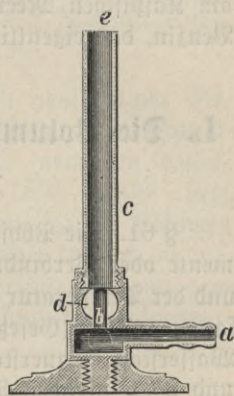


Fig. 31.

Eine Kerzenflamme (Fig. 32) ist von einer Leuchtgasflamme nicht wesentlich verschieden. Aus dem geschmolzenen Stearin — einer aus Fetten dargestellten Masse, die im Dochte d aufsteigt — bilden sich brennbare, vorwiegend aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehende Gase, die im unverbrannten Zustand sich im inneren Keil a befinden. Durch den von außen eindringenden Sauerstoff findet in dem gelben Mantel b eine teilweise, hingegen in der dünnen farblosen Hülle c eine vollkommene Verbrennung der Gase statt. In der Schicht b läßt sich in der vorher angegebenen Art Ruß nachweisen; durch sein Glühen macht er diesen Keil zum leuchtenden Teil der Kerzenflamme. Die Hülle c zeichnet sich hingegen durch hohe Temperatur aus. — Die Leuchtgas- und die Kerzenflamme wie das Gasglühlicht bestätigen also, daß die Leuchtkraft von Flammen auf dem Glühen fester Stoffe (des ausgeschiedenen Kohlenstoffs oder der eingeführten Glühkörper) beruht.

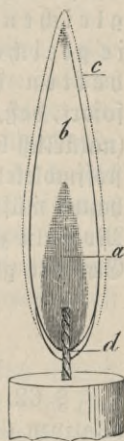


Fig. 32.

Erdöl (Petroleum).

- § 60. § 60. Erdöl (Steinöl, Naphtha, Petroleum) ist eine farblose oder bräunliche, leicht entzündliche, dünnere oder dickere Flüssigkeit vom spez. Gewicht 0,7—0,9, die, ähnlich dem Leuchtgase, ein Gemisch von Kohlenwasserstoffverbindungen ist, jedoch solchen, die bei gewöhnlicher Temperatur flüchtig sind. Es kommt an verschiedenen Orten im Innern der Erde in gewaltigen Mengen vor (Nordamerika, Halbinsel Apsheron am Kaspischen Meere, Galizien usw.) und wird durch Destillation in Benzin, das eigentliche Brennöl, Schmieröl usw. geschieden.

L. Die Volumverhältnisse der Gase; Molekulartheorie.

Die Avogadro'sche Hypothese.

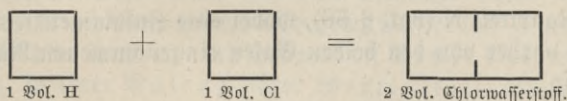
- § 61. § 61. Die Physik lehrt, daß sämtliche Gase, gleichgültig ob sie Elemente oder Verbindungen sind, denselben Veränderungen des Druckes und der Temperatur ausgesetzt, sich in gleicher Weise ausdehnen oder zusammenziehen (Gesetze von Boyle und von Gay=Lussac). Mengen von Wasserstoff, Sauerstoff, Chlornwasserstoff usw., die bei 760 mm Druck und 0° C gleichen Raum erfüllen, würden dies daher auch bei jedem anderen Druck und jeder anderen Temperatur tun, natürlich, falls die neuen Bedingungen für alle wiederum dieselben sind. Ebenso wie die eigentlichen Gase verhalten sich Wasserdampf und andere Dämpfe, wenn der Übergang in den flüssigen Zustand ausgeschlossen ist. Diese Tatsachen, denen bei den festen und flüssigen Körpern durchaus gegenteilige gegenüberstehen, haben zu der Annahme geführt, daß alle Gase in ihrem inneren Bau gleichartig sind, d. h. daß sie unter gleichen äußeren Bedingungen eine gleich große Zahl je gleiche Räume erfüllender Teilchen (Molekeln) enthalten (Avogadro'sche Hypothese, 1811). Hieraus folgt sofort, daß, da 1 l Sauerstoff 15,88 mal so schwer ist wie 1 l Wasserstoff (natürlich bei gleichem Druck und gleicher Temperatur), auch die Sauerstoffmolekel 15,88 mal so schwer ist wie die Wasserstoffmolekel. Überhaupt müssen für alle gasförmigen Stoffe die absoluten Gewichte der Molekeln zueinander in demselben Verhältnisse stehen wie die absoluten Gewichte gleicher, unter denselben Bedingungen gemessener Raumteile.

Die Molekeln gasförmiger Stoffe.

- § 62. § 62. Aus der Avogadro'schen Hypothese lassen sich zunächst die relativen Gewichte der Molekeln gasförmiger Stoffe, beispielsweise auf Wasserstoff bezogen, berechnen. Dies wurde soeben für den Sauerstoff gezeigt. Dabei stellte sich heraus, daß die Sauerstoffmolekel 15,88 mal

so schwer ist wie die Wasserstoffmolekel. Dieselbe Zahl gibt das Verhältnis der Atomgewichte beider Grundstoffe an, denn wir fanden (vgl. § 36) $O = 16,00$ und $H = 1,008$. Hieraus folgt, daß die beiden Molekeln gleichviel Atome enthalten müssen. Für Sauerstoff und Wasserstoff lassen sich also aus den Volumengewichten nicht nur die relativen Gewichte der Molekeln, sondern auch der Atome ableiten. Ähnlich ist es bei anderen gasförmigen oder vergasbaren Elementen, wie Chlor, Brom, Schwefel usw. Hierbei ergibt sich durchgängig eine Übereinstimmung mit den aus den Verbindungsgewichten gefolgerten Atomgewichten, wodurch diese in bedeutsamer Weise bestätigt werden.

Weitere wichtige Schlüsse über die Molekeln gasförmiger Elemente und Verbindungen lassen sich ziehen, falls wir die Volumverhältnisse bei der Vereinigung von Gasen, die (nach den Untersuchungen von Gay-Lussac und Humboldt 1805—1808) stets sehr einfach sind, berücksichtigen. Wir wissen, daß sich 1 Volumen Wasserstoff stets mit 1 Volumen Chlor verbindet (vgl. § 50 und § 51); das entstandene Chlorwasserstoffgas erfüllt alsdann denselben Raum wie vorher seine Bestandteile. Man kann dies folgendermaßen darstellen:

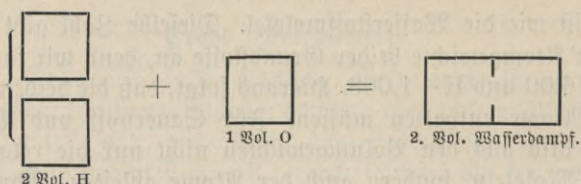


Hieraus folgt nach der Avogadro'schen Hypothese:

1 Molekel H + 1 Molekel Cl = 2 Molekeln Chlorwasserstoff, sowie
 $\frac{1}{2}$ Molekel H + $\frac{1}{2}$ Molekel Cl = 1 Molekel Chlorwasserstoff.

In der Molekel Chlorwasserstoff würde sich hiernach eine halbe Molekel H und eine halbe Molekel Cl befinden. Da nach allen unseren Erfahrungen in keiner Verbindung noch kleinere Teile als diese enthalten sind, dürfen wir sie unbedenklich als die kleinsten überhaupt existierenden Teilchen des Wasserstoffs sowie des Chlors, d. h. als Atome, betrachten. Somit würde die Molekel des Wasserstoffs aus 2 Atomen H, die des Chlors aus 2 Atomen Cl und die des Chlorwasserstoffs aus 1 Atom H und 1 Atom Cl bestehen; demnach sind die Molekularformeln für Wasserstoff, Chlor und Chlorwasserstoff H_2 , Cl_2 und HCl .

Bei der Oxidation des Wasserstoffs verbinden sich stets 2 Raumteile H mit 1 Raumteil O (vgl. § 29); hierbei findet eine Zusammenziehung statt, so daß das entstehende Wasser, falls es in Dampf- form erhalten wird, nur zwei Drittel des Raumes erfüllt, den die Gase vor der Vereinigung eingenommen haben. Also

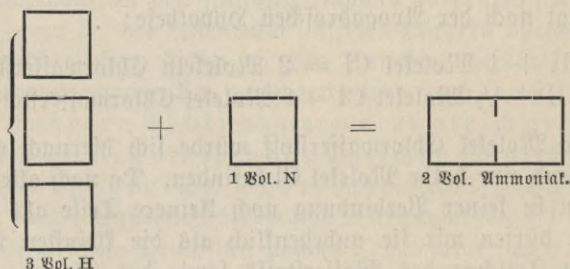


Mithin

2 Molekeln H + 1 Molekel O = 2 Molekeln Wasser, und
 1 Molekel H + $\frac{1}{2}$ Molekel O = 1 Molekel Wasser.

Die Wassermolekel würde mithin durch Verbindung von 1 Molekel gleich 2 Atomen H mit einer halben Molekel O entstehen. Diese dürfen wir — aus denselben Gründen, wie sie für den Wasserstoff und das Chlor angeführt wurden — als unteilbar, d. h. als Atom betrachten. Hiernach wäre die Molekel des Sauerstoffs, ebenso wie die des Wasserstoffs und des Chlors, zweiatomig, also gleich O_2 , hingegen die des Wassers dreiatomig, und zwar der schon früher eingeführten Formel H_2O entsprechend.

Bei der Synthese des Ammoniaks verbinden sich 3 Raumteile H mit 1 Raumteil N (vgl. § 56), wobei eine Zusammenziehung auf die Hälfte des vorher von den beiden Gasen eingenommenen Raumes stattfindet; also

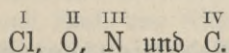


Hieraus schließt man wie vorher, daß die Stickstoffmolekel zweiatomig, die Molekel des Ammoniaks aber vieratomig, nämlich aus 3 Wasserstoffatomen und 1 Stickstoffatom zusammengesetzt ist. Mithin wäre die Molekularformel des Stickstoffs N_2 und die des Ammoniaks, wie schon früher angegeben, H_3N . Weitere Untersuchungen machen wahrscheinlich, daß nicht nur die Molekeln des Wasserstoffs, Chlors, Sauerstoffs und Stickstoffs, sondern auch die vieler anderen Elemente — falls sie gasförmig sind — aus zwei Atomen bestehen.

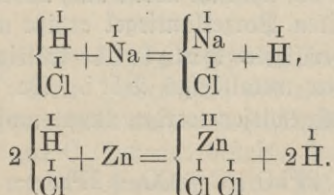
Molekulargewicht, Valenz.

§ 63. Unter dem Molekulargewicht eines Stoffes — sei er § 63. einfach oder zusammengesetzt — verstehen wir die Summe seiner Atomgewichte. Das Molekulargewicht von Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff usw. würde daher doppelt so groß wie das entsprechende Atomgewicht sein, also für Wasserstoff $1,008 \cdot 2 = 2,016$, für Sauerstoff $16,00 \cdot 2 = 32,00$, für Stickstoff $14,01 \cdot 2 = 28,02$ uff. Ebenso ergibt sich das Molekulargewicht des Chlorwasserstoffs HCl gleich $1,008 + 35,45 = 36,46$, das des Wassers H_2O gleich $1,008 \cdot 2 + 16,00 = 18,02$, das des Ammoniaks H_3N gleich $1,008 \cdot 3 + 14,01 = 17,03$ uff.

Die Formeln des Chlorwasserstoffs, Wassers und Ammoniaks — HCl, H_2O und H_3N — lehren, daß das Chloratom 1 Atom H, das Sauerstoffatom 2 Atome H und das Stickstoffatom 3 Atome H zu binden vermag. Für das Methan (vgl. § 57) nimmt man die Formel CH_4 an — allerdings ohne sie, da der Kohlenstoff nicht vergasbar ist, unmittelbar aus der Avogadro'schen Hypothese ableiten zu können —; somit würde die Affinität des Kohlenstoffatoms sogar der von 4 Atomen H entsprechen. Die vier Elemente Chlor, Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff zeigen also dem Wasserstoff gegenüber eine Verschiedenheit in ihrer atombindenden Kraft oder, wie man zu sagen pflegt, in ihrer Valenz (ihrer Wertigkeit); dementsprechend heißt das Chlor, ebenso wie der als Einheit zugrunde liegende Wasserstoff und wie jedes dem Chlor in der atombindenden Kraft gleiche Element, einwertig, der Sauerstoff zweiwertig, der Stickstoff dreiwertig und der Kohlenstoff vierwertig. Man kann die Valenz eines Grundstoffs etwa in folgender Weise veranschaulichen:



Auch auf andere Weise kann man die Valenz eines Elements ermitteln, beispielsweise indem man festzustellen sucht, wieviel Atome H durch ein Atom dieses Elements vertreten (substituiert) werden können. So ist Natrium einwertig, da sein Atom im Chlorwasserstoff 1 Atom H ersetzen kann, Zink hingegen zweiwertig, denn sein Atom vermag 2 Atome H zu vertreten; folgende Gleichungen stellen dies dar:

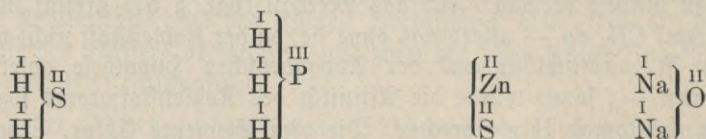


Folgendes Verzeichniß gibt die Valenz für einige wichtige Grundstoffe an:

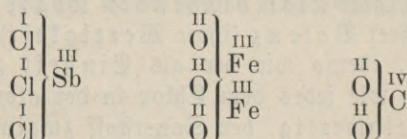
Einwertig sind H, Cl, Br, J — K, Na, Ag;
 zweiwertig sind O, S — Ca, Mg, Zn, Cu;
 dreiwertig sind N, P — Al, Sb;
 vierwertig sind C, Si — Sn, Pt.

Sedoch zeigen viele Grundstoffe eine wechselnde Valenz; so tritt Kupfer nicht nur zweiwertig, sondern auch einwertig, Antimon nicht nur dreiwertig, sondern auch fünfwertig auf; ferner ist Eisen zwei- und dreiwertig, wie beispielsweise seine beiden Chlorverbindungen — Eisenchlorür FeCl_2 und Eisenchlorid FeCl_3 — lehren.

Schließlich mögen noch einige Beispiele zeigen, wie in Verbindungen aller Art — mögen sie Wasserstoff enthalten oder nicht — die Zahl der die Molekel bildenden Atome von ihrer Valenz abhängt:



Schwefelwasserstoff. Phosphorwasserstoff. Schwefelzink. Natriumoxyd.



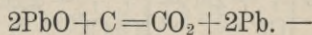
Antimontrichlorid. Eisenoxyd. Kohlendioxyd.

M. Reduktionsvorgänge.

Zerlegung von Oxyden durch Kohlenstoff und Wasserstoff.

§ 64. Im allgemeinen gelingt es nicht, den Sauerstoff der Oxyde durch Erhitzen in Freiheit zu setzen (Ausnahme Quecksilberoxyd). Hingegen konnten wir ihn dem Wasserstoff durch die starke Affinität, die Zink, Natrium usw. zu ihm haben, entreißen (vgl. § 26 und § 27). Wir wollen versuchen, auf ähnliche Weise auch andere Oxyde zu zerlegen.

In einem bedeckten Porzellantiegel erhitze man ein Gemisch von Bleioxyd mit pulverisierter Holzkohle kräftig; nach längerer Zeit findet man am Boden metallisches Blei. Da das Entweichen von Kohlendioxyd nachgewiesen werden kann, muß folgender Vorgang stattgefunden haben:



Durch die Glasröhre C (Fig. 33), in der sich pulverförmiges schwarzes Kupferoxyd befindet, leitet man Wasserstoff, der in der Flasche A entwickelt und in B durch Chlorkalzium getrocknet worden ist; er entweicht bei D und kann dort (nach längerem Durchleiten) entzündet werden. Nun erhitzt man das Kupferoxyd kräftig; es erglüht, und die Flamme erlischt, da nicht mehr Wasserstoff, sondern Wasserdampf austritt. Setzt man das Erhitzen fort, bis wieder Wasserstoff entweicht, so findet sich im Rohr schließlich statt des Oxyds metallisches Kupfer in fein verteilterm Zustand. Der Vorgang ist folgender:

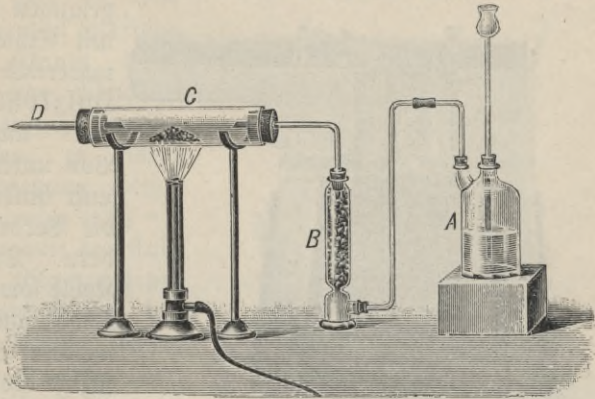
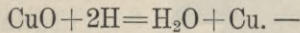


Fig. 33.



Vorgänge dieser Art, bei denen der Sauerstoff aus einem Oxyd durch die Affinität eines hinzugebrachten Grundstoffs entfernt und somit der andere Bestandteil in Freiheit gesetzt wird, heißen Reduktionen; sie sind den Oxydationen entgegengesetzt. Kräftige Reduktionsmittel sind von Metallen Natrium und Zink, von Nichtmetallen Kohlenstoff und Wasserstoff.

Technisches (Metallgewinnung aus oxydischen Erzen).

§ 65. Auf der Reduktion durch Kohlenstoff beruht die technische Gewinnung verschiedener Metalle aus oxydischen Erzen; insbesondere wird auf diese Weise Zinn aus Zinnstein SnO_2 und Eisen aus den oxydischen Eisenerzen (vgl. über diese Mineralien § 24) dargestellt.

Das Ausschmelzen des Eisens geschieht in Hochofen von etwa 20 m Höhe (Fig. 34), deren Innenraum aus einem zylindrischen Teile A (Gestell), dem kurzen abgestumpften Regel B (Kast) und einem längeren abgestumpften Regel C (Schacht) besteht. Die Erze (Magneteisen, Roteisenerz usw.) werden zunächst mit Kalk, Quarz, Flußpat

usw. — die als Zuschläge mit den Verunreinigungen zu glasartigen Massen, den Schlacken, zusammenschmelzen sollen — gemengt und

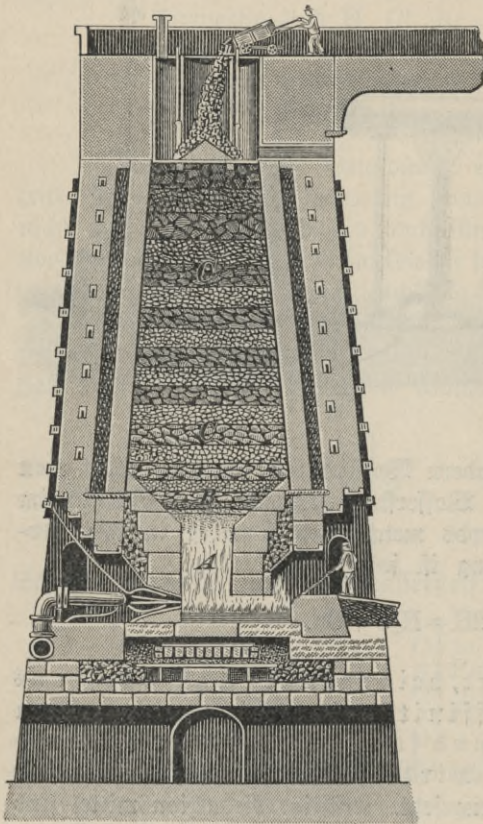


Fig. 34.

gelangen dann abwechselnd mit Schichten des Brennmaterials (Koks oder Holzkohle) von oben in den angeheizten Ofen. Von unten wird gleichzeitig Luft hindurchgetrieben, um die Verbrennung zu befördern. Durch die glühende Kohle sowie durch ihr erstes Oxydationsprodukt, das noch weiterer Sauerstoffaufnahme fähige Kohlenoxydgas, werden die Erze zu metallischem Eisen reduziert; daneben bilden sich Schlacken. Schließlich sammelt sich unten das geschmolzene Metall an und wird von Zeit zu Zeit durch das sonst verstopfte Stichoelch abgelassen (in der Figur rechts unterhalb von A). Man gewinnt auf diese Weise Roh- oder Gußeisen; es enthält vom Hochofenprozeß her 2—5 % C, ist hart und spröde und wird zur Herstellung von Gußwaren verwendet oder zu den anderen Eisen-

sorten — die man nach einer älteren Einteilung als Schmiedeeisen und Stahl zusammenfaßt — weiter verarbeitet. Schmiedeeisen enthält weniger als 1 % C, ist sehr dehnbar und kann gehämmert, gewalzt und geschweißt werden. Stahl steht mit einem Kohlegehalt von 1—2 % in der Mitte zwischen Roh- und Schmiedeeisen und zeichnet sich durch die Fähigkeit, sich härten zu lassen, sowie durch große Elastizität und Festigkeit aus (vgl. S. 2 Anm.).

Pflanzenernährung.

§ 66.

§ 66. In eine große Flasche (Fig. 35) bringe man grüne Pflanzenteile (am besten Wasserpflanzen wie *Elodea canadensis* usw.), gieße kohlenstoffreiches Wasser, durch Mischen von gewöhnlichem mit

Selterwasser erhalten, darauf und lasse die Sonnenstrahlen kräftig auf den Inhalt wirken. In dem zum Auffangen bestimmten Gefäße sammelt sich ein Gas an, das durch einen glimmenden Holzspan als Sauerstoff erkannt wird. Gleichzeitig hat eine Abnahme des gelösten Kohlensäureanhydrids stattgefunden; es findet nämlich eine Zersetzung dieses Gases in seine Elemente ($\text{CO}_2 = \text{C} + 2\text{O}$) unter Aufnahme des Kohlenstoffs in den Pflanzenkörper und unter Ausscheidung des Sauerstoffs statt. Genaue Untersuchungen haben ergeben, daß die Pflanzen mit ihren Wurzeln zwar mineralische Stoffe (die Bodensalze), aber Kohlenstoff oder dessen Verbindungen nur in ge-

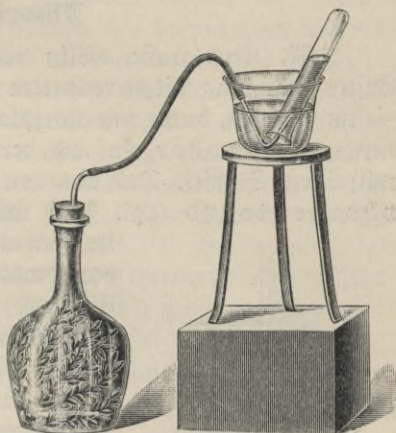


Fig. 35.

ringem Maße aufnehmen; der Kohlenstoff, der Hauptbestandteil des Pflanzenleibes, stammt also im wesentlichen aus dem Kohlendioxyd der Atmosphäre, welches durch die Spaltöffnungen in die pflanzlichen Gewebe gelangt und hier — sofern sie Blattgrün enthalten — unter dem Einflusse der Sonnenstrahlen zerlegt wird. Dieser Vorgang wird die Assimilation der Pflanze genannt; in chemischer Hinsicht steht er den Reduktionsvorgängen nahe, da Ausscheidung des Kohlenstoffs aus einem Oxyde stattfindet. Jedoch unterscheidet sich die Assimilation von den vorher besprochenen Reduktionen dadurch, daß der Sauerstoff nicht an einen anderen Grundstoff gebunden, sondern in Freiheit gesetzt und in die Atmosphäre ausgeschieden wird. Umgekehrt wird bei der tierischen Atmung (vgl. § 47) Kohlenstoff oxydiert und Kohlensäureanhydrid ausgehaucht. Pflanzliche Assimilation und tierische Atmung stehen also im Gegensatz; durch den ersten Vorgang wird der Atmosphäre Kohlendioxyd entzogen, durch den zweiten zugeführt. Dies hat zur Folge, daß sich die Zusammensetzung der Luft, besonders ihr Gehalt an Kohlensäureanhydrid, nicht ändert und sie in einem Zustande bleibt, wie er für das organische Leben geeignet ist. In schwächerem Maße findet außerdem in der Pflanze (auch in den blattgrünfreien Geweben und beim Fehlen von Sonnenlicht) ein eigentlicher Atmungs-, d. h. Oxydationsprozeß mit Ausscheidung von Kohlendioxyd statt.

N. Ternäre Verbindungen (Säuren und Basen).

Phosphorsäure.

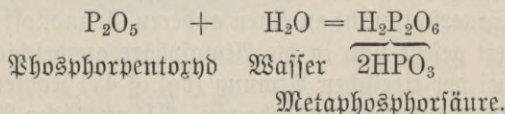
§ 67. § 67. Eine große, völlig trockene Flasche (Fig. 36) werde durch Luftverdrängung mit getrocknetem Sauerstoff gefüllt; hierauf führe man — im eisernen, durch eine Korkplatte hindurchgesteckten Löffel — brennenden Phosphor ein und verschließe nach erfolgter Verbrennung mit einem Stöpsel. Das uns von früher bekannte schneeartige Phosphorpentoxyd (vgl. § 15 und § 19) wird durch Schütteln und Klopfen möglichst am Boden vereinigt. Gießt man dann ein wenig Wasser hinzu, so zerfließt es unter Zischen. Dies beweist eine starke Wärmeentwicklung. Wir schließen, daß nicht eine Auflösung im gewöhnlichen Sinne — die ja, wie man beim Salmiak, Kochsalz usw. wahrnimmt, unter Abkühlung erfolgt —, sondern eine chemische Vereinigung stattgefunden hat. In der entstandenen Verbindung müssen mithin drei Elemente — aus dem Phosphorpentoxyd Phosphor, aus dem Wasser Wasserstoff, aus beiden Sauerstoff — enthalten sein. Man nennt derartige Stoffe ternäre Verbindungen; im Gegensatz hierzu sind die bisher behandelten Dryde,



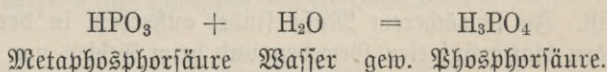
Fig. 36.

Sulfide, Chloride usw. binär.

Das hier entstandene, durch überschüssiges Wasser verdünnte Produkt heißt *Metaphosphorsäure*:



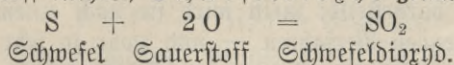
Die Lösung der *Metaphosphorsäure* färbt blaues Lackmuspapier sehr rasch rot, reagiert also — was auch ihrem Geschmacke entspricht — sauer. Beim Erwärmen bildet sich durch eine weitere Wasseraddition die gewöhnliche Phosphorsäure:



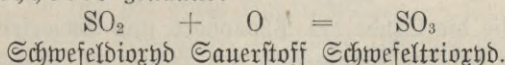
Die gewöhnliche Phosphorsäure bildet farblose, an der Luft zerfließende Kristalle und gelangt, aus Knochen dargestellt, in wässriger Lösung in den Handel.

Schweflige Säure. Schwefelsäure.

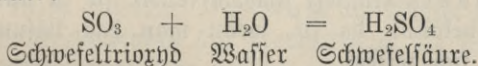
§ 68. Man verbrenne, wie früher, Schwefel an der Luft. Sein § 68. gasförmiges Dxyd macht sich durch stechenden Geruch und schwache Nebelbildung kenntlich. Über ein Schälchen mit brennendem Schwefel und einige ihm genäherte angefeuchtete Blumen werde eine Glasglocke gebracht; die Farben werden zerstört. Hierauf verbrenne man Schwefel in einem mit Sauerstoff gefüllten Zylinder (vgl. § 19), verschließe ihn und öffne unter Wasser; etwas davon dringt ein, was die leichte Absorbierbarkeit des Gases beweist. Die entstehende Lösung reagiert schwach sauer, weshalb dieses Dxyd schweflige Säure, richtiger Schwefligsäureanhydrid heißt; es wird auch, da es auf 32,06 Gewichtsteile = 1 Atomgewicht Schwefel 32,00 Gewichtsteile = 2 Atomgewichte Sauerstoff enthält, Schwefeldioxyd genannt. Also



Leitet man eine Mischung von Schwefligsäureanhydrid und Sauerstoff durch ein Rohr, in dem Platin in feiner Verteilung — etwa schwammförmiges Platin oder mit Platin überzogener Asbest — enthalten ist, und erhitzt von außen kräftig, so bildet sich durch eine merkwürdige Wirkung des Metalls¹⁾ Schwefeltrioxyd SO_3 , auch Schwefelsäureanhydrid genannt:



Das Schwefeltrioxyd, eine farblose, durch Abkühlung eisähnlich erstarrende, leicht siedende Flüssigkeit, hat ein so starkes Vereinigungsstreben zu Wasser, daß es dieses schon aus der Luft an sich zieht, auch beim Aufgießen desselben heftig zischt. Die entstehende Lösung enthält Schwefelsäure:



Schwefelsäure H_2SO_4 bildet in der Kälte Kristalle, die bei 10,5° zu einer dicken Flüssigkeit schmelzen. Die konzentrierte Schwefelsäure des Handels enthält neben der eigentlichen Säure 2—3% Wasser und ist eine farblose, ölarartige Flüssigkeit, die das spez. Gewicht 1,84 hat, erst bei 339° siedet und Wasser so begierig an sich zieht, daß sie nicht offen aufbewahrt werden darf. Wenn man sie mit Wasser mischt, so tritt bedeutende Wärmeentwicklung — unter Umständen von explosionsartigen Erscheinungen begleitet — ein (Vorsichtsmaßregeln siehe § 27). Sie schmeckt und reagiert selbst

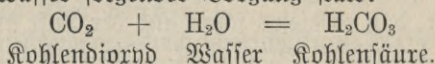
¹⁾ Chemische Wirkungen, die ein Stoff hervorbringt, ohne selbst stoffliche Veränderungen zu erleiden, heißen Kontakt- oder katalytische Wirkungen. Der wirkende Stoff — hier das Platin — heißt der Katalysator. Katalytisch ist auch die Rolle des Braunsteins bei der Sauerstoffdarstellung (vgl. S. 21).

in sehr großer Verdünnung sauer. — Man befeuchte Holz, Kork, Baumwolle usw. mit der konzentrierten Säure; es tritt Schwarzfärbung und Zerstörung ein. Dies beruht darauf, daß die genannten, wie überhaupt die organischen Stoffe sämtlich Wasserstoff und Sauerstoff enthalten, die, zu Wasser verbunden, von der Säure absorbiert werden, derart, daß kohlenstoffreiche und daher dunkle Massen zurückbleiben. Ebenso erklären sich die höchst schädlichen Wirkungen, die Schwefelsäure, innerlich genommen, auf den Organismus ausübt.

Schwefligsäureanhydrid wird zum Bleichen von Stroh, Seide usw., zum Entfernen von Flecken aus Stoffen, als Desinfektionsmittel (Schwefeln von Weinfässern) und vor allem zur Darstellung von Schwefelsäure benutzt. Diese wird in der Technik in der oben angedeuteten Weise (d. h. vermittelt des platinirten Aßbests) erst in der letzten Zeit dargestellt; meist wird sie nach einem anderen, aus England stammenden Verfahren — und zwar in sehr großem Maßstabe — als englische Schwefelsäure erhalten. Früher gewann man sie aus Eisenvitriol, worauf der alte Name *Vitriolöl* hindeutet. Sie ist einer der wichtigsten chemischen Rohstoffe und findet Anwendung zur Darstellung von Säuren, Düngemitteln, Farbstoffen, Arzneien usw.

Weitere Säuren (Kohlen-, Salpeter- und Kieselsäure).

§ 69. § 69. Wie die Oxide des Phosphors und Schwefels können sich auch die Oxide anderer Nichtmetalle mit Wasser zu Säuren vereinigen; so findet beim Einleiten und Lösen von Kohlenstoffdioxid (vgl. § 45) in Wasser folgender Vorgang statt:



Die Kohlensäure reagiert schwach sauer; sie ist nur im verdünnten Zustande bekannt, da sie, wenn man das Lösungswasser verdampfen will, sich zersetzt.

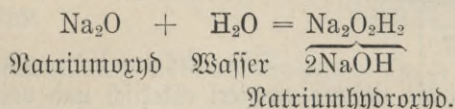
Salpetersäure HNO_3 kann durch Verbindung eines Stickstoffoxyds mit Wasser dargestellt werden, wird jedoch in der Technik aus dem in der Natur vorkommenden Natronsalpeter durch Schwefelsäure gewonnen. Die käufliche Salpetersäure ist stets durch Wasser verdünnt; sie erscheint als eine farblose, sehr saure, stechend riechende, außerordentlich zerstörend wirkende Flüssigkeit, die eine sehr vielseitige Verwendung findet, insbesondere zum Lösen von Metallen, zur Darstellung von Schießbaumwolle und anderen Sprengstoffen usw. Ihr alter Name ist Scheidewasser; sie löst nämlich Silber, aber nicht Gold, weshalb sie zum Trennen (Scheiden) beider benutzt werden kann.

Schließlich seien noch die Kieselsäuren erwähnt, die man sich durch Addition von Siliziumdioxid (Kieselsäureanhydrid, vgl. § 48)

mit wechselnden Mengen Wasser entstanden denken kann, die sich jedoch im freien Zustande meist sehr leicht zersetzen (Metakieselsäure H_2SiO_3 , Orthokieselsäure H_4SiO_4 usw.).

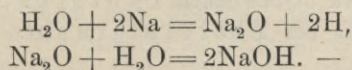
Natrium- und Kaliumhydroxyd (Laugen).

§ 70. Um zu untersuchen, ob auch aus Metalloxyden und Wasser § 70. ternäre Verbindungen erhalten werden können, stelle man durch Verbrennen von Natrium in einer Porzellanschale (vgl. § 14) Natriumoxyd Na_2O dar. Nach dem Erkalten lasse man vorsichtig auf das feste weiße Oxyd einige Tropfen Wasser fallen; die durch Zischen sich verratende starke Erwärmung beweist einen chemischen Vorgang:



Das entstandene Natriumhydroxyd ist eine feste, weiße, in Wasser leicht lösliche, an der Luft zerfließende Masse; es wirkt auf die Haut zerstörend (äzend, deshalb auch Ätznatron genannt) ein und kommt in Stangenform in den Handel. Man löse ein kleines Stück in Wasser; die Lösung hat einen eigentümlichen — laugenhaften — Geschmack und zerstört organische, besonders tierische Stoffe, weshalb sie die Fingerhaut schlüpfrig macht, ferner färbt sie rote Lackmusfarbe blau, sie hat also gleich der Ammoniaklösung (vgl. S. 56 Anm.) alkalische oder basische Reaktion. Die Lösung des Natriumhydroxyds kommt als Natronlauge in den Handel und findet vielfache Anwendung, besonders in der Seifensiederei.

Man werfe kleine Stückchen Natrium auf Wasser (vgl. § 12 und § 27). Nach dem Verschwinden des Metalls zeigt die Flüssigkeit Geschmack und Reaktion einer sehr verdünnten Natronlauge; tatsächlich kann aus ihr durch Eindampfen festes Natriumhydroxyd erhalten werden. Wir können uns denken, daß zunächst durch die starke Affinität des Natriums zum Sauerstoff Natriumoxyd Na_2O und aus diesem durch die weitere Einwirkung von Wasser Ätznatron entstanden ist:



In entsprechender Weise — d. h. durch Einwirken von Wasser auf das Oxyd oder unmittelbar auf das Metall — erhält man aus Kalium das Kaliumhydroxyd KOH , auch Ätzkali genannt, das im Aussehen und vielen Eigenschaften dem Ätznatron gleicht. Die Lösung, Kalilauge genannt, wirkt noch energischer als Natronlauge und dient gleichfalls zur Darstellung von Seifen.

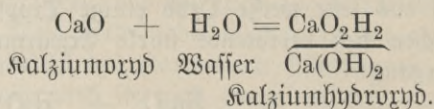
Kalziumhydroxyd (Brennen und Löschen des Kalks).

§ 71.

§ 71. Das leichte Metall Kalzium Ca (vgl. Flußspat § 54) bildet ein Dryd CaO von ähnlichen Eigenschaften wie das Kalium- oder Natriumoxyd; als gebrannter Kalk ist es allgemein bekannt. Man betropfe in einer Schüssel (Fig. 37) mehrere Stücke davon mit Wasser; sie zerfallen unter starker Wärmeentwicklung und heftigem Zischen in eine weiße pulverförmige Masse, Kalziumhydroxyd oder Ätzkalk genannt:



Fig. 37.



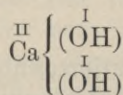
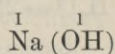
Das Kalziumhydroxyd ist in Wasser schwer löslich, die Lösung reagiert alkalisch und verhält sich in jeder Hinsicht wie eine schwache Lauge; unter dem Namen Kalkwasser dient sie als Reagens auf Kohlendioxyd (vgl. § 44 und 45).

Der gebrannte Kalk wird im Großbetriebe in Kalköfen, die gleich den Hochofen (Fig. 34) im Innern einen Schacht haben, durch starkes Glühen der in der Natur sehr verbreiteten Kalkgesteine in festen, weißen, porösen Stücken erhalten. Bei dem als Löschen des gebrannten Kalks bezeichneten Vorgang wird diesem Stoffe so viel Wasser zugesetzt, daß das entstehende Hydroxyd mit der überschüssigen Flüssigkeit einen weichen Brei, der zunächst eine sehr hohe Temperatur hat, bildet. Dieser „gelöschte Kalk“ gibt mit Sand vermisch den Mörtel, der beim Bauen zwischen die Bausteine gebracht wird und, da er an der Luft rasch erhärtet, sie aufs festeste verbindet.

Hydroxylgruppe (Hydroxyde).

§ 72.

§ 72. Im Kalium-, Natrium- und Kalziumhydroxyd kann man die Atomgruppe (OH) annehmen, welche, da durch den einwertigen Wasserstoff nicht beide Valenzen des Sauerstoffatoms gesättigt sind, noch einen freien Wert hat. Man nennt sie die Hydroxylgruppe. Danach wären die soeben besprochenen Hydroxyde Verbindungen von Metallen mit der Hydroxylgruppe:



Kaliumhydroxyd

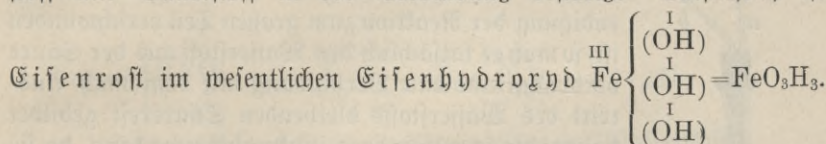
Natriumhydroxyd

Kalziumhydroxyd.

Die Hydroxyde des Kaliums, Natriums und einiger anderen Leichtmetalle werden auch Basen oder Alkalien genannt (vgl. über ihre Reaktion S. 56 Anm.).

Eisenhydroxyd (Eisenrost, Brauneisenerz).

§ 73. Die Hydroxyde der Schwermetalle lassen sich im § 73. allgemeinen nicht wie die der leichten darstellen; beispielsweise beobachtet man keinerlei Einwirkung, wenn man auf Kupferoxyd Wasser gießt. Daß jedoch auch die Schwermetalle mit Wasser reagieren, beweist das Eisen, das in trockener Umgebung völlig unverändert bleibt, in feuchter Luft jedoch sehr schnell seinen Glanz verliert und den allgemein bekannten Eisenrost, eine rotbraune pulverige Masse, bildet. Man bringe etwas davon in ein Probierglas und erhitze; an den kälteren Stellen der Wände entsteht ein Beschlag von Wassertröpfchen, der das Vorhandensein von Wasserstoff und Sauerstoff in der Verbindung bestätigt. Tatsächlich ist



Verschiedene Hydroxyde von Schwermetallen kommen als Mineralien vor; besonders wichtig unter ihnen ist das Brauneisenerz, welches auf 2 Molekeln Eisenhydroxyd 1 Molekel Eisenoxyd enthält, entsprechend der Formel $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Es ist ein in faserigen oder dichten Massen vorkommendes Mineral, Härte 5, spez. Gewicht 3—4, braun, undurchsichtig, wenig glänzend; häufig tritt es auch, mit Sand oder Ton vermischt, in erdiger Form als braunerCKER auf. Brauneisenerz ist auf Gängen und Lagern außerordentlich verbreitet und ebenso wie das Raseisenerz, eine durch Sand und andere Beimengungen verunreinigte Form dieses Minerals, von großer Wichtigkeit für die Eisengewinnung.

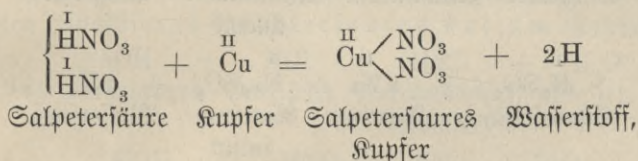
O. Säuren und Salze.**Einteilung der Säuren.**

§ 74. Die im vorigen Kapitel besprochenen Säuren — Schwefel-, § 74. Salpeter-, Kohlensäure usw. — gleichen der Salzsäure (vgl. § 49) in Geschmack und Wirkung auf Pflanzenfarben; sie sind aber ternäre Verbindungen, während die Salzsäure und die ihr analogen Säuren (HBr, HJ, HF) binär sind. Ihnen allen gemeinsam ist der Wasserstoff. Die ternären Säuren enthalten überdies — entsprechend ihrer Herkunft von Oxyden — sämtlich Sauerstoff; sie werden deshalb gewöhnlich als Sauerstoffsäuren bezeichnet. Im Gegensatz hierzu nennt man die binären Säuren, da sie außer Wasserstoff eines der halogenen Elemente enthalten, meist Haloidsäuren.

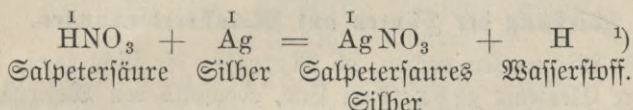
Man übergieße in einem großen Becherglase Kupfer mit verdünnter Salpetersäure (Fig. 39); unter heftigem Aufbrausen und Entweichen eines rotbraunen, erstickend riechenden Gases löst sich das Metall; aus der Lösung erhält man blaue Kristalle von salpetersaurem Kupfer (KupfERNITRAT). Unter ähnlichen Erscheinungen können fast alle Metalle in Salpetersäure — die diesen gegenüber noch wirksamer als Schwefelsäure ist — gelöst werden, so Silber unter Bildung von salpetersaurem Silber (Höllenstein), Quecksilber unter Bildung von salpetersaurem Quecksilberoxydul usw. —



Fig. 39.



und

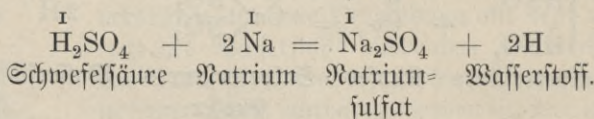
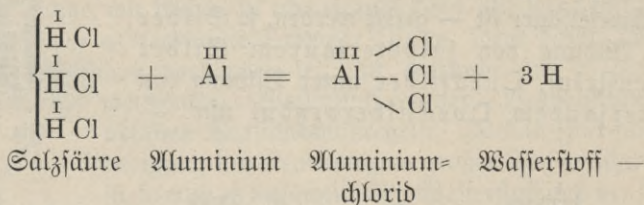
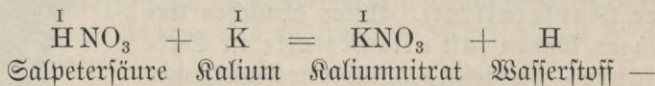


Wie bei der Schwefel- und Salpetersäure kann auch bei den übrigen Sauerstoffsäuren der Wasserstoff durch Metalle substituiert werden.

Alle Säuren — die Haloid- wie die Sauerstoffsäuren — sind hiernach Wasserstoffverbindungen, deren Wasserstoff durch Metalle ersetzt werden kann, und die sich in Lösung durch sauren Geschmack und saure Reaktion auszeichnen. Die Verbindungen, die aus ihnen bei der Substitution des Wasserstoffs durch Metalle entstehen, heißen Salze, und zwar — je nach der Säure, von der sie herkommen — salzsaure Salze oder Chloride, schwefelsaure Salze oder Sulfate, salpetersaure Salze oder Nitrate, kohlen-saure Salze oder Karbonate, kiesel-saure Salze oder Silikate usw.

¹⁾ Der aus der Salpetersäure verdrängte Wasserstoff wird nicht oder nur in geringem Grade in Freiheit gesetzt, weil er auf andere Molekeln der Säure reduzierend einwirkt und eine niedrigere Oxydationsstufe des Stickstoffs, das Stickstoffoxyd NO, erzeugt ($\text{HNO}_3 + 3\text{H} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{NO}$). Dieses, ein farbloses Gas, verbindet sich sodann mit atmosphärischem Sauerstoff zu Stickstoffdioxid NO_2 , das die entweichenden braunen Dämpfe bildet.

Bei der Ableitung der Salze aus den Säuren spielt die Valenz der Metalle eine wichtige Rolle; so vertritt das Silberatom, weil einwertig, nur 1 Atom H; hingegen entspricht 1 Atom Cu meist 2 Atomen H und verdrängt daher den gesamten Wasserstoff von 1 Molekel H_2SO_4 oder von 2 Molekeln HNO_3 . Einige Beispiele mögen dies noch erläutern:



Wirkung der Säuren auf Metallverbindungen.

§ 76. § 76. Wir wollen prüfen, ob Metalle, die nicht frei, sondern an andere Elemente gebunden sind, ebenfalls den Wasserstoff von Säuren ersetzen können.

In einem Becherglase gieße man auf körniges Kupferoxyd verdünnte Schwefelsäure; es entsteht eine blaue Lösung, aus der schwefelsaures Kupfer (Kupfervitriol) in glasglänzenden, blauen Kristallen des triklinen Systems¹⁾ auskristallisiert:

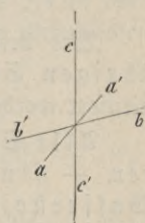
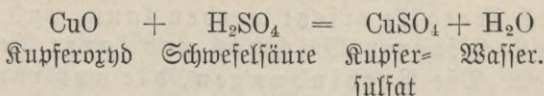
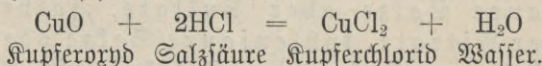


Fig. 40.

In derselben Weise behandle man Kupferoxyd mit Salzsäure; aus der grünen Lösung scheidet sich Kupferchlorid in hellgrünen rhombischen Nadeln aus:

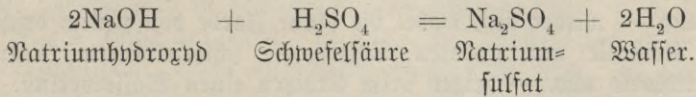


Wie Kupferoxyd werden auch die Oxide vieler anderen Metalle durch Säuren unter Salzbildung gelöst.

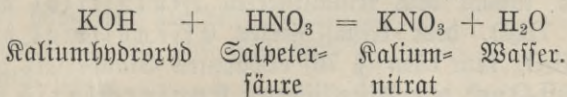
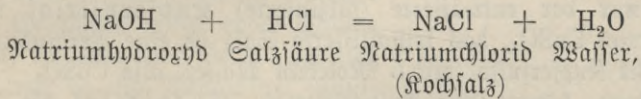
Man übergieße in einem Becherglase Stücke von Natriumhydroxyd (siehe § 70) allmählich unter Umrühren mit verdünnter

¹⁾ Die Formen des triklinen Systems können auf drei ungleich lange, sämtlich untereinander schiefwinklige Achsen (aa', bb' und cc', Fig. 40) bezogen werden.

Schwefelsäure; es tritt Auflösung des festen Körpers bei starker Wärmeentbindung ein. Man setze nun unter steter Prüfung mit blauem und rotem Lackmuspapier Säure oder — falls diese überwiegen sollte — weiteres Natriumhydroxyd zu, bis die Flüssigkeit auf den Farbstoff ohne Wirkung, d. h. neutral, ist. Beim Eindampfen kristallisiert ein weißes Salz, schwefelsaures Natrium oder Glaubersalz, in deutlichen Säulen heraus:

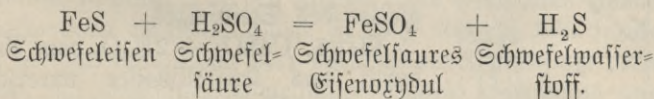


In gleicher Weise verfähre man mit Natriumhydroxyd und verdünnter Salzsäure, sowie mit Kaliumhydroxyd und verdünnter Salpetersäure; im ersten Falle erhält man Kochsalz, im zweiten kristallisiertes salpetersaures Kalium (Kalisalpeter):



Die alkalisch reagierenden Hydroxyde und die sauer reagierenden Säuren neutralisieren sich also gegenseitig, d. h. sie bilden miteinander Salze, die ohne Wirkung auf Lackmusfarbstoff sind.

Auch andere Metallverbindungen, beispielsweise manche Sulfide, werden von Säuren unter Salzbildung gelöst; so entsteht beim Übergießen von Schwefeleisen mit verdünnter Schwefelsäure eine grüne Lösung von schwefelsaurem Eisenoxydul (Eisenvitriol) bei gleichzeitigem Entweichen des unangenehm riechenden Schwefelwasserstoffgases (vgl. § 55):



Löslichkeit der Salze, Kristallwasser.

§ 77. Man bringe Bleisulfat PbSO_4 , das als weißer kristalli- § 77.
nischer Stoff in der Natur vorkommt (Bleivitriol) und auch leicht künstlich dargestellt werden kann, in ein Probierglas mit Wasser; es löst sich selbst beim Erwärmen nicht oder doch nur in sehr geringem Grade. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten gibt es also auch unlösliche (oder sehr schwer lösliche) Salze. Die löslichen Salze sind, wie man an Kupfervitriol, Kaliumnitrat usw. leicht beobachten

kann, in um so größerer Menge löslich, je höher die Temperatur — wenigstens innerhalb gewisser Grenzen — steigt.

In einem trockenen Probierglase erhitzt man völlig trockene Kupfervitriolkristalle; es entweicht Wasserdampf, der sich an den kälteren Stellen der Wände verdichtet, während eine feste weiße Masse zurückbleibt. Diese nimmt Wasser, welches man nach dem Erkalten hinzusetzt, unter Wärmeentwicklung — also unter chemischer Bindung — wieder auf, wobei die blaue Farbe von neuem erscheint. Auch Kristalle von anderen Salzen — schwefelsaurem Natrium, Kupferchlorid usw. — zeigen beim Erhitzen einen Wasserverlust.

In vielen kristallisierten Salzen ist also chemisch gebundenes Wasser enthalten; dieses Kristallwasser verdunstet im Gegensatz zu mechanisch anhaftendem Wasser nicht bei 100°, sondern erst bei höheren Temperaturen. Beispielsweise entspricht nur der entwässerte (kalkinierte) Kupfervitriol wirklich der Formel CuSO_4 , das kristallisierte Salz ist eine Verbindung von 1 Molekel Kupfersulfat mit 5 Molekeln Wasser, also $\text{CuSO}_4 + 5\text{H}_2\text{O}$; entsprechend kommt dem kristallisierten Zinkvitriol die Formel $\text{ZnSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O}$, dem kristallisierten Eisenvitriol die Formel $\text{FeSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O}$, dem oben (§ 76) erwähnten Glaubersalz die Formel $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O}$ und dem kristallisierten Kupferchlorid die Formel $\text{CuCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ zu.

Salze in der Natur (Mineralien).

§ 78. § 78. Viele in der Natur sehr verbreitete Mineralien sind Salze der verschiedenen Sauerstoffsäuren; die folgenden sind teils Sulfate, teils Nitrate, teils Karbonate und teils Silikate.

Anhydrit, CaSO_4 ¹⁾, kristallisiert im rhombischen System, häufig körnige Massen bildend. Härte 3, spez. Gewicht 3, farblos oder hellblau usw., glasglänzend, durchsichtig oder durchscheinend; findet sich als steter Begleiter des Steinjalzes.

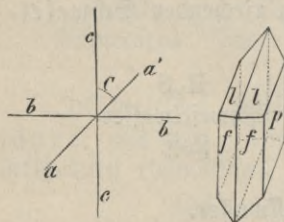


Fig. 41.

Gips, $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$, vom Anhydrit durch das Kristallwasser unterschieden, kommt in schönen Kristallen des monoklinen Systems, in Tafeln usw.²⁾ vor und läßt sich leicht in sehr dünne, wenig biegsame Blättchen spalten. Härte 2, spez. Gewicht 2,3,

¹⁾ Über das Metall Kalzium Ca vgl. Flußspat § 54 und Kalziumhydroxyd § 71.

²⁾ Das monokline System hat drei ungleiche Achsen, von denen sich zwei (a und c) schiefwinklig kreuzen, während die dritte (b) auf den beiden anderen senkrecht steht. Fig. 41 zeigt dieses Achsenkreuz sowie eine beim Gips häufige Form, nämlich die Säule f, die oben und unten durch die geneigten Flächen l geschlossen und seitlich durch p abgestumpft ist.

wasserhell oder schwach gefärbt, durchsichtig, auf den Spaltungsflächen perlmutterglänzend. Gipsstein, das aus Körnchen oder Fasern dieses Minerals besteht, bildet nicht nur mächtige Stöcke innerhalb anderer Gesteine (häufig zusammen mit Anhydrit und Steinsalz), sondern auch Hügel und ausgedehnte Gebirgsteile (Harz, Thüringen, Württemberg, Oberschlesien). Sehr feinkörnige, reinweiße Vorkommnisse heißen Malbaster; sie werden zu Kunstgegenständen verarbeitet. In großer Menge wird in besonderen Öfen gebrannter, d. h. kristallwasserfreier Gips dargestellt; er bildet mit Wasser, das er begierig wieder aufnimmt, einen allmählich erhärtenden Brei, der zur Herstellung von Figuren, für Stuckarbeiten usw. dient. Gemahlener Gips ist ein wichtiges Düngemittel.

Natronsalpeter (Chilesalpeter), NaNO_3 , ist ein im hexagonalen System, besonders in würfelförmlichen Rhomboedern¹⁾ kristallisierendes, wasserhelles, in Wasser leicht lösliches Salz. Er bildet unter einer dünnen Tondecke in Chile und Peru gewaltige Lager und ist als Düngemittel (Stickstoffdünger) sowie zur Darstellung von salpetersaurem Kalium und Salpetersäure unentbehrlich.

Kalialpeter, KNO_3 , im rhombischen System kristallisierend, in seinen sonstigen Eigenschaften dem vorigen Salze sehr ähnlich, kommt in manchen

Bodenarten als Beimischung vor und wird überdies im großen künstlich dargestellt. Er dient zu vielen gewerblichen Zwecken, vor allem zur Bereitung des Schießpulvers (Schwarzpulvers), das aus 75% Kalialpeter, 13% Holzkohle und 12% Schwefel besteht.

Kalkspat, CaCO_3 , kristallisiert in stumpferen und spitzeren Rhomboedern, sowie in Säulen und anderen Formen des hexagonalen Systems und ist parallel zu den Flächen eines bestimmten Rhomboeders sehr vollkommen spaltbar. Härte 3, spez. Gewicht 2,7, farblos oder schwach gefärbt, durchsichtig oder durchscheinend, glas- bis perlmutterglänzend, mit Salzsäure Kohlen säureanhydrid entwickelnd und daher aufbrausend. Sehr verbreitet in den Spalten und Höhlungen aller Gebirge; besonders schätzt man die wasserhellen und durch doppelte Lichtbrechung ausgezeichneten Abarten (Isländischer Doppelspat). Von großer Wichtigkeit sind die aus Körnchen dieses Minerals bestehenden Kalkgesteine. Marmor, ein weißes oder gefärbtes, fein-

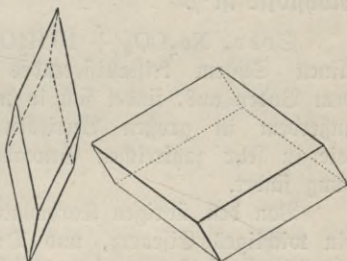


Fig. 42.

¹⁾ Das Rhomboeder, ein von 6 kongruenten Rhomben begrenzter Körper, wird als Halbfächner des Hexagondodekaeders (vgl. § 24, Fig. 15) betrachtet, aus dem es auf dieselbe Weise abgeleitet werden kann wie das Tetraeder aus dem Oktaeder (s. Fig. 5). — Fig. 42 stellt ein spitzeres und ein stumpferes Rhomboeder vor.

oder grobkörniges Kalkgestein, bildet vielfach Lager, Stöcke und Berge (Carrara, Paros, Alpen, Schlesien). Dichter Kalkstein ist äußerst feinkörnig, deutlich geschichtet und oft reich an organischen, besonders tierischen Resten; er ist in der Ebene wie in den Gebirgen sehr verbreitet (Kalkalpen, Schweizer und Deutscher Jura, Harz usw.) und enthält oft unterirdische Höhlen mit Tropfsteingebilden (Karstgebiet). Kreide ist ein weiches, mildes und daher abfärbendes Kalkgestein, das an verschiedenen Orten, besonders auf Kügen und an der Südküste von England, schroffe Felsen bildet. Die Verwendung des Marmors in der Bildhauerkunst sowie der Kreide zum Schreiben ist allgemein bekannt. Dichter Kalkstein liefert Bausteine; ferner wird er in großem Maßstabe gebrannt (vgl. § 71), da gebrannter Kalk zur Herstellung des Mörtels dient und für die Industrie (Gerberei, Stahlbereitung, Zuckerfabrikation usw.) einer der unentbehrlichsten Rohstoffe ist¹⁾.

Soda, $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 10\text{H}_2\text{O}$, ein leichtlösliches, wasserhelles, im monoklinen System kristallisierendes Salz, wittert in Steppengebieten aus dem Boden aus, findet sich in manchen Quellen und Seen gelöst und wird außerdem in großen Betrieben künstlich dargestellt, da sie im Haushalt wie in sehr zahlreichen Gewerben (Glas-, Seifenbereitung usw.) Anwendung findet.

Von den übrigen Karbonaten seien erwähnt Spateisenstein FeCO_3 , ein wichtiges Eisenerz, und Dolomit, $\text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3$; dieser bildet die den Kalkgesteinen sehr ähnlichen Dolomitgesteine, aus denen in den Alpen und sonst ausgedehnte Gebirgsglieder bestehen²⁾.

Gemeiner Feldspat (Kalifeldspat, Orthoklas) besteht aus kiesel-saurem Kalium in Verbindung mit kiesel-saurem Aluminium, kristallisiert im monoklinen System und ist nach zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen spaltbar. Härte 6, spez. Gewicht 2,5, verschieden gefärbt, am häufigsten fleischrot, durchscheinend, glasglänzend. Ähnlich in Form, Spaltbarkeit und chemischer Zusammensetzung sind die triklinen Feldspate.

Porzellanerde, ein wasserhaltiges Aluminiumsilikat, ist eine weiche, hellgefärbte, im feuchten Zustand bildsame Masse, die durch Verwitterung von Kalifeldspat und ähnlichen Mineralien entsteht und zur Porzellanbereitung dient. Von gleicher Zusammensetzung, aber durch beigemischten Kalk und Sand verändert, sind Ton und Lehm, die überall in mächtigen Lagern verbreitet sind und deren Verwendung für Töpferei und Ziegelei allbekannt ist.

¹⁾ Beim Brennen entweicht aus dem Kalziumkarbonat Kohlendioxyd, während Kalziumoxyd (gebrannter Kalk) zurückbleibt ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$).

²⁾ Malachit, ein grünes, zu Kunstgegenständen verwendbares Mineral, kann als eine Verbindung von Kupferkarbonat und Kupferhydroxyd, $\text{CuCO}_3 + \text{Cu(OH)}_2$, aufgefaßt werden; ebenso ist Patina oder Edelrost (vgl. S. 15) ein sogenanntes basisches Kupferkarbonat.

Die Glimmerarten — farblos oder hellfarbiger Kaliglimmer und dunkler Magnesiaglimmer — haben eine ähnliche Zusammensetzung wie die Feldspate, sind aber viel weicher (Härte 2—3) und in dünne, sehr elastische, perlmutterglänzende Blätter spaltbar. Diese werden, wenn sie von großen Tafeln stammen, zu unzerbrechlichen Lampenzylindern und Fensterscheiben verarbeitet.

Wichtige Silikate sind ferner Augit und Hornblende, dunkle, harte, im monoklinen System kristallisierende Mineralien, das erste sehr wenig, das andere in hohem Grade spaltbar; außerdem Asbest, der aus dünnen, biegsamen Fasern besteht und unverbrennliche Pappen und Gewebe liefert, sowie Granat, ein meist rotbraunes, im regulären System, besonders in Rhombendodekaedern kristallisierendes Mineral, dessen schön gefärbte Abarten als Edelsteine benutzt werden.

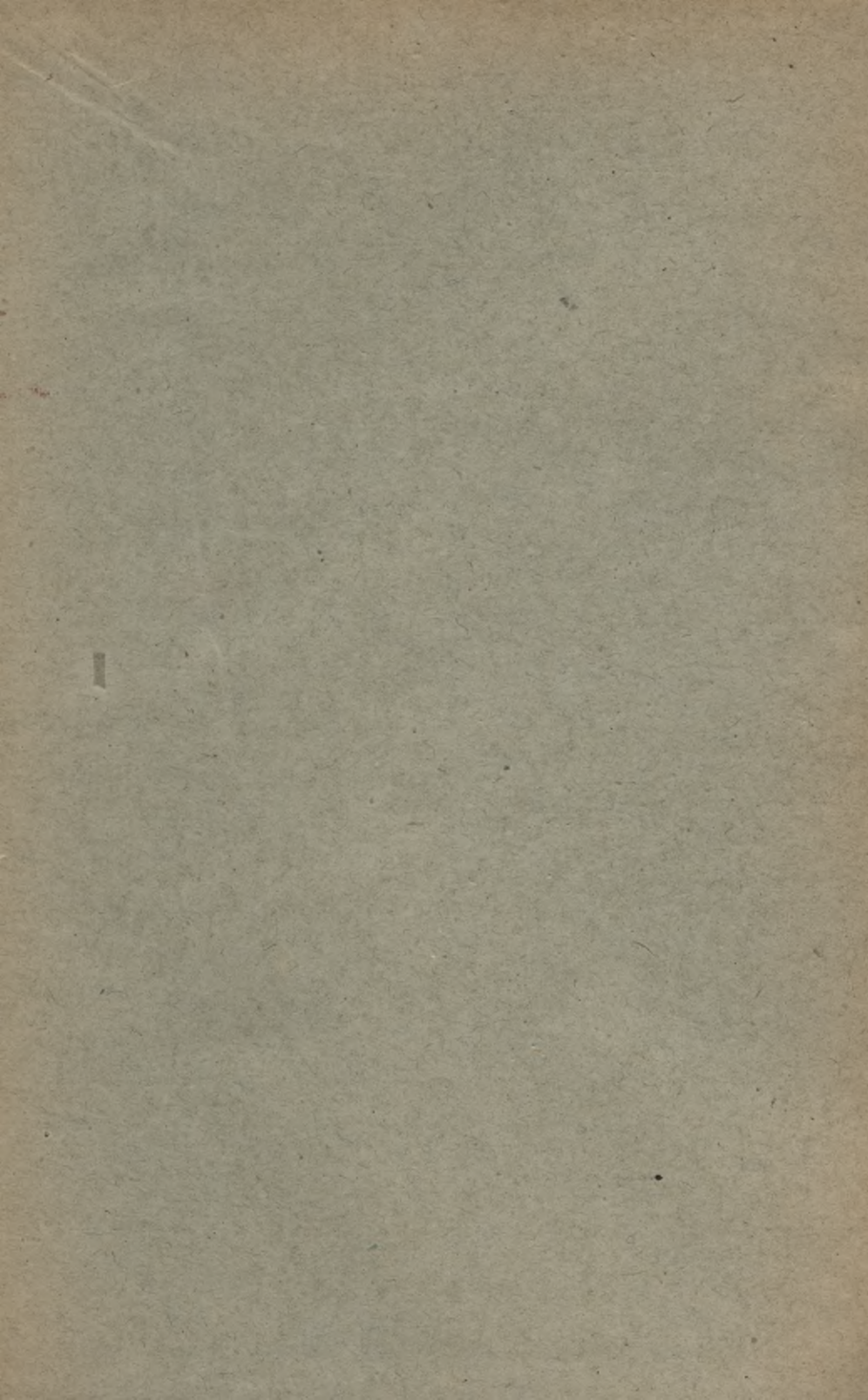
Die genannten Silikate setzen in Gemeinschaft mit Quarz die verbreitetsten Gesteine zusammen. Der massige Granit und der schiefrige Gneis, die die größten Gebirge (Zentralalpen, Pyrenäen, Sudeten, skandinavische Gebirge usw.) bilden, auch als Feldsteine und erratische Blöcke (Geschlebe) vielfach in der Ebene gefunden werden, sind kristallinisch-körnige Gemenge von Orthoklas und anderen Feldspaten mit Quarz und Glimmer. Glimmerschiefer, ebenfalls in den Gebirgen sehr verbreitet, besteht aus Glimmer und Quarz. Basalt, ein dichtes, dunkelfarbiges, vielfach Berge und horizontale lavaartige Decken bildendes Gestein, enthält neben anderen Mineralien triklinen Feldspat und Augit. Auch die eigentlichen Laven, die als geschmolzene, später erstarrende Massen aus den Vulkanen der Jetztzeit empordringen, bestehen wesentlich aus Silikaten.

Die künstlichen Gläser sind im amorphen Zustand erstarrte Gemenge verschiedener Silikate, besonders enthalten sie kieselreiches Kalium oder kieselreiches Natrium, verbunden mit kieselreichem Kalzium. Für das gewöhnliche, zu Flaschen und Fensterscheiben dienende Glas sind Quarz (reiner Sand), entwässerte Soda und irgend ein Kalkgestein die Rohstoffe.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Alphabetisches Register zum Anhang.

- Achat 48.
 Affinität 13.
 Allotropie 6.
 Aluminium 15.
 Amethyst 48.
 Ammoniak 55.
 Amorpher Zustand 4.
 Anhydrit 80.
 Antimon 2, 51.
 Argon 23.
 Asbest 83.
 Assimilation 69.
 Athylen 60.
 Atmung 47, 69.
 Atom 35.
 Atomgewicht 37, 39.
 Ätali 73.
 Ätnatron 73.
 Augit 83.
 Azetylen 60.
 Basalt 83.
 Basen 74.
 Bergkristall 48.
 Blei 2.
 Bleiglanz 9.
 Brauneisenerz 75.
 Braunkohle 42.
 Braunstein 21, 25.
 Brom 53.
 Bronze 1.
 Bunsenbrenner 61.
 Chalzedon 48.
 Chlor 50.
 Chloralk 52.
 Chlorsaures Kalium 21.
 Chlorwasserstoff 52.
 Destillation 26.
 Diamant 44.
 Dolomit 82.
 Doppelspat 81.
 Edelmetalle 17.
 Edelsteine 25.
 Einheitselement 37.
 Eisen 2, 3.
 Eisengewinnung 67.
 Eisenrost 15, 75.
 Eisenvitriol 76, 80.
 Elektrolyse 32, 57.
 Element 12.
 Erze 11, 25.
 Feldspat 82.
 Feuerstein 48.
 Flamme 34, 60.
 Fluor 53.
 Flußspat 54.
 Formeln
 (atomistische) 39.
 Gasgültigkeit 61.
 Gemenge 6.
 Gewichtsverhältnisse
 (bei chemischen
 Verbindungen) 13.
 Gips 80.
 Glas 83.
 Glaubersalz 79, 80.
 Glimmer 83.
 Glimmerschiefer 83.
 Gneis 83.
 Gold 3.
 Granat 83.
 Granit 83.
 Graphit 44.
 Grubengas 58.
 Grundstoff 12.
 Halogene 53.
 Haloidsäuren 75.
 Härtestala 1.
 Hochofen 67.
 Höllestein 77.
 Hornblende 83.
 Hydroxyde 74.
 Jod 53.
 Kalilauge 73.
 Kalisalpeter 81.
 Kalium 14.
 Kaliumhydroxyd 73.
 Kalk, geb. 74, 82.
 Kalk, gelöschter 74.
 Kalkspat 81.
 Kalstein 82.
 Kalkwasser 45.
 Kalzium 54.
 Kalziumhydroxyd 74.
 Kalziumoxyd 74.
 Katalyse 71.
 Kieselsäuren 72.
 Knallgas 32.
 Kochsalz 54.
 Kohle 41.
 Kohlenoxydgas 46,
 60.
 Kohlenensäureanhydrid
 45, 72.
 Kohlenstoff 42.
 Kohlenwasserstoffe
 58, 60.
 Korund 25.
 Kreide 82.
 Kristallinischer Zu-
 stand 3, 9.
 Kristallsystem, hexa-
 gonales 24, 81.
 — monoklines 80.
 — quadratisches 10.
 — reguläres 3, 9, 10.
 — rhombisches 4.
 — triklines 78.
 Kristallwasser 80.
 Kupfer 3.
 Kupferchlorid 78, 80.
 Kupferglanz 10.
 Kupferies 10.
 Kupfervitriol 78, 80.
 Lackmusfarbstoff 45,
 56.
 Lava 83.
 Legierungen 1.
 Lehm 82.
 Leuchtgas 59.
 Luft, atmosphärische
 18, 23.
 Magnesium 15, 16.
 Magnetisenerz 24.
 Marmor 81.
 Messing 1.
 Metalle 1, 12, 14.
 Metallfalle 16, 23.
 Metalloide 12.
 Methan 58.
 Molekel 35, 62.
 Molekulargewicht
 65.
 Natrium 14.
 Natriumhydroxyd
 73.
 Natronlauge 73.
 Natronsalpeter 81.
 Nichtmetalle 12.
 Opal 48.
 Orthoklas 82.
 Oxyd 23.
 Oxydation 22.
 Ozon 23, 36.
 Patina 15, 82.
 Petroleum 62.
 Pflanzenernährung
 68.
 Phosphor 5, 17.
 Phosphorperoxyd
 70.
 Phosphorsäure 70.
 Platin 3.
 Porzellanerde 82.
 Proportionen, kon-
 stante und mul-
 tiple 13.
 Quarz 48.
 Quecksilber 2.
 Quecksilberoxyd
 (Quecksilberfalf)
 16, 20, 23.
 Radioaktive Ele-
 mente 12, 36.
 Rauchtropas 48.
 Reaktion, alkalische
 (basische) 56, 73.
 Reaktion, saure 45.
 Reduktion 67.
 Rotteisenerz 24.
 Rotkupfererz 25.
 Rubin 25.
 Salmiak 58.
 Salmiakgeist 56.
 Salpeter 81.
 Salpetersäure 72.
 Salze 77.
 Salzsäure 49.
 Sand 48.
 Sandstein 48.
 Saphir 25.
 Sauerstoff 20, 22.
 Sauerstoffsäuren 75.
 Säuren 77.
 Schießpulver 81.
 Schwefel 4.
 Schwefeleisen 7.
 Schwefelies 10.
 Schwefelsäure 71.
 Schwefelwasserstoff
 7, 55.
 Schwefligsäurean-
 hydrid 71.
 Silber 3.
 Silizium 47.
 Soda 82.
 Spateisenstein 82.
 Steinkohle 42.
 Steinsalz 54.
 Stickstoff 19.
 Stöchiometrie 40.
 Sumpfgas 58.
 Symbole 2, 39.
 Ton (Töpfer-ton) 82.
 Torf 42.
 Valenz 65.
 Verbindung, chemi-
 sche 12.
 Verbindungsgewicht
 37.
 Verbrennung 22, 51.
 Verfallung 17.
 Wasser 26.
 Wasserstoff 28.
 Wertigkeit 65.
 Zeichen, chemische 2,
 39.
 Zink 2.
 Zinkblende 9.
 Zinkvitriol 76, 80.
 Zinn 2.
 Zinnober 8, 10.
 Zinnstein 25.
 Zustand, amorpher 4.
 Zustand, kristallini-
 scher 3, 9.



Waeber's naturkundliche Lehrbücher.

Lehrbuch der Chemie. Mit Berücksichtigung der Mineralogie und chemischen Technologie. 20. Auflage. (Unveränderter Neudruck.) Mit 132 Abbildungen und einer farbigen Tafel. 1916. 239 S. Gebunden Mk. 2,80

Eine Neubearbeitung dieses Lehrbuches der Chemie ist erschienen unter dem Titel:

Heinze-Waeber, Lehrbuch der Chemie. Bearbeitet im Anschluß an A. Waebers Lehrbuch der Chemie von Oberlehrer **Ernst Heinze**. Mit 139 Abb. und einer farbigen Tafel. 6. Aufl. 1917. VIII u. 192 S. Gebunden Mk. 2,75

Leitfaden der Chemie. Mit 46 in den Text gedruckten Abbildungen. 19. Auflage. 1917. 111 S. Kartoniert Mk. 1,40

Lehrbuch der Physik. Mit 522 Abbildungen und einer farbigen Spektraltafel. 20. Auflage (unveränderter Neudruck), bearbeitet von Prof. **S. Unverricht**. 1917. 398 S. Gebunden Mk. 4,50

Leitfaden der Physik. Mit 218 Abbildungen. 18. Auflage, bearbeitet von **H. Krause**. 1917. 160 S. Kartoniert Mk. 1,85

Physik für Präparandenanstalten. Bearbeitet von Prof. **S. Unverricht**. Mit 208 Abbildungen. 2. Auflage. 1916. 136 S. Kartoniert Mk. 1,70

Lehrbuch der Botanik. 8., durchgesehene Auflage, bearbeitet von Sem.-Oberlehrer **Dr. L. Imhäuser**. Mit 194 schwarzen Abbildungen und 23 farbigen Tafeln als Sonderbeigabe. 1904. VIII u. 336 S. Gebunden Mk. 4,—

Trappe's Schul-Physik. Neu bearbeitet von Prof. **Dr. Maschke**. Mit einem Anhang: Die einfachsten chemischen Erscheinungen mit Berücksichtigung der Mineralogie von Prof. **Dr. Schiff**. Mit einer farbigen Spektraltafel und vielen Abbildungen. 16. Auflage. 1909. 536 S. Gebunden Mk. 5,—

Schäfer, Einfache Versuche aus der Physik. Für Volksschulen und Lehrerbildungsanstalten. Von Semindroblehrer **Dr. Wilhelm Schäfer**. Mit 81 Abbildungen. 2., durchgesehene Auflage. 1914. 64 S. Kartoniert Mk. 1,—

Soppe, Einfache chemische Übungen im Anschluß an Heinze-Waeber. Lehrbuch der Chemie. Von Kreis Schulinspektor **W. Soppe**. Mit einem Anhang: Tafeln zur chemischen Analyse unorganischer Stoffe von **E. Heinze**. 2., durchgesehene Auflage. 1913. 79 S. Kartoniert Mk. 1,20

Schmidt, Chemisches Praktikum. Von Rektor **Julius Schmidt**.

I. Teil: Ausgewählte Kapitel aus der anorganischen Chemie. Mit 89 Abb. 2., vermehrte und verbesserte Auflage. 1911. 120 S. Kart. Mk. 2,25

II. Teil: Ausgewählte Kapitel aus der organischen Chemie. Mit 58 Abbildungen im Text. 2., verbesserte Auflage. 1913. 144 S. Kart. Mk. 2,75

Beide Teile in einem Band. Gebunden Mk. 4,80

Dingelden, Etymologisches Fachwörterbuch zur Mathematik, Physik, Chemie und Mineralogie. Von Oberlehrer **H. Dingelden**. Kart. Mk. 1,60

Cossmann, Deutsche Flora. In zwei Teilen. 4., gänzlich neu bearbeitete Auflage von Seminaroberlehrer **H. Cossmann**.

Ausgabe A: Text und Bilder in einem Band. In biegsam. Pwdbd. Mk. 7,50

Ausgabe B: Erster Teil: Text. 448 S. In biegsam. Leinwandband Mk. 4,25

Zweiter Teil: 884 Abbildungen. 180 S. In biegs. Pwdbd. Mk. 3,75

Kamblly-Thaer Mathematisches Unterrichtswerk

Rechenbücher.

Bearbeitet von Prof. Dr. A. Thaer und Oberrealschullehrer R. Kouwolf.

Rechenbuch für Vorschulen höherer Lehranstalten. In 3 kartonierten Heften
1. Heft: 80 Pf. — 2. Heft: 90 Pf. — 3. Heft: 1 Mk.

Rechenbuch für höhere Schulen.

Ausgabe A: Gekürzte Ausgabe in einem Bande. Gebunden Mk. 2,40

Kriegs- und volkswirtschaftliche Rechenaufgaben hierzu Gebefest Mk. —,25

Ausgabe B: In drei Heften und einem Ergänzungsheft.

1. Heft: Für Sexta. } mit Anhang: Kriegs- Kart. Mk. 1,10

2. Heft: Für Quinta. } und volkswirtschaftliche Kart. Mk. 1,10

3. Heft: Für Quarta u. Untertertia. } Rechenaufgaben. Kart. Mk. 1,10

Ergänzungsheft: Für Obertertia und Untersekunda. Kartoniert Mk. 1,—

Mathematische Lehr- und Übungsbücher.

Neubearbeitungen von Professor Dr. Abrecht Thaer.

Ausgabe A: Für Gymnasien.

I. Teil: Arithmetik und Algebra. Mit 32 Figuren. Gebunden Mk. 2,—

II. Teil: Planimetrie. Mit 234 Figuren. Gebunden Mk. 2,20

III. Teil: Trigonometrie. Mit 68 Figuren. Gebunden Mk. 2,—

IV. Teil: Stereometrie. Mit 170 Figuren. Gebunden Mk. 2,—

Ausgabe B: Für Oberrealschulen, Realgymnasien und Gymnasien
mit mathematischem Reformunterricht und Studienanstalten.

I. Teil: Arithmetik und Algebra. Mit 52 Figuren. Gebunden Mk. 2,50

II. Teil: Planimetrie. Mit 300 Figuren. Gebunden Mk. 2,75

III. Teil: Trigonometrie. Mit 77 Figuren. Gebunden Mk. 2,50

IV. Teil: Stereometrie. Mit 294 Figuren. Gebunden Mk. 3,—

Ausgabe C: Für Realschulen.

I. Teil: Arithmetik und Algebra. Mit 6 Figuren. Gebunden Mk. 1,25

II. Teil: Planimetrie nebst Elementen der Trigonometrie
und Stereometrie. Mit 315 Figuren. Gebunden Mk. 3,—

Neben der vorstehend angezeigten Neubearbeitung bleiben bis auf weiteres bestehen die alte unveränderte Ausgabe des Werkes unter dem Titel: Kamblly's Elementar-Mathematik, und die Ergänzungen dazu von Dir. Prof. Dr. Koeder.

Thaer und Wimmenauer

Arithmetische Aufgaben für höhere Schulen

Von Professor Dr. A. Thaer und Professor Dr. Th. Wimmenauer.

Ausgabe A: Für Gymnasien. (In Vorbereitung.)

Ausgabe B: Für Oberrealschulen, Realgymnasien und verwandte Anstalten.

1. Teil: Unterstufe. Gebunden Mk. 1,75

2. Teil: Oberstufe. Mit 3 Figuren. Gebunden Mk. 1,75

Ausgabe C: Für Realschulen. Gebunden Mk. 1,75

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294342